

Drgająca Ziemia

Powszechnie wiadomo, że nasza planeta obraca się, nie każdy jednak wie, jak skomplikowany jest ten ruch. Ziemia zwalnia lub przyspiesza obrót wokół swojej osi, co powoduje zmiany długości doby. Kierunek osi ziemskiej względem gwiazd ulega zmianie, chwilowa oś obrotu zmienia położenie względem osi średniej, a Ziemia, chwiejąc się i kołysząc, wykonuje ruch podobny do ruchu wirującego bączka–zabawki. Zmiany ruchu obrotowego Ziemi odbywają się z okresami od godzin, tygodni, miesięcy itd., a sięgają tysięcy lat. Następstwo dnia i nocy oraz precesja osi obrotu znane były od Starożytności, ale wykrycie większości subtelnych zjawisk nastąpiło w ostatnim stuleciu i wymagało wykorzystania nowoczesnych technik obserwacyjnych. Ruch obrotowy Ziemi jest monitorowany w sposób ciągły od końca XIX w. przez liczne organizacje międzynarodowe. Pozwoliło to na zwiększenie dokładności wyznaczeń długości doby do poziomu ułamka milisekundy, oraz współrzędnych bieguna do 0,1 milisekundy łuku, czemu odpowiadają 3 mm na powierzchni Ziemi.

Precesja – nutacja

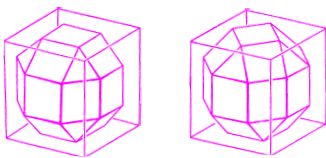
W czasach, gdy Babilończycy nadawali nazwy gwiazdozbiорom, punkt równonocy wiosennej, czyli punkt Barana, znajdował się rzeczywiście w Baranie. Obecnie punkt ten leży w Rybach i przesuwa się w stronę Wodnika. Zmiana ta jest wynikiem tzw. precesji astronomicznej, czyli jednostajnego ruchu osi obrotu Ziemi po powierzchni stożka o kącie rozwarcia $2 \times 23,5$ w okresie 25 400 lat. Na skutek precesji punkty przecięcia się równika niebieskiego z ekliptyką (czyli punkty równonocy) przesuują się wzdłuż ekliptyki o około $50''/291$ na rok, czyli o 30° w ciągu 2150 lat. Precesję opisał żyjący w II w. p.n.e. grecki astronom Hipparch.

Na powolny ruch precesyjny osi obrotu Ziemi nakładają się ruchy „eliptyczne” zwane nutacjami o podstawowym okresie 18,6 roku (jest to okres precesji orbity Księżyca) i amplitudzie $9''/2$. Precesję i nutację wywołuje oddziaływanie grawitacyjne Księżyca, Słońca i planet na glob ziemski, którego kształt odbiega nieco od kuli. Swój wkład mają tu też pływy oceaniczne oraz zaburzenia w cyrkulacji atmosferycznej i oceanicznej.

Ruch biegunów

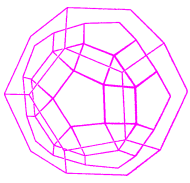
Bieguny geograficzne również poruszają się względem powierzchni Ziemi, co pociąga za sobą zmiany współrzędnych geograficznych każdego jej punktu. Biegun chwilowy zakreśla wokół bieguna średniego krzywą przypominającą skręcającą się i rozkręcającą spiralę. Ruch ten charakteryzują głównie dwie składowe: swobodna i wymuszona.

Składowa swobodna nazywana jest od nazwiska odkrywcy chandlerowską. Przesuwanie się bieguna po powierzchni Ziemi przewidział już Euler w końcu XVIII w. dla Ziemi jako elipsoidalnej bryły sztywnej. Okres tego ruchu według Eulera powinien wynosić 305 dni. Jego teoria znalazła obserwacyjne potwierdzenie dopiero, gdy w latach 1891–1892 amerykański astronom-amator Seth Carlo Chandler, analizując obserwacje zmian szerokości geograficznej w Harvardzie, wykrył zmiany szerokości o okresach 14- i 12-miesięcznych. Z czasem ustalono, że za okres 14-miesięczny, niezgadzący się z przewidywaniami Eulera, odpowiedzialna jest skomplikowana budowa naszej planety, w szczególności brak sztywności. Obecnie oscylacje Chandlera opisuje się jako ruch bieguna po owalu o średnicy zmieniającej się od 3 do 10 m i okresie 435 dni. W roku 1891 zorganizowano specjalną kampanię obserwacyjną, podczas której przeprowadzono pomiary szerokości geograficznej jednocześnie w Berlinie, Pradze, Strasburgu i Honolulu. Jednoczesne obserwacje na południkach różniących się w długości geograficznej o około 180°

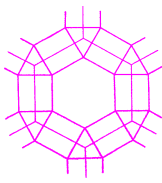


(3, 4, 4, 4) to jedyny napis, któremu odpowiadają dwie nieprzystające powierzchnie; warto się zastanowić nad tym, czym różni się sposób ich wycięcia z sześcianu

* Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa



z dwunastościanu otrzymujemy (3, 4, 5, 4), a z parkietażu sześciokątnego (3, 4, 6, 4)



rzeczywiście wykazały, że zmiany szerokości w Honolulu mają znaki przeciwne do zmian w Europie.

Ruch bieguna geograficznego po powierzchni Ziemi tłumaczy się przede wszystkim niepokrywaniem się chwilowej osi obrotu z jej osią głównego momentu bezwładności. Gdyby nawet w pewnym momencie osie te były zgodne, to przemieszczenia mas w ziemskim globie doprowadziłyby do ich rozsunienia. A są nimi przepływy w oceanach, hydrosferze lądowej i w atmosferze, dające w przybliżeniu okresowe wymuszone oscylacje bieguna o amplitudzie rzędu 3 m. Wykryto również oscylacje o amplitudach nawet milimetrowych o okresach od godzin do miesięcy, spowodowane zmianami ciśnienia atmosferycznego i prądami oceanicznymi. Biegun ziemski wykonuje również powolny ruch systematyczny rzędu $0''/0003/\text{rok}$ w kierunku długości geograficznej zachodniej około 70° , czego przyczyną jest najprawdopodobniej ustąpienie zlodowacenia. Chwianiu (nutacjom) podlegają również osie zewnętrznego i wewnętrznego jądra naszej planety.

Zmiany długości doby

Ruch obrotowy Ziemi był od wieków podstawą pomiarów czasu i definicji jednostki czasu. Do połowy ostatniego stulecia obrót Ziemi uważano za zjawisko przebiegające jednostajnie i związany z nim czas za upływający też jednostajnie. Wprawdzie już w drugiej połowie XX wieku zauważono systematyczne przesunięcie położenia Księżyca względem położen przewidzianych rachunkiem, lecz początkowo nie wiązano tego z zaburzeniami ruchu obrotowego Ziemi. Analiza obserwacji Księżyca, Słońca, Merkurego, Wenus (dostępnych po roku 1968) oraz informacji o zaćmieniach Słońca (od 1000 r. p.n.e.) potwierdziła, że Ziemia zwalnia swój obrót. Zjawisko to potwierdzają również badania ilości i grubości dziennego przyrostu osadów kopalnych i muszli zwierząt bezkręgowych. Stało się jasne, że czas wskazywany przez obracającą się Ziemię biegnie coraz wolniej, a doba wydłuża się średnio o $0,0016 \text{ s}/\text{wiek}$. Przyczyną tego jest przede wszystkim utrata energii w wyniku pływów oceanicznych wywołanych oddziaływaniem Księżyca i Słońca.

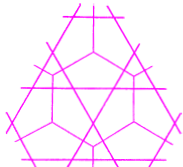
W latach 30. XX wieku dzięki analizie wskazań zegarów (jeszcze) wahadłowych wykryto zmiany sezonowe prędkości obrotowej Ziemi. Potwierdziło się to po wprowadzeniu zegarów kwarcowych. Stało się więc konieczne zrezygnowanie z obracającej się Ziemi jako wzorcowego zegara. W 1969 r. za podstawową skalę czasu przyjęto Międzynarodowy Czas Atomowy. Obecnie w zaburzeniach prędkości obrotowej Ziemi wyróżniamy kilka podstawowych składowych, od wiekowego wydłużania się doby, przez zaburzenia pływowe o okresach od kilku godzin do 18,6 lat, nieregularne zmiany trwające od 5 do 300 lat, kończąc na zmianach krótkookresowych. Te ostatnie, o amplitudzie poniżej $0,6 \text{ ms}$, są wywoływane przez zmiany cyrkulacji wiatrów strefowych.

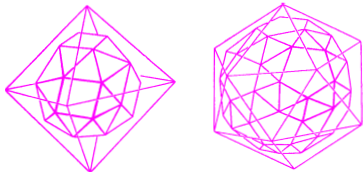
Ruch mas

Dlaczego ruch obrotowy naszej planety jest tak skomplikowany? Otóż Ziemia nie jest jednorodnym ciałem sztywnym, lecz ma złożoną budowę wewnętrzną (skorupa, płaszcz, ciekłe i stałe jądro). Jaki to ma wpływ na ruch obrotowy, wie każdy, kto porównywał wirowanie jajka na twardo i jajka surowego. Ponadto na powierzchni Ziemi znajdują się morza i oceany, nad nimi atmosfera, sam kształt Ziemi nie jest dokładnie kulisty, a planeta podlega grawitacyjnym oddziaływaniom ze strony Słońca, Księżyca i pozostałych planet. Okazuje się wreszcie, że wiatry, pływy i prądy oceaniczne oraz przemieszczenia mas we wnętrzu globu wpływają na ruch naszej planety. Żeby to zrozumieć, wystarczy uciec się do znanej analogii z łyżwiarką wykonującą piruet. Dlatego do zrozumienia i przewidywania tych zaburzeń potrzebne są informacje o cyrkulacji wiatrów, prądów morskich, o masach lodu, a nawet o wodach gruntowych i śródlądowych. Za miarę przemieszczenia mas można uznać stosunek przesuwanej masy do masy Ziemi lub stosunek przesunięcia



z dwudziestościanu powstaje (3, 5, 3, 5), a z parkietażu sześciokątnego (3, 6, 3, 6)





zdecydowanie najbardziej skomplikowane cięcia prowadzą z ośmiościanu do (3, 3, 3, 3, 4), a z dwudziestociąnu do (3, 3, 3, 3, 5)

do ziemskiego promienia. Wiele procesów geofizycznych wywołuje przemieszczenie masy nie większe niż 10^{-10} . Do najbardziej znaczących należą efekty pogodowe zależne od promieniowania słonecznego.

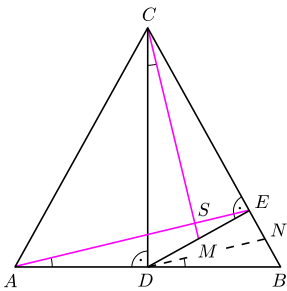
Zauważono, że fenomen klimatyczny El Niño również zakłóca ruch obrotowy Ziemi. Podczas pojawienia się „diabelskiego prądu” nasza planeta zwalnia obroty, co powoduje wydłużenie się doby o 0,0004 do 0,0008 s. Naukowcy mają nadzieję, że badania ruchu obrotowego Ziemi dostarczą informacji, dzięki którym będzie można przewidzieć wystąpienie i skalę zjawiska El Niño. W ostatnim dziesięcioleciu opracowano po raz pierwszy modele określające wkład oceanów do ziemskiego momentu pędu.

Przemieszczenie mas wody zachodzi również na obszarach lądowych w bardzo różnych skalach czasowych. Zmiany sezonowe i krótsze wywoływane są przez parowanie, skraplanie, zmiany ilości wody w jeziorach, zmiany wilgotności gleby i zmiany biomasy. W dłuższych skalach czasowych dominują zmiany pokrywy lodowej i poziomu wód gruntowych.

Przemieszczenia mas zachodzą również w ciekłym jądrze Ziemi (ich skutkiem jest m.in. ziemskie pole magnetyczne). Ciekłe jądro jest niewątpliwie źródłem fluktuacji długości doby o okresach od kilku do kilkudziesięciu lat, a jego spłaszczenie wpływa na ruch biegunów i nutację osi ziemskiej. Dlatego na podstawie modelu obserwowanej precesji i nutacji można uzyskać informacje o geofizycznych parametrach wnętrza Ziemi. W szczególności dokładność tak wyznaczonego spłaszczenia jądra jest znacznie wyższa niż ta, jaką można osiągnąć na podstawie obserwacji sejsmologicznych. Ruchy mas w płaszczu otaczającym jądro zewnętrzne Ziemi mogą być wywoływane oddziaływaniem pływowym, naciskiem ze strony atmosfery i oceanu, konwekcją (której towarzyszą ruchy płyt tektonicznych), czy też reakcją na ustąpienie zlodowacenia. I tak wiele procesów geofizycznych znajduje się poniżej progu wykrywalności wskutek małej masy biorącej w nich udział lub małych przesunięć masy. Należą do nich erupcje wulkaniczne, osuwiska ziemi, powodzie, wydobywanie ropy, zmiany biomasy.



Rozwiązanie zadania M 1154.
Oznaczmy przez S punkt przecięcia prostych AE i CM oraz niech N będzie środkiem odcinka BE .



Skoro punkt D jest środkiem odcinka AB , to proste AE i DN są równoległe. A zatem $\sphericalangle BDN = \sphericalangle DAE$.

Trójkąty prostokątne BDE i DCE są podobne. Ponieważ punkty N i M są odpowiednio środkami odcinków BE i DE , to trójkąty BDN i DCM są podobne. Stąd $\sphericalangle BDN = \sphericalangle DCM$.

Łącząc uzyskane równości, otrzymujemy $\sphericalangle DAE = \sphericalangle DCM$, czyli $\sphericalangle DAC = \sphericalangle DCS$, skąd wynika, że punkty A, D, S, C leżą na jednym okręgu. Stąd $\sphericalangle ASC = \sphericalangle ADC = 90^\circ$.

Komu to potrzebne?

Prowadzenie ciągłych, możliwie najdokładniejszych obserwacji ruchu obrotowego Ziemi jest niezbędne na potrzeby nawigacji kosmicznej i geodezji satelitarnej. Przykładowo, w latach 60. w trakcie przygotowań misji Apollo okazało się, że uwzględnienie ruchu biegunów Ziemi i zakłóceń czasu uniwersalnego jest niezbędne dla nawigacji pojazdu okołoksiężycowego. Badania tych zjawisk dostarczają informacji dotyczących globalnego rozkładu i transportu mas w Ziemi oraz jej budowy i własności dynamicznych. W badaniach tych biorą udział uczeni z Polski, w szczególności z Centrum Badań Kosmicznych PAN. Jednym z ciekawszych ich wyników naukowych jest wyjaśnienie źródeł pochodzenia słynnej oscylacji chandlerowskiej za pomocą modelu cyrkulacji oceanicznej. Polscy badacze, jako jedni z pierwszych, wyznaczyli krótkookresowe (centymetrowe) oscylacje położenia bieguna. Wśród twórców modelu tego zjawiska znalazł się prof. Aleksander Brzeziński z Centrum Badań Kosmicznych PAN, który w roku 2003 został pierwszym polskim laureatem Nagrody Kartezjusza, przyznawanej przez Unię Europejską.

Można więc powiedzieć: Tak, nasza Ziemia kręci się, ale to skomplikowane zjawisko.



Rozwiązanie zadania M 1153.

Niech $s_1 < s_2 < \dots < s_{100}$ będą rozpatrywanymi sumami i przypuśćmy, że $s_{i+1} - s_i \geq 3$ dla $i = 1, 2, \dots, 99$. Wówczas

$$s_{100} - s_1 = (s_{100} - s_{99}) + (s_{99} - s_{98}) + \dots + (s_2 - s_1) \geq 3 \cdot 99 = 297.$$

Ponieważ $s_1 \geq 1 + 2 + 3 = 6$, więc $s_{100} \geq 297 + 6 = 303$. Uzyskaliśmy sprzeczność, gdyż $s_{100} \leq 98 + 99 + 100 = 297$. A zatem różnica pewnych dwóch sum s_i nie przekracza 2.