

RUCH ROTACYJNY ZIEMI

Geodezja Satelitarna

ROTACJA ZIEMI

- Niejednostajność ruchu (spowalnianie obrotu – wydłużanie długości dnia)
- Zmienność położenia osi rotacji
 - ruch względem inercjalnego układu współrzędnych (precesja, nutacja)
 - ruch względem Ziemi (wobble)



ZMIENNA PRĘDKOŚĆ ROTACJI

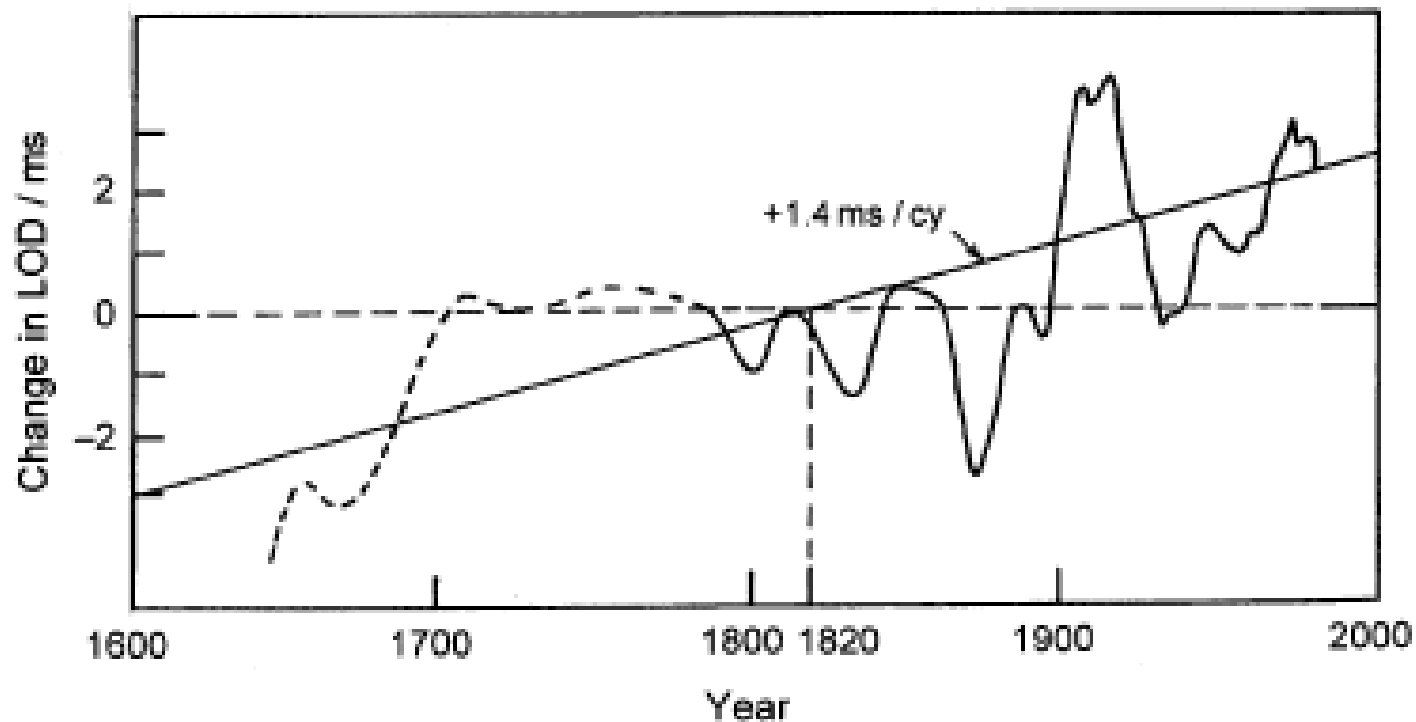


Figure 3. Change in the length of day since 1620 (after Stephenson and Morrison [25]).



DŁUGOŚĆ DNIA

- Zmiana wiekowa rzędu 1-2 milisekund/wiek
- Nieregularne fluktuacje o okresie 20-30 letnim i amplitudzie do 4-5 milisekund
- Niewidoczne na wykresie zmiany krótkookresowe o amplitudzie rzędu 2-3 milisekund w okresie mniejszym niż 5 lat. Wyróżnić można okresy: 2 tygodni, 1 miesiąca, 6 miesięcy i 1 roku.



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Związek między zmianą czasu UT a zmianą prędkości rotacji Ziemi.

Ponieważ obserwuje się zmianę czasu UT w stosunku do czasu TAI możemy zapisać, że $UT = UT(t)$, gdzie t jest czasem w skali atomowej.

Niech $\Omega(t)$ będzie kątową prędkością rotacji Ziemi oraz przez $\phi(t)$ oznaczmy kąt o jaki Ziemia obraca się w ciągu czasu t .

Prędkość rotacji Ziemi jest zatem pochodną po czasie kąta ϕ

skąd

$$\frac{d\phi}{dt} = \Omega(t)$$
$$\phi(t) = \int_0^t \Omega(t') dt'$$

Zakładając, że w pierwszym przybliżeniu prędkość obrotu Ziemi jest stała i równa 1 obrotowi na dobę, tak że Ω_0 jest średnią $\Omega(t)$

$$\Omega_0 UT = \phi$$



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

Można napisać więc związek między czasem UT a prędkością rotacji Ziemi:

$$\text{UT}(t) = \frac{1}{\Omega_0} \int_0^t \Omega(t') dt'.$$

a ponieważ

$$\Omega(t) = \Omega_0 + \delta\Omega(t)$$

więc

$$\delta\text{UT}(t) = \frac{1}{\Omega_0} \int_0^t \delta\Omega(t') dt'$$

i odwrotnie, ze zmiany czasu UT wówczas można określić zmianę prędkości obrotu Ziemi:

$$\delta\Omega(t) = \Omega_0 \frac{d}{dt} \delta\text{UT}(t).$$



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

Znając zmianę prędkości rotacji Ziemi można określić zmianę długości dnia, która jest zdefiniowana jako ilość sekund które upływają w ciągu jednego obrotu :

$$\text{lod} \approx \frac{2\pi}{\Omega_0 + \delta\Omega} \approx \frac{2\pi}{\Omega_0} \left[1 - \frac{\delta\Omega}{\Omega_0} \right]$$

Zatem zmiana długości dnia jest równa

$$\Delta\text{lod}(t) = - \left(\frac{2\pi}{\Omega_0} \right) \left(\frac{\delta\Omega(t)}{\Omega_0} \right)$$

I jeśli przez $\text{lod}_0 = 2\pi/\Omega_0$ oznaczyć długość dnia gdy nie ma zmian rotacji, to

$$\frac{\Delta\text{lod}}{\text{lod}_0} = - \frac{\delta\Omega(t)}{\Omega_0}$$



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Liniowe zmiany długości dnia (1-2 msek/wiek) mogą być oszacowane obserwacyjnie dopiero wówczas, gdy dysponuje się obserwacjami czasu dłuższymi niż 1 wiek.
- Pomocne są w tym celu dokonane przez starożytnych Greków, Babilończyków zapiski momentów zaćmień Księżyca. Porównuje się je z obliczonymi na tamten dzień pozycjami Księżyca (z uwzględnieniem obecnej prędkości rotacji Ziemi) . Różnica jest miarą zmiany prędkości rotacji.



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA - PRZYKŁAD

- Zmianę czasu UT od momentu starożytnego zaćmienia $t=t_1$ do momentu obecnego $t=t_2$ można wyznaczyć wzorem:

$$\delta\text{UT} = \frac{1}{\Omega_0} \int_{t_1}^{t_2} \delta\Omega(t') dt'.$$

- Jeżeli $\delta\Omega$ zmienia się liniowo, to $\delta\Omega = -\delta\dot{\Omega}t$,
 $\delta\dot{\Omega} = \text{const}$ stąd w wyniku całkowania otrzymamy

$$\delta\text{UT} = -\frac{\delta\dot{\Omega}}{\Omega_0} \frac{t_2^2 - t_1^2}{2}$$



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA - PRZYKŁAD

- Skąd względna zmiana prędkości rotacji Ziemi może być oszacowana jako

$$\frac{\Delta \text{lod}}{\text{lod}_0} = -\frac{\delta \Omega(t)}{\Omega_0}$$

i po obustronnym różniczkowaniu po czasie mamy:

$$-\frac{\delta \dot{\Omega}}{\Omega_0} = \frac{\frac{d(\Delta \text{lod})}{dt}}{\text{lod}_0} \approx \frac{2 \text{ msek/wiek}}{86400 \text{ sek}} = 2 \times 10^{-8} / \text{wiek}$$



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA - PRZYKŁAD

- o A zmiana czasu UT po upływie jednego stulecia będzie równa:

$$\delta\text{UT} = \left(\frac{2 \times 10^{-8}}{\text{wiek}} \right) \times \frac{1}{2} \text{wiek}^2 = 10^{-8} \text{wieku} \approx 30 \text{ sek}$$

- o Natomiast po 2000 lat będzie równa

$$\delta\text{UT} = \left(\frac{2 \times 10^{-8}}{\text{wiek}} \right) \times \frac{400}{2} \text{wiek}^2 \approx 3.3 \text{ godz}$$

- o Czyli zaćmienie obserwowane 2000 lat temu powinno zdarzyć się 3.3 godziny wcześniej niż można to obliczyć posługując się dzisiejszą prędkością rotacji Ziemi.



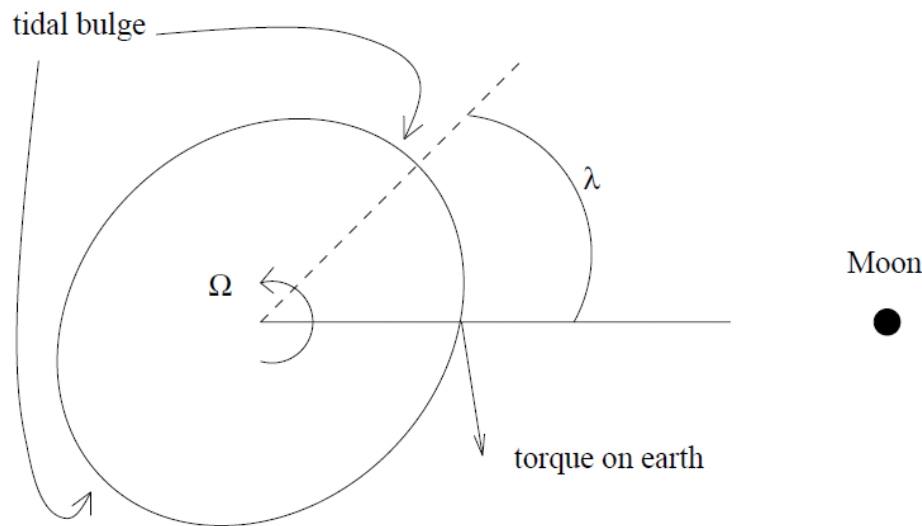
LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Jedną z głównych przyczyn liniowej zmiany długości dnia jest dyssypacja energii z powodu tarcia wód przemieszczających się pod wpływem pływów oceanicznych wywołanych grawitacyjnym oddziaływaniem Księżyca i Słońca.



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Gdyby nie było wytracania energii, wówczas maksimum pływów (wybrzuszenie) wypadało by dokładnie wtedy, gdy Księżyc byłby nad nim w zenicie. Z powodu tarcia wybrzuszenie następuje nieco później ($\lambda = 0.4$ stopnia $= 10$ min).

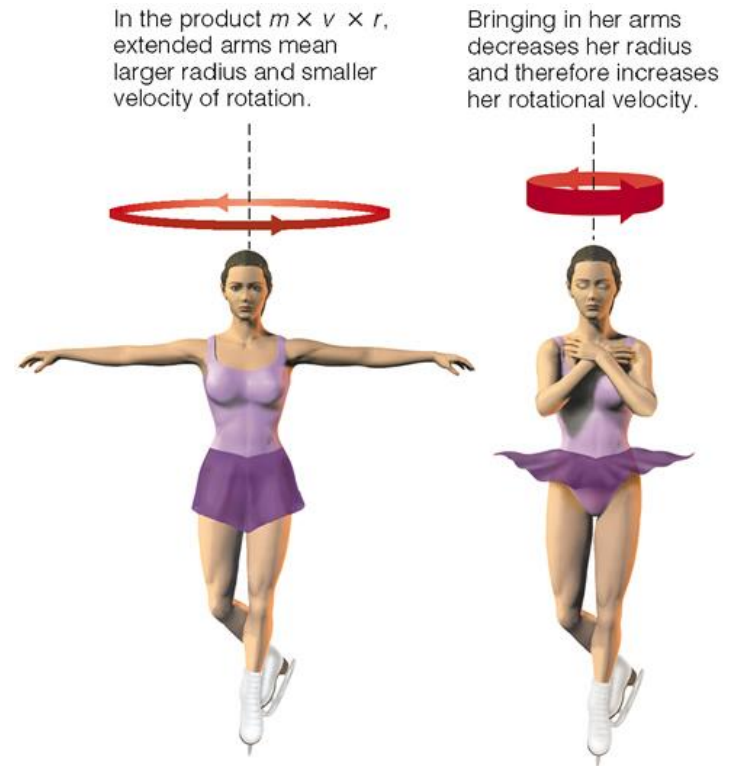


- Księżyc w ten sposób spowalnia ruch rotacyjny Ziemi.



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Wydłużanie się okresu obrotu Ziemi uwidacznia się w ruchu SSZ i Księżyca jako oddalanie się tych obiektów od Ziemi (większy promień orbity). Dzieje się tak z powodu zachowywania momentu pędu układu Ziemia-satelita czy też Ziemia-Księżyc.
- Opóźnienie λ może być niezależnie wyznaczone z ruchu orbitalnego Księżyca i sztucznych satelitów.



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Z obserwacji SSZ i obserwacji Księżyca wynika, że spowalnianie ruchu obrotowego Ziemi następuje o około 25% szybciej niż wskazują na to obliczenia długości dnia dokonane na podstawie starożytnych obserwacji zaćmień.

PROBLEM

- Jeżeli przyczyną zmiany rotacji Ziemi jest tylko dyssypacja energii pływowej to z oszacowanego jej tempa (z SLR, LLR a nawet starożytnych zaćmień) wynika, że Księżyc około 1.5 mld lat temu powinien być tak blisko Ziemi, że siły pływowe Ziemi powinny go rozerwać, tymczasem wiemy, że Księżyc ma co najmniej 4 mld lat!



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Wyjaśnić to można przyjmując, że obecna dyssypacja energii podczas pływów jest znacznie większa niż była w przeszłości.

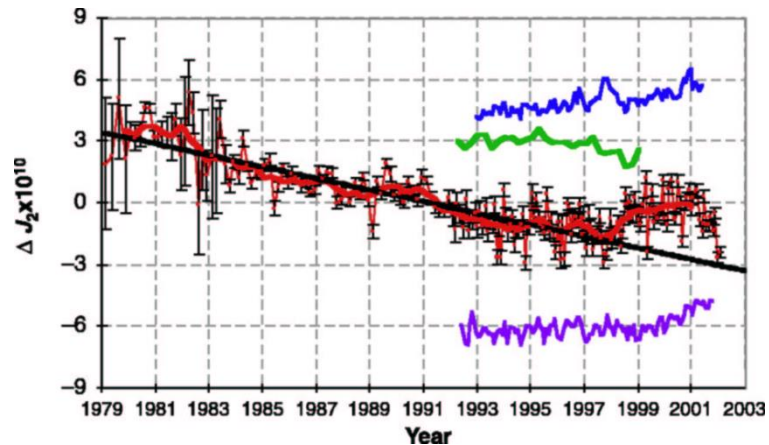
Dyssypacja zależy między innymi od kształtu dna oceanicznego, a ono zmienia się w czasie z powodu ruchu kontynentów.

- Natomiast 25% rozbieżność pomiędzy danymi z SLR, LLR a danymi z zaćmień świadczy o tym, że oprócz mechanizmu spowalniającego ruch obrotowy Ziemi istnieje jeszcze inny mechanizm, przyspieszający jej rotację.
- Tą przyczyną jest wytracanie momentu bezwładności Ziemi, głównie ze względu na topienie się czap lodowych. Moment bezwładności maleje więc Ziemia musi obracać się szybciej, aby jej moment pędu był zachowany (sytuacja podobna do łyżwiarki unoszącej ręce do góry w piruecie).



LINIOWE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Ostatni wniosek potwierdzają obserwacje satelity Lageos. Z ponad 20-letniego ciągu tych obserwacji wyznaczono zmiany wiekowe harmoniki zonalnej J_2 , proporcjonalne do momentu bezwładności Ziemi.
- Z obserwacji wynika, że $\dot{J}_2$ zmniejsza się i jest rzędu -3×10^{-11} , przy czym J_2 jest rzędu 10^{-3} .



- Zmiana momentu bezwładności związana jest z przemieszczaniem się mas wewnątrz i na powierzchni Ziemi. Głównie chodzi o przemieszczenia polarnych czap lodowych (epoka lodowcowa, polodowcowa, obecne zmiany masy biegunowych czap lodowych).



ZMIENNA PRĘDKOŚĆ ROTACJI

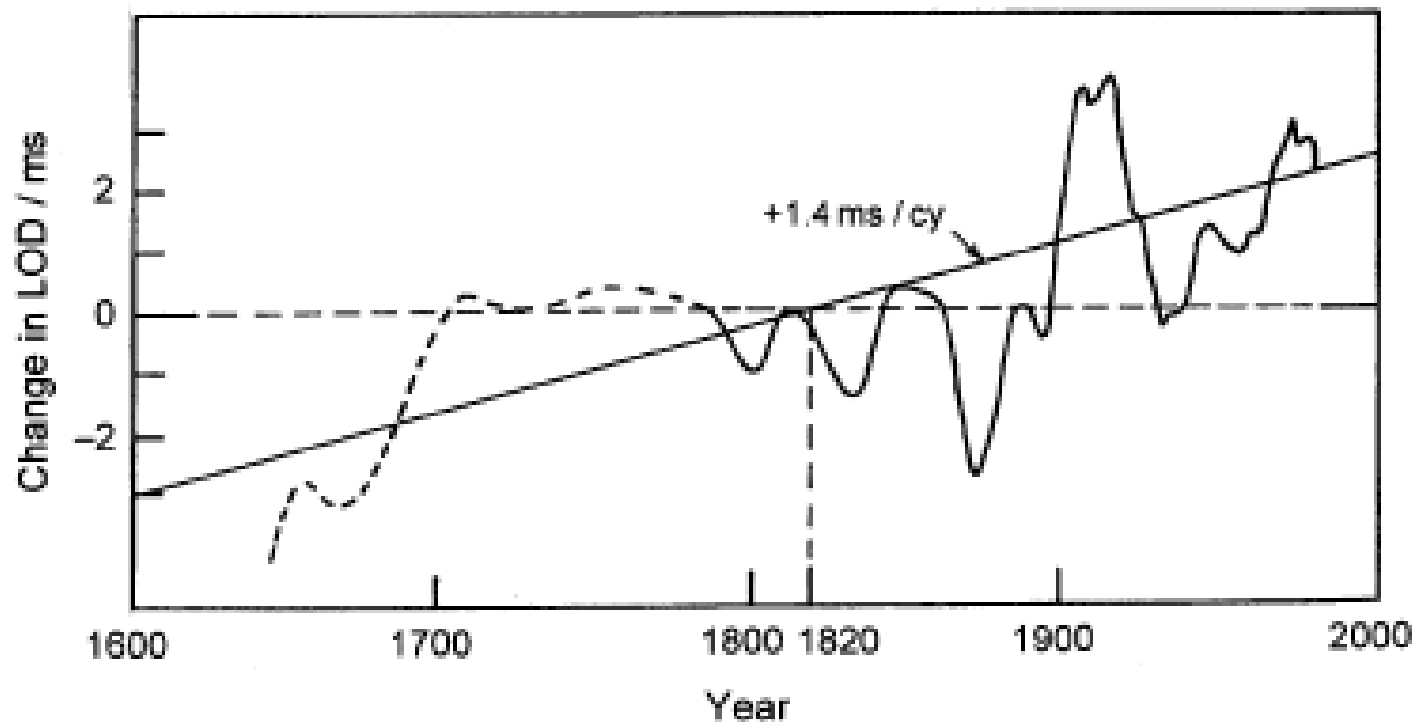


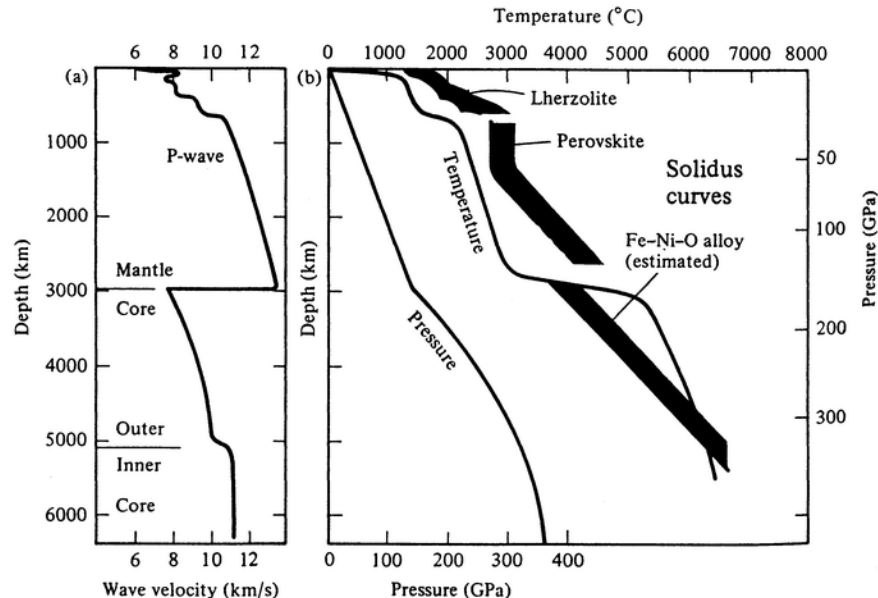
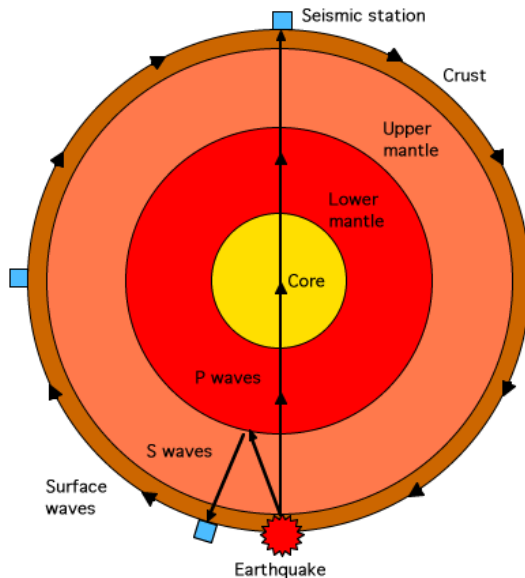
Figure 3. Change in the length of day since 1620 (after Stephenson and Morrison [25]).



WIELOLETNIE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

- Dwudziestoletnie i trzydziestoletnie zmiany długości dnia tłumaczy się przekazywaniem momentu pędu pomiędzy jądrem Ziemi i płaszczem.

Gdy jądro traci moment pędu, płaszcz go zyskuje, prędkość obrotu płaszcza zwiększa się, a tym samym dzień ulega skróceniu.



WIELOLETNIE ZMIANY DŁUGOŚCI DNIA

Wymienia się dwa zjawiska mogące być powodem tej wymiany pędów:

1. Tarcie płynnych mas jądra o ukształtowaną nierówną powierzchnię na granicy jądra i płaszcz.
2. Sprzężenie elektro-magnetyczne.

Obracająca się Ziemia wzbudza prądy elektryczne w półpłynnym jądrze, a te z kolei generują pole magnetyczne. Jeśli pole magnetyczne w jądrze zmienia się to w płaszczu, który ma cechy przewodnika, wzbudzają się prądy elektryczne. Oddziałują one zwrotnie na pole magnetyczne jądra poprzez dośrodkową siłę Lorenza $\mathbf{F} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, która z kolei powoduje dodatkową rotację płaszcz.

Oba wymienione czynniki mogą występować razem.



ZMIENNA PRĘDKOŚĆ ROTACJI

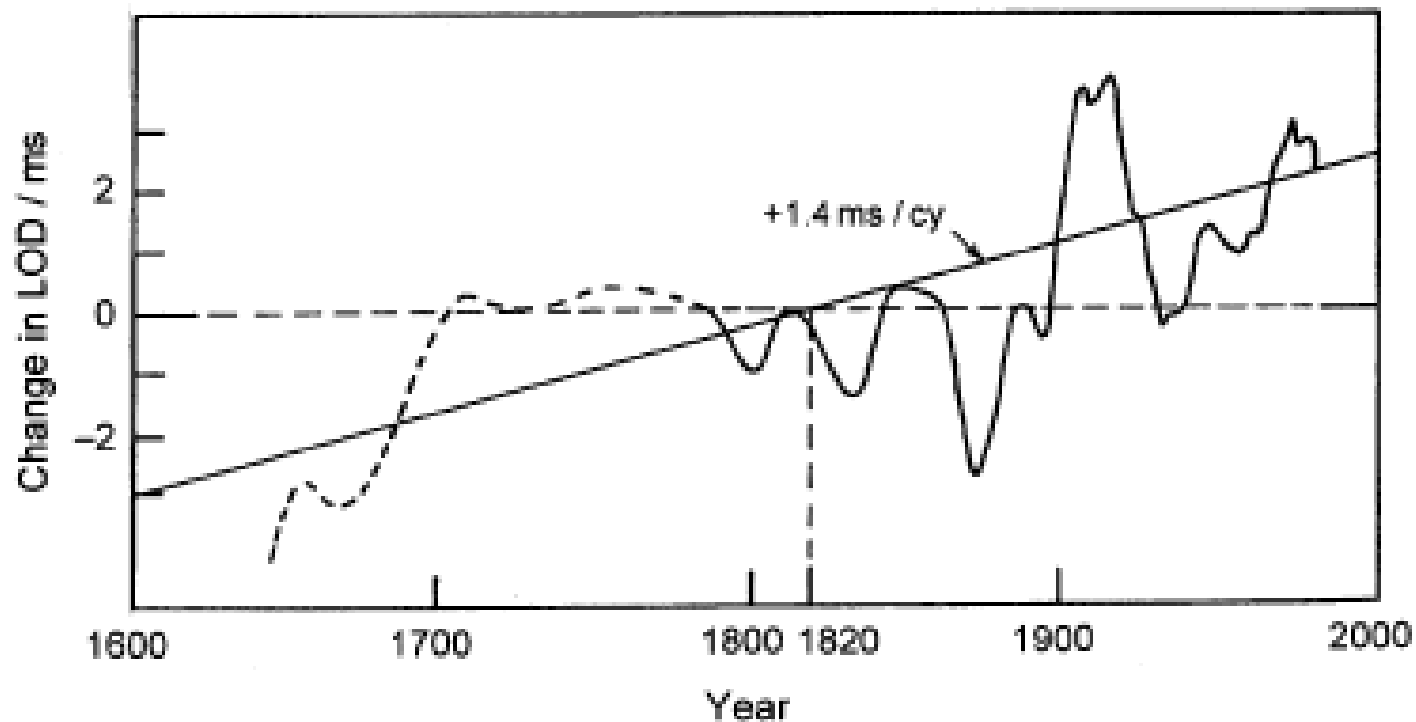
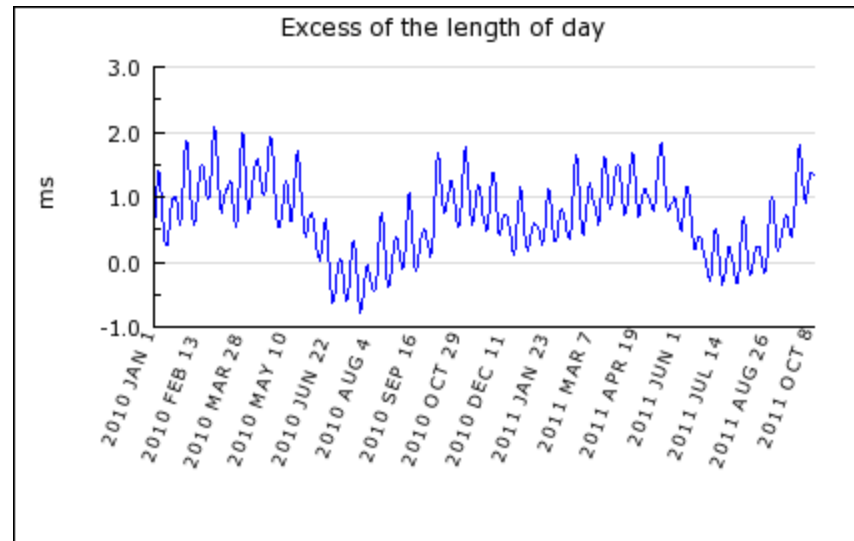


Figure 3. Change in the length of day since 1620 (after Stephenson and Morrison [25]).



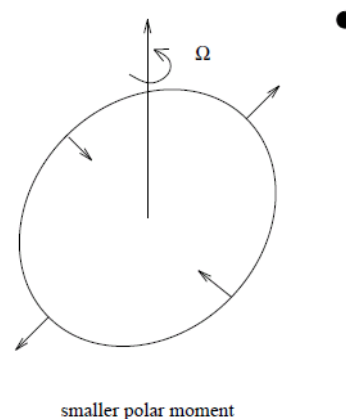
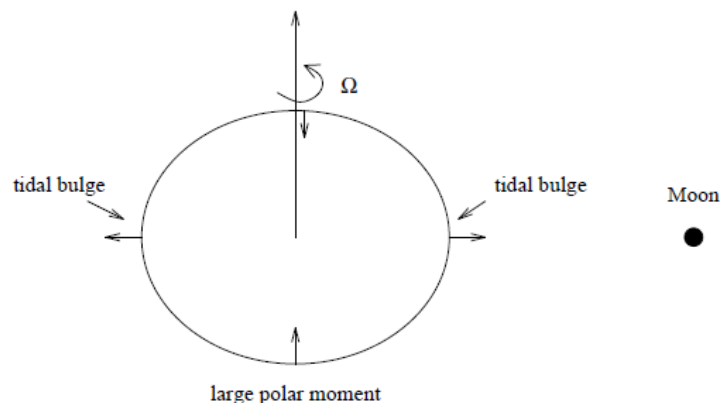
ZMIANY KRÓTKOOKRESOWE



KRÓTKOOKRESOWE ZMIANY DNIA

Krótkookresowych okresów jakie można wydzielić w wahaniach długości dnia jest wiele, od kilkuletnich do dwutygodniowych.

- Zmiany miesięczne i dwutygodniowe mają amplitudy rzędu 0.2 do 0.3 msek i spowodowane są oddziaływaniami pływowymi. Wybrzuszenie pływowe zawsze skierowane jest w stronę Księżyca i zmienia swe położenie w stosunku do równika w miarę obiegu Księżyca po orbicie. Takiej zmianie rozkładu mas towarzyszy zmiana momentu bezwładności Ziemi powodująca zmianę jej prędkości rotacji.



KRÓTKOOKRESOWE ZMIANY DNIA

- Zmiany półroczne i roczne wywołane przez
 - deformacje pływowe (ok. 10% roczne, 30% półroczne)
 - sezonowe zmiany prądów oceanicznych (5% roczne i półroczne), głównie chodzi o prąd wokół Antarktydy – gdy słabnie - ziemski moment pędu zmniejsza się (masa) co kompensowane jest wzrostem prędkości obrotu.
 - sezonowe zmiany w atmosferze – główny czynnik zmian
 - spowodowane tarciem sezonowych wiatrów o powierzchnię, szczególnie góry
 - zmianami ciśnienia atmosferycznego (zmiana ciśnienia świadczy o zmianie masy atmosfery w danym miejscu).

Z danych dotyczących wiatrów, ciśnienia atmosfery, prądów oceanicznych (po odjęciu danych pływowych) oszacowano zmiany długości dnia. Wyniki świadczą, że czynniki te odpowiedzialne są za wszystkie krótkookresowe (krótsze niż 5 lat), niepływowe zmiany długości dnia, włączając w to nieregularne fluktuacje związane z prądem El Nino.



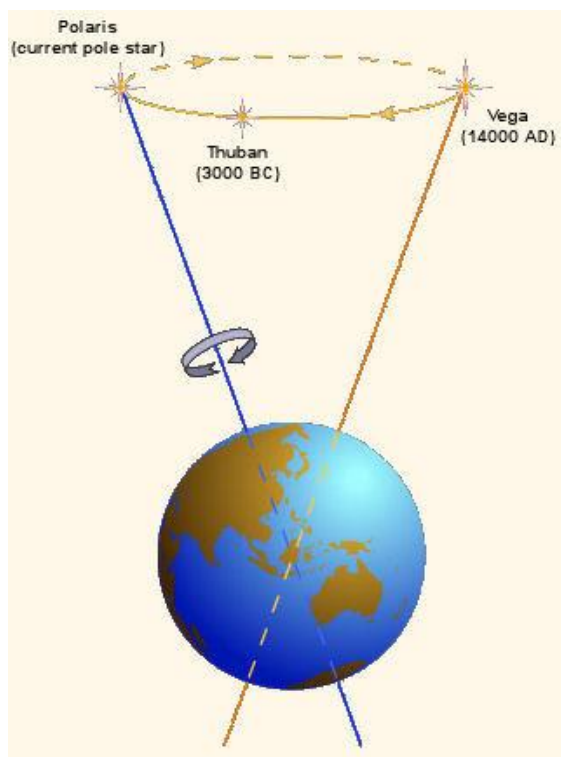
ROTACJA ZIEMI

- Niejednostajność ruchu (spowalnianie obrotu – wydłużanie długości dnia)
- Zmienność położenia osi rotacji
 - ruch względem inercjalnego układu współrzędnych (precesja, nutacja)
 - ruch względem Ziemi (wobble)



ZMIENNOŚĆ POŁOŻENIA OSI ROTACJI – PRECESJA, NUTACJA I RUCH CHWILOWY

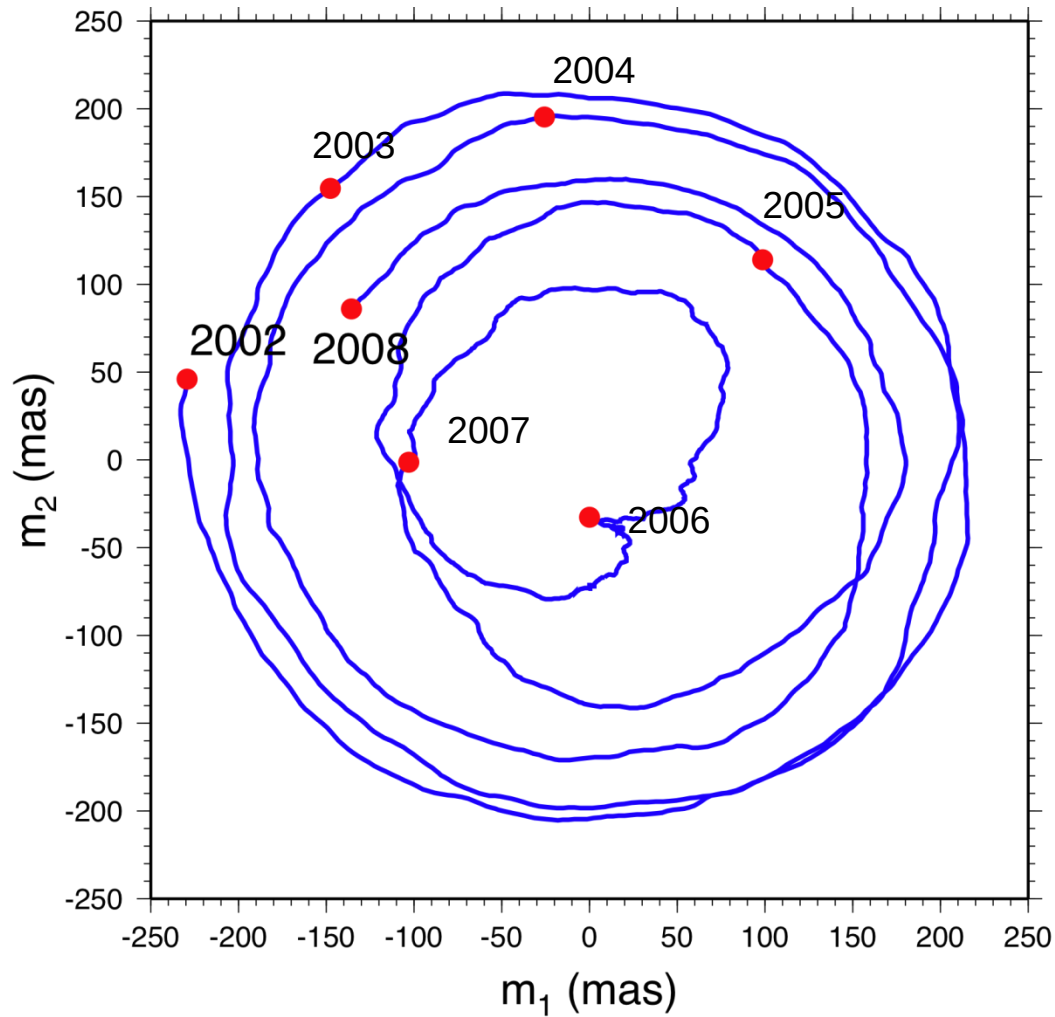
Obserwowany na niebie ruch osi rotacji na tle gwiazd składa się z precesji (biegun średni) i nutacji (biegun prawdziwy). Precesja i nutacja są jedynymi składnikami ruchu osi rotacji względem układu inercjalnego.



Wyznaczone w ten sposób położenie osi rotacji nie zajmuje na Ziemi miejsca stałego (gdyby w danej chwili wbić patyk w miejscu, przez które przechodzi wyznaczona z obserwacji oś rotacji, to w dowolnym innym momencie nie pokryje się on już z kierunkiem tej osi). Inaczej mówiąc Ziemia przesuwa się względem tak wyznaczonej osi. Ruch ten nazywamy 'wobble', czyli chwianiem się Ziemi.



WOBBLE – RUCH BIEGUNA NA POWIERZCHNI ZIEMI



RÓWNANIA EULERA

Równania Eulera

Jeżeli mamy do czynienia z ciałem sztywnym, którego główne momenty bezwładności A , B i C pokrywają się odpowiednio z osiami x , y i z , to równania Eulera opisujące ruch obrotowy tego ciała mają postać:

$$A \dot{\omega}_x + (C - B) \omega_y \omega_z = L_x$$

$$B \dot{\omega}_y + (A - C) \omega_x \omega_z = L_y$$

$$C \dot{\omega}_z + (B - A) \omega_x \omega_y = L_z$$

gdzie wektor $\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)^T$ jest momentem sił działających na to ciało.



ROZWIĄZANIE DLA BRYŁY SWOBODNEJ

Dla ciała o symetrii obrotowej ($A=B$), na które nie działają żadne siły, lub działające siły wzajemnie się znoszą, równania te upraszczają się do postaci:

$$A \dot{\omega}_x + (C - A) \omega_y \omega_z = 0$$

$$A \dot{\omega}_y + (A - C) \omega_x \omega_z = 0$$

$$\dot{\omega}_z = 0$$

A ich rozwiązanie jest następujące:

$$\omega_z = \text{const}$$

$$\omega_x = a \cos(\Omega t + \phi)$$

$$\omega_y = a \sin(\Omega t + \phi)$$

przy czym $\Omega = \omega_z \frac{C-A}{A}$.

Równanie to mówi, że nawet gdy nie działają siły zewnętrzne kierunek wektora rotacji $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ zmienia się w płaszczyźnie x, y .

Okres tej swobodnej rotacji wyznaczony dla Ziemi wynosi ok. 300 dni.



WOBBLE – CHWILOWY RUCH BIEGUNA, „CHWIANIE” SIĘ BIEGUNA

- W 1765 roku Euler badał rezonansowe oddziaływania między postępowym i rotacyjnym ruchem ciał niebieskich i przewidział, że jeśli masy Ziemi nie są rozłożone równomiernie to jej ruch rotacyjny powinien podlegać „chwianiu się” bieguna z okresem ok. 10 miesięcy.
- Po raz pierwszy ruch ten został zaobserwowany przez Amerykanina Setha Carlo Chandlera w 1891 roku i od tego czasu jest nieprzerwanie obserwowany.
- Okres zmienności ruchu Chandlerowskiego wynosił 14 miesięcy różnił się znacznie od przewidzianego przez Eulera okresu 10 miesięcy.



WOBBLE

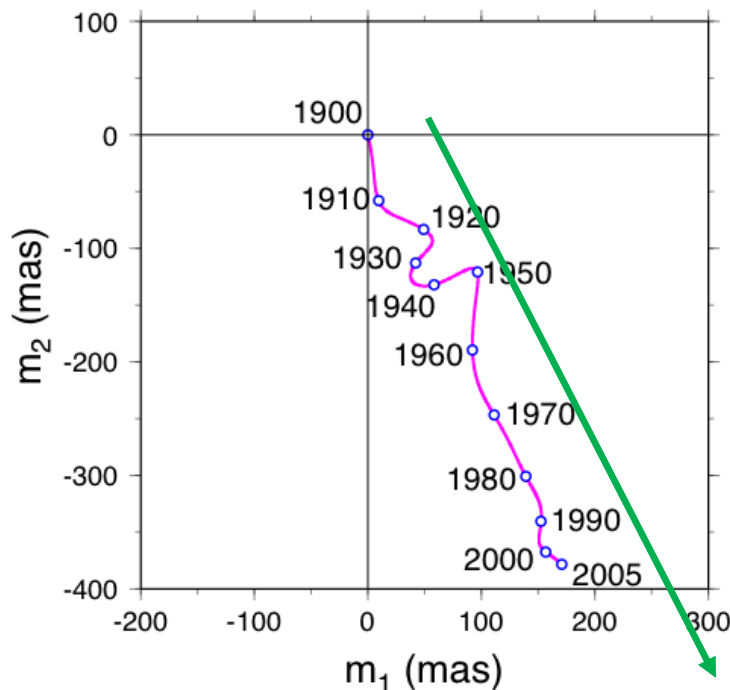
- Fluktuacje rotacji (wobble) dochodzą do 1 msek na dzień. Te niejednorodności wywołane są nierównomiernym rozkładem mas wokół jej osi rotacji.
- Chwilowy ruch osi rotacji wokół bieguna północnego Ziemi składa się z dwóch głównych ruchów okresowych:
 - ruchu rocznego o amplitudzie około 3 metrów
 - ruchu Chandlerowskiego o okresie 14 miesięcy i amplitudzie od 3 do 6m.



ZMIENNOŚĆ POŁOŻENIA OSI ROTACJI – WOBBLE

Położenie bieguna północnego w ciągu ostatnich 100 lat.

Liniowy trend przesuwania się bieguna osi obrotu w kierunku pomiędzy Grenlandią a Zatoką Hudsona, z prędkością około 3.5 mas/rok.



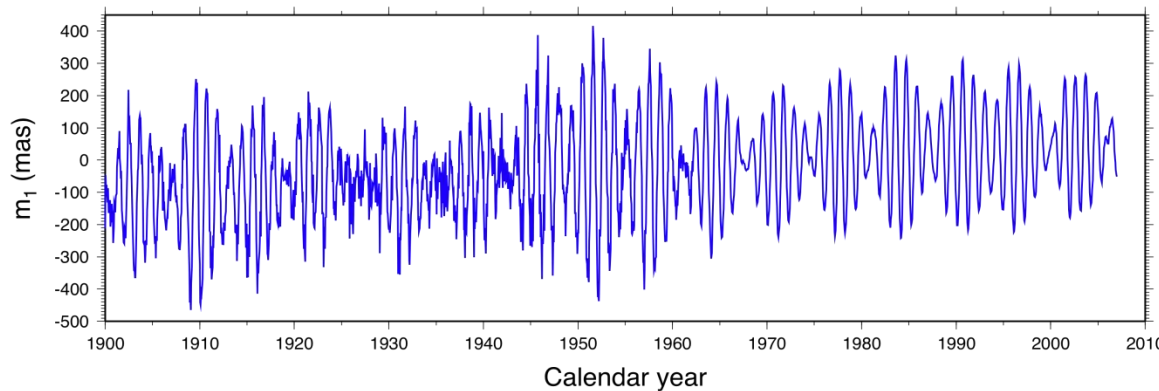
30 mas > 1 metr na powierzchni

3.5 mas/rok $\sim$ 1 stopień/ 1mln lat

Grenlandia



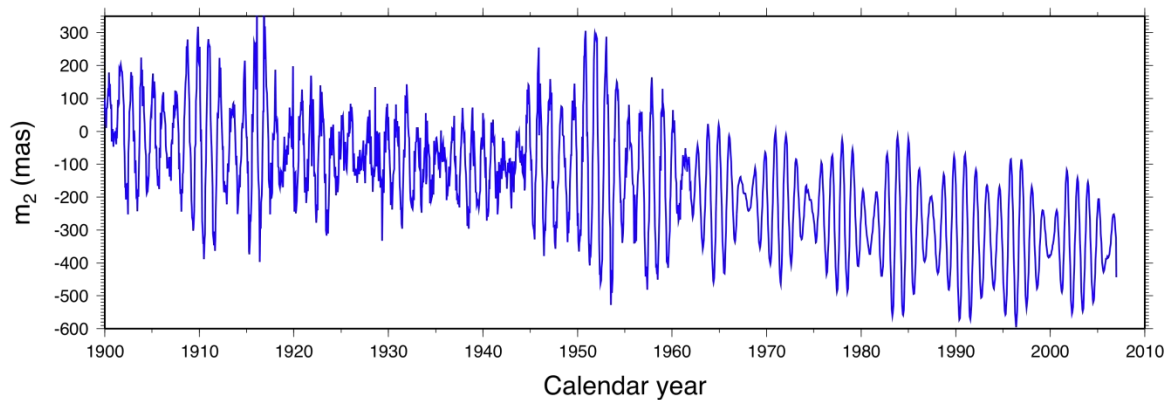
WOBBLE – RUCH BIEGUNA NA POWIERZCHNI ZIEMI



Ruch bieguna w składowych x , y w ciągu ponad 100 lat.

Przebieg charakterystyczny dla nakładających się dwóch częstotliwości:

rocznej i
Chandlerowskiej ~ 435 dni.

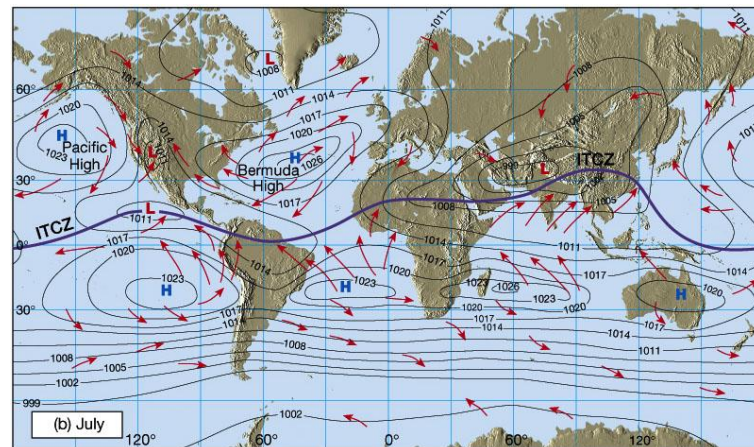
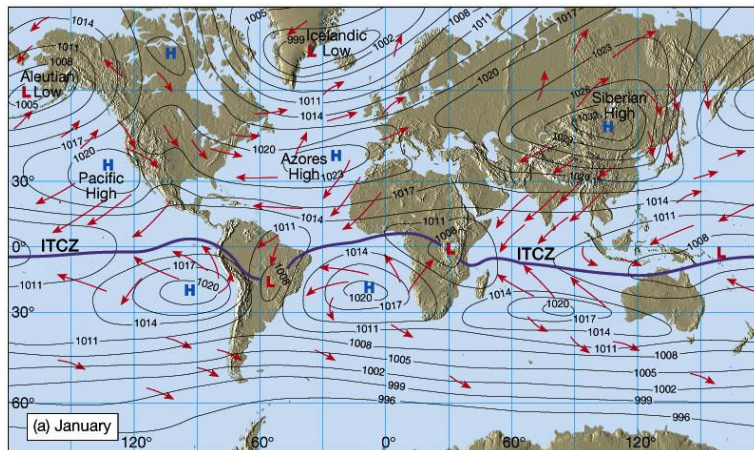


Stąd okresy wygaszania –
„zatrzymywania się”
bieguna.



ZMIANY ROCZNE

- Zmiany roczne są głównie spowodowane sezonowymi zmianami układu ciśnieniowego na obszarach Syberii. W zimie rozbudowuje się tam układ wysokiego ciśnienia, latem – niskiego. Następuje zatem sezonowa zmiana masy wpływająca na rotację Ziemi.



ZMIANY CHANDLEROWSKIE

- Mechanizm i rozbieżności między teoretycznym okresem a obserwowanym wyjaśnione zostały dopiero w ostatnich latach (R. Gross, JPL) jako powodowane zarówno przez zmiany ciśnienia atmosfery jak i (głównie) przez sezonowe zmiany ciśnienia wód na dnie oceanów.

