

Epoki lodowcowe

Joanna UDALSKA

Przyczyną zmian pór roku są okresowe zmiany średniego nasłonecznienia obszarów Ziemi, a za to z kolei odpowiedzialne jest narzucone nam przez naturę ustawienie osi ziemskiej. Gdyby oś planety była prostopadła do płaszczyzny orbity, to stałe równik byłby oświetlony prostopadle, żadnych zmian w tym względzie by nie było, a więc i pór roku. Praktycznie taka sytuacja ma miejsce np. na Jowisz. Ponieważ jednak oś ziemską od tego kierunku prostopadłego jest odchylona o $23,5^\circ$, to zenitalne promienie Słońca docierają niekiedy do zwrotnika Raka, średnio silniej nasłoneczniona jest wtedy północna półkula (dłuższe dni i bardziej stromo padające promienie Słońca) i mamy tam lato. Po wpływie pól roku oświetlenie Ziemi jest symetryczne i lato jest na półkuli południowej. Dziwaczną pod tym względem planetą jest Uran: jego oś obrotu leży w płaszczyźnie orbity, a więc tam zenitalne promienie Słońca docierają do samych biegunów.

Ale przecież odległość Ziemi od Słońca jest zmienna! Jakże to może mieć znaczenie? W ruchu po elipsie odległość od Słońca waha się od $1 - e$ do $1 + e$ jednostki astronomicznej, gdzie $e = 0,017$ jest mimośrodem orbity ziemskiej. Stosunek tych granicznych wartości podniesiony do kwadratu daje stosunek oświetleń równy 1,07. W zimie – na naszej półkuli – Ziemia jest akurat najbliższej Słońca, można zatem spodziewać się, że eliptyczność orbity spowoduje złagodzenie sezonowych kontrastów na półkuli północnej oraz ich wzrost na półkuli południowej. Czy rzeczywiście tak jest, to sprawa dość subtelna, zwłaszcza że przeciwdziała temu inne zjawisko. Mianowicie, będąc blisko Słońca Ziemia porusza się szybciej, a więc południowa jej półkula nagrzewa się co prawda silniej, ale krócej. W rezultacie dla przebiegu pór roku i tak zasadnicze znaczenie ma ustawienie osi obrotu Ziemi.

Występowanie epok lodowcowych na Ziemi zależy w głównej mierze od tego, jak ciepłe są lata na półkuli północnej. To wyróżnienie jednej z półkul wynika z nierównomiernego rozkładu łądów – właśnie na półkuli północnej jest ich znacznie więcej niż na południowej. W oceanach ciepło jest magazynowane o wiele efektywniej niż na lądzie, stąd też sezonowe wahania temperatury nie są tak drastyczne w obszarach, gdzie jest ich dużo. W dużym uproszczeniu epoka lodowcowa polega na tym, że powstały zimą lód nie zdoła stopnieć w całości, o ile lato nie jest wystarczająco gorące. Rok po roku gromadzi się go coraz więcej i obszar lodowo-śnieżnej pokrywy obejmuje coraz bardziej oddalone od bieguna obszary. Dzieje się tak na skutek znacznego ochłodzenia klimatu.

Najwcześniejsza (ze stwierdzonych do dziś) epoka lodowcowa wystąpiła około 570 mln lat temu, następna – około 280 mln lat temu, ostatnia zaś rozpoczęła się zaledwie 3 mln lat temu i, jak twierdzą niektórzy, trwa po dziś dzień. Lodowce na przemian rozwijają się i topnieją w ciągu kilkudziesięciu tysięcy lat – ostatnio stopniały zaledwie 10 000 lat temu. Choć czas występowania epok lodowcowych jest wciąż jeszcze bardzo niepewny, ich datowanie bardzo trudne, wielu uczonych zgadza się z opinią, że powtarzają się one co 250 mln lat.

Przyczyny występowania epok lodowcowych są intensywnie badane już od ponad stu lat, wciąż jednak jeszcze problem nie jest w pełni rozwiązany. Najbardziej chyba przekonującą i najpowszechniej akceptowaną jest teoria wskazująca na związek wielkoskalowych zmian klimatycznych z geometrią okołosłonecznej orbity ziemskiej i nachyleniem osi rotacji do płaszczyzny ekliptyki. Trudno zresztą się temu dziwić, wszak Słońce stanowi dla nas podstawowe źródło ciepła i właśnie zmiany w dopływie energii słonecznej muszą mieć pierwszorzędne znaczenie dla kształtowania się naszego klimatu.

Orbita ziemską jest tylko nieznacznie wydłużona – w aphelium znajdujemy się zaledwie o 1,5% dalej od Słońca niż w peryhelium. Tak się jednak składa, że akurat w peryhelium przypada zima na półkuli północnej, słowem – zimą jesteśmy najbliżej Słońca. Czy jednak tak było zawsze? Pytanie to należałoby zadać w odniesieniu do obydwu stwierdzonych powyżej faktów. Po pierwsze, czy zawsze orbita Ziemi była (i będzie) tylko nieznacznie wydłużona, po drugie, czy zawsze w czasie, gdy na półkuli północnej jest zima, Ziemia była (i będzie) w peryhelium? Odpowiedź na obydwa pytania jest negatywna. Na podstawie szczegółowych badań ruchu Ziemi stwierdzono, że kształt (eliptyczność) orbity ziemskiej zmienia się cyklicznie w okresie 93 000 lat, kierunek zaś osi obrotu w okresie 26 000 lat (zjawisko to zwane precesją niejednokrotnie było opisywane w *Delcie*). Nadmienimy jeszcze, że nachylenie osi ziemskiej również nie jest niezmiennie – waha się w granicach od $22,1^\circ$ do $24,5^\circ$ w okresie 41 000 lat.

T.K. Jak wszystkie te czynniki wpływają na nasz klimat? Wyobraźmy sobie sytuację ekstremalną:

- orbita ziemską jest maksymalnie wydłużona, różnice odległości peryhelium i aphelium od Słońca powodują znaczne nierównomierności w nagrzewaniu powierzchni Ziemi (zgodnie z obliczeniami – mogą one dochodzić do 30%),
- oś ziemską jest maksymalnie nachylona względem kierunku prostopadłego do ekliptyki, sezonowe zmiany temperatury są więc największe,
- dodatkowo, Ziemia znajduje się w peryhelium w czasie, gdy na półkuli północnej panuje zima.

Wszystkie trzy czynniki kumulują się sprzyjając występowaniu chłodnego lata na naszej półkuli. Właśnie latem Ziemia jest istotnie dalej od Słońca i w dodatku duże nachylenie osi powoduje, że Słońce wznosi się stosunkowo nisko nad horyzont. Klimat ochładza się, są to więc warunki sprzyjające występowaniu epoki lodowcowej. Wciąż jeszcze nie udało się stwierdzić, który z czynników odgrywa rolę dominującą, stąd, choć teoria wydaje się przekonująca, nie jest pełna.

Rozwiązanie zadania F 828. Niech R oznacza promień lokalnej krzywizny stołu, r – promień kulki, m zaś jej masę. Składowa siły ciężkości styczna do blatu w przypadku małych drgań wynosi

$$mg \sin \alpha \approx mg \frac{x}{R-r} \approx mg \frac{x}{R}.$$

Pisząc równanie drugiej zasady dynamiki ruchu postępowego oraz zasadę dynamiki ruchu obrotowego mamy

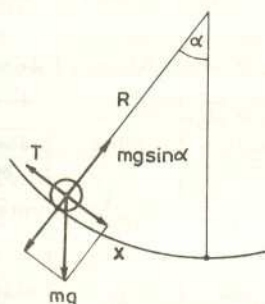
$$\begin{cases} mg \frac{x}{R} - T = ma \\ T \cdot r = I \frac{a}{r}, \end{cases}$$

gdzie a jest prędkością kulki, $I = \frac{2}{5}mr^2$ jej momentem bezwładności, T zaś siłą tarcia. Z powyższych równań wyznaczamy

$$ma = \frac{5}{7}mg \frac{x}{R}.$$

Kulka wykonuje drgania harmoniczne, $ma = m\omega^2 x$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, stąd ostatecznie otrzymujemy

$$R = \frac{5}{7} \frac{g}{4\pi^2} \cdot T^2 \approx 71 \text{ cm}.$$



Istnieją zresztą jeszcze inne hipotezy, które co prawda nie są tak powszechnie akceptowane, wydają się jednak również bardzo interesujące. Zgodnie z jedną z nich powodem występowania epok lodowcowych może być wzmożona aktywność wulkaniczna na Ziemi. Gazy i popiół wyrzucone z wulkanów mogą istotnie zmniejszać przezroczystość atmosfery, a tym samym utrudniać docieranie energii promienistej Słońca. Okresowe ochładzanie klimatu może być również związane z docieraniem Słońca (wraz z całym Układem Słonecznym) do obszaru ramienia spiralnego Galaktyki, a więc do obszaru o podwyższonej gęstości gazu i pyłu. Mechanizm oziębiania klimatu jest w tym przypadku podobny do wspomnianego przy okazji hipotezy wulkanicznej – zanieczyszczona atmosfera ziemską osłabia znacznie docierające do nas promieniowanie słoneczne. Z dość ogólnych rozważań na temat dynamiki naszej Galaktyki wynika, że Słońce obiega jej centrum z prędkością kątową $\omega_{\odot} = 8 \cdot 10^{-16}/s$, natomiast jej struktura spiralna obraca się sztywno z prędkością $\Omega_p = 4 \cdot 10^{-16}/s$. Ponieważ prawdopodobnie ramiona spiralne są dwa, to częstość, z jaką je Słońce spotyka, wynosi $(\omega_{\odot} - \Omega_p)/\pi = 1,27 \cdot 10^{-16}/s$, a więc okres między dwoma kolejnymi przejściami przez ramię powinien wynosić 250 mln lat, co zgadza się ze wspomnianym na wstępie okresem rozdzielającym występowanie ziemskich epok lodowcowych. Wydaje się, że obecnie znajdujemy się blisko wewnętrznej krawędzi jednego ramienia. Oznaczałoby to, że niecałe 250 mln lat temu Układ Słoneczny przechodził przez ramię spiralne po raz ostatni. To już nie bardzo odpowiada datowaniu przedostatniej epoki lodowcowej. W ogóle sprawa jest dużo bardziej zawiła, gdyż struktura Galaktyki w pobliżu Słońca jest mocno skomplikowana i nie jest łatwo określić położenie Słońca względem ramienia; nie wiadomo w gruncie rzeczy, ile tych ramion jest. W rezultacie całe zagadnienie jest na razie raczej wdzięcznym polem do spekulacji niż do ścisłych naukowych rozważań.

Tak więc pierwsza z wymienionych hipotez wydaje się najściślejsza i jest preferowana wśród naukowców. Zbyt pochopnym byłoby jednak odrzucanie pozostałych – jest całkiem prawdopodobne, że wszystkie czynniki mają wpływ na kształtowanie klimatu ziemskiego, pozostaje tylko pytanie, który z nich jest czynnikiem dominującym.

Jak mierzono Ziemię w starożytności

Już w starożytności zdawano sobie sprawę z faktu, że Ziemia jest kulista. Główną przyczyną, dla której tak sądzono, był odmienny wygląd nieba obserwowanego z różnych miejsc na Ziemi. Ponadto przemawiało za tym to, że podczas zaćmień Księżyca cień na Księżycu ma kształt kolisty. Do tych argumentów Arystoteles dodał jeszcze dwa o charakterze raczej filozoficznym, a mianowicie: tym, co miało przemawiać za kulistością Ziemi, była symetria i równowaga.

Różnice w wyglądzie nieba posłużyły Posidoniusowi i Eratostenesowi do oszacowania rozmiarów Ziemi. Posidonius założył,

że Aleksandria i Rodos znajdują się na tym samym południku, ich odległość zaś oszacował na 5000 stadionów. Stwierdził, że gwiazda Canopus, obserwowana z Rodos, dochodzi zaledwie do horyzontu, obserwowana zaś z Aleksandrii w punkcie kulminacyjnym znajduje się na wysokości będącej $1/48$ częścią kąta pełnego. Stąd oszacował on obwód Ziemi na $48 \cdot 5000 = 240\,000$ stadionów. Podobnie Eratostenes porównując położenie Słońca podczas letniego przesilenia, obserwowanego z różnych miast, oszacował obwód Ziemi na 252 000 stadionów.

Jest jednak problem ze sprawdzeniem dokładności tych obliczeń, bowiem długość stadionu nie była dokładnie ustalona i rozbieżności są tutaj bardzo duże. I tak np. długość stadionu olimpijskiego wynosiła 192,27 m, stadionu zaś pytyjskiego tylko 177,35 m. Podstawiając długość stadionu olimpijskiego do obliczeń Posidoniusa otrzymamy w przybliżeniu 46.000 km, co daje dosyć dobre przybliżenie.

Piotr HAJŁASZ

Rozwiązanie zadania M 618.

Kładziemy $x_n = 4\{n\sqrt{2}\}$ (symbol $\{x\} = x - |x|$ oznacza część ułamkową liczby x). Jeżeli p i q są takimi liczbami naturalnymi, że $p < (4 - \sqrt{2})q$, to

$$(*) \quad \left| \sqrt{2} - \frac{p}{q} \right| = \frac{|2q^2 - p^2|}{q(q\sqrt{2} + p)} > \frac{1}{4q^2}$$

(skorzystaliśmy z niewymierności $\sqrt{2}$).

Korzystając z (*) mamy dla $m > n \geq 1$

$$\begin{aligned} & |4\{m\sqrt{2}\} - 4\{n\sqrt{2}\}| = \\ & = 4|(m-n)\sqrt{2} - (\{m\sqrt{2}\} - \{n\sqrt{2}\})| = \\ & = 4(m-n) \left| \sqrt{2} - \frac{\{m\sqrt{2}\} - \{n\sqrt{2}\}}{(m-n)} \right| \geq \\ & \geq \frac{1}{m-n}. \end{aligned}$$

Mogliśmy skorzystać z(*), albowiem:

$$\begin{aligned} & |\{m\sqrt{2}\} - \{n\sqrt{2}\}| < m\sqrt{2} - n\sqrt{2} + 1 \leq \\ & \leq (m-n)(\sqrt{2} + 1) < (4 - \sqrt{2})(m-n). \end{aligned}$$