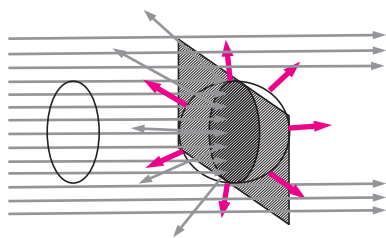


Globalne ocieplenie okiem fizyka

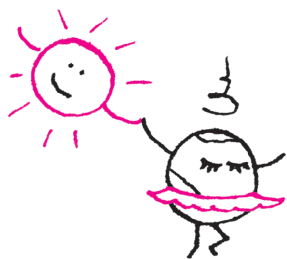
Szymon MALINOWSKI*



Strumieniem energii nazywamy ilość energii przechodzącej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do niej.



Rys. 1. Bilans radiacyjny powierzchni Ziemi. Szare strzałki to promieniowanie słoneczne padające na powierzchnię równą przekrojowi planety, częściowo pochłonięte i częściowo odbite przez planetę. Kolorowe strzałki to promieniowanie termiczne planety emitowane z całej jej powierzchni.



Żeby zrozumieć przeszłe i aktualnie obserwowane zmiany klimatu, spróbujemy spojrzeć na naszą planetę okiem fizyka i poznać podstawowe mechanizmy fizyczne, które rządzą przepływami w atmosferze i oceanie. Takie spojrzenie, nieco inne niż nasze codzienne myślenie o pogodzie w najbliższym otoczeniu, chłodne, ale precyzyjne, pozwoli nam zrozumieć niektóre zależności w świecie przyrody. Samo określenie „globalne ocieplenie” podsuwa myśl, od jakich zjawisk fizycznych musimy rozpocząć poszukiwania. Punktem startowym jest analiza przepływów energii i przegląd zbiorników ciepła w tzw. układzie klimatycznym, czyli tak naprawdę w cienkiej zewnętrznej warstwie naszej planety obejmującej atmosferę, hydrosferę, powierzchnię gruntu i biosferę.

Głównym źródłem energii „zasilającej” układ klimatyczny jest Słońce. Reakcje termojądrowe, przede wszystkim zamiana wodoru w hel, zachodzące we wnętrzu Słońca ogrzewają naszą gwiazdę tak, że jej zewnętrzne warstwy osiągną temperaturę około 5800 K i emitują promieniowanie. Prawo Stefana–Boltzmannia mówi, że każde ciało o temperaturze większej niż 0 K emituje promieniowanie elektromagnetyczne, a strumień energii Φ tego promieniowania wyraża się wzorem

$$\Phi = \sigma T^4,$$

gdzie σ jest stałą Stefana–Boltzmannia, równą około $5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$. Takie promieniowanie nazywamy promieniowaniem termicznym, a promieniowanie słoneczne jest jego bardzo dobrym przykładem. Prawa Wiena i Plancka mówią szczegółowo o długościach fal tego promieniowania, tym krótszych, im wyższa jest temperatura emisyjna źródła. Ponieważ temperatura Słońca jest wysoka, mówiąc o promieniowaniu słonecznym w języku fizyki atmosfery, często używamy sformułowania „promieniowanie krótkofalowe”.

Temperatura efektywna. Strumień energii promieniowania krótkofalowego Słońca docierający do orbity Ziemi nazywa się *stałą słoneczną*. Część promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię Ziemi jest absorbowana, a część odbijana w kosmos. Stosunek energii odbitej do przychodzącej to tzw. *albedo planetarne*. Energia promieniowania słonecznego zaabsorbowanego na powierzchni Ziemi gromadzi się w układzie klimatycznym. Wzrost energii wewnętrznej układu klimatycznego powoduje wzrost temperatury powierzchniowych warstw planety aż do momentu, w którym emisja promieniowania termicznego zrównoważy absorpcję energii. Ustala się wtedy stan równowagi układu klimatycznego, zależny od tego, jaki strumień energii słonecznej dociera do orbity Ziemi oraz jaką część docierającej do niej energii Ziemia pochłania, a jaką odbija. Na drodze promieniowania słonecznego Ziemia stanowi przeszkodę o powierzchni πR^2 , gdzie R to promień Ziemi. Przy strumieniu energii słonecznej S całkowita energia słoneczna docierająca do powierzchni Ziemi wyniesie $\pi R^2 S$, z czego przy albedo A powierzchnia Ziemi pochłonie moc

$$P_s = (1 - A)\pi R^2 S.$$

Ponieważ Ziemia obraca się i w cyklu dobowym oświetlana jest cała jej powierzchnia, a dodatkowo cyrkulacje atmosferyczne i oceaniczne wyrównują temperaturę planety, promieniowanie termiczne emitowane jest z całej powierzchni kuli ziemskiej, która wynosi $4\pi R^2$. Przyjmijmy (jest to niezłe przybliżenie), że Ziemia emituje jak ciało doskonale czarne. Zgodnie z prawem Stefana–Boltzmannia planeta o temperaturze emisyjnej T_e wypromieniowuje w kosmos moc

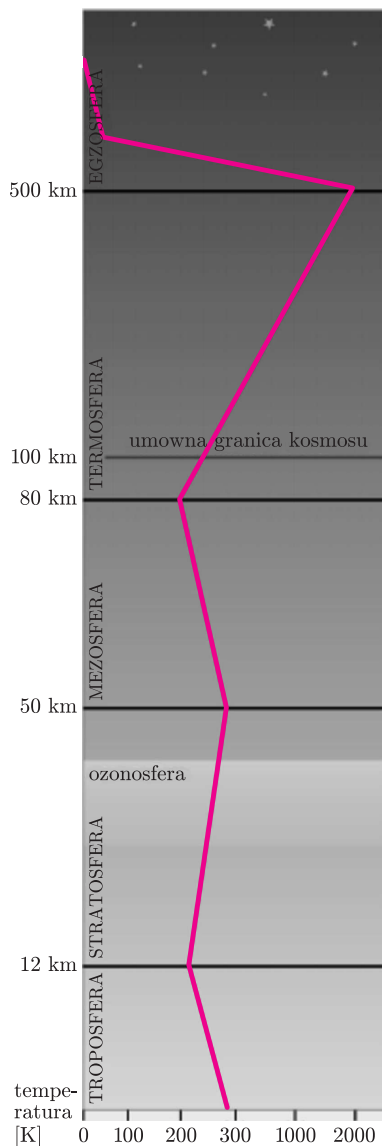
$$P_p = 4\pi R^2 \sigma T_e^4.$$

W stanie równowagi moc pochłanianego promieniowania słonecznego P_s równoważona jest emisją promieniowania termicznego o mocy P_p , skąd łatwo obliczyć, że temperatura emisyjna planety wynosi

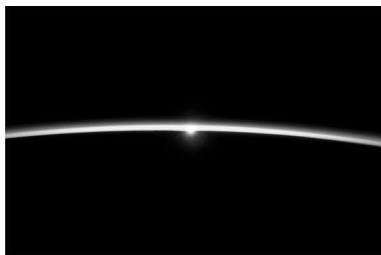
$$T_e = \sqrt[4]{\frac{(1 - A)S}{4\sigma}}.$$

Podstawiając wartość stałej słonecznej $S = 1362 \pm 1 \text{ W}/\text{m}^2$ oraz albedo Ziemi $A = 0,3$, dostajemy $T_e = 254,62 \pm 0,05 \text{ K}$. Innymi słowy, patrząc z kosmosu,

*Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego



Rys. 2. Pionowy podział atmosfery z zaznaczeniem temperatur.
Źródło: Wikipedia.



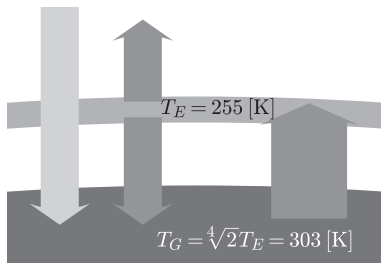
Na fotografii wschodu Słońca wykonanej z promu kosmicznego widać, jak cienka jest atmosfera – jasna warstwa rozpraszająca promieniowanie słoneczne.
Źródło: NASA.

widzimy naszą planetę jako chłodną, o temperaturze nieco mniejszej od -18°C , podczas gdy średnia temperatura na powierzchni Ziemi jest o ponad 33°C wyższa niż T_e . Skąd bierze się ta różnica? Odpowiada za nią cienka i zwiewna otoczka gazowa otaczająca powierzchnię planety – atmosfera ziemiska.

Efekt cieplarniany. Ilustracje w wielu podręcznikach pokazują grubą powłokę podzieloną na warstwy: troposferę, stratosferę, mezosferę i termosferę, która przechodzi w przestrzeń kosmiczną na wysokości 2–3 tysięcy kilometrów – odległości takiej jak połowa promienia naszej planety. Logarytmiczna skala wysokości używana na ilustracjach sztucznie rozciąga troposferę i stratosferę, co nie pozostaje bez wpływu na naszą percepcję. Lepszy obraz atmosfery jest taki: w termosferze prawie nie ma materii, znakomita większość obiektów, które wysłaliśmy w kosmos, dalej nie dotarła. Lądowanie kapsuły z kosmonautami zaczyna się na granicy termosfery, na wysokości około 100 km. Jeśli przyjmiemy tę warstwę za górną granicę atmosfery, to grubość jej w stosunku do promienia Ziemi (około 6370 km) jest mniejsza niż grubość skórki jabłka w stosunku do miąższu. Pasażerski samolot na wysokości przelotowej rzędu 10 kilometrów ma pod sobą około 80% masy atmosfery. A gdyby powietrze sprężyć do takiej gęstości, jaką ma woda, grubość atmosfery wynosiłaby zaledwie 10 metrów. Miałyby ona wtedy objętość niemal 300 razy mniejszą niż objętość wody w oceanie światowym (średnia głębokość to około 4 km, pokrywa on około 70% powierzchni globu), a nawet mniejszą niż ilość wody zawartej w lodolodach Antarktydy i Grenlandii (która odpowiada warstwie wody o grubości 70 m pokrywającej całą planetę). Żeby sobie uzmysłowić, jak bardzo ta cienka warstwa powietrza nad naszymi głowami wpływa na warunki panujące na powierzchni Ziemi, wystarczy spojrzeć na Księżyc, który średnio otrzymuje od Słońca tyle samo energii na jednostkę powierzchni co nasza planeta i niemal całą ją absorbuje (średnie albedo około 0,12). Główną cechą atmosfery, która nas tu interesuje, jest fakt, że jest ona niemal przezroczysta dla promieniowania krótkofalowego (słonecznego) i niemal nieprzezroczysta dla emitowanego przez powierzchnię Ziemi i atmosferę promieniowania termicznego, odpowiadającego temperaturom w zakresie 200–350 K. Za tę ostatnią cechę odpowiadają tzw. gazy cieplarniane (para wodna, CO_2 , CH_4 i inne), których w atmosferze jest niewiele. Niewiele, co nie znaczy, że ich efekt jest niewielki. Utrudniają one ucieczkę promieniowania długofalowego w kosmos, a samo zjawisko nazywa się „efektem cieplarnianym”. Nazwę tę nadał, badając bilans energetyczny naszej planety, francuski fizyk Joseph Fourier w roku 1824.

Efekt cieplarniany można zilustrować prostym modelem, tzw. modelem szyby (rys. 3). Atmosferę planety zastąpmy warstwą materiału przezroczystego dla promieniowania słonecznego i absorbującego 100% promieniowania termicznego z powierzchni planety. Warstwa po zaabsorbowaniu promieniowania termicznego wyemitowanego z powierzchni ogrzewa się i emituje promieniowanie termiczne w równych proporcjach w kosmos i do powierzchni gruntu. W warunkach równowagi emisja w kosmos równoważy strumień energii od Słońca, a do powierzchni Ziemi dociera dodatkowo strumień promieniowania termicznego atmosfery (tzw. promieniowanie zwrotne), co w efekcie podnosi temperaturę powierzchni gruntu.

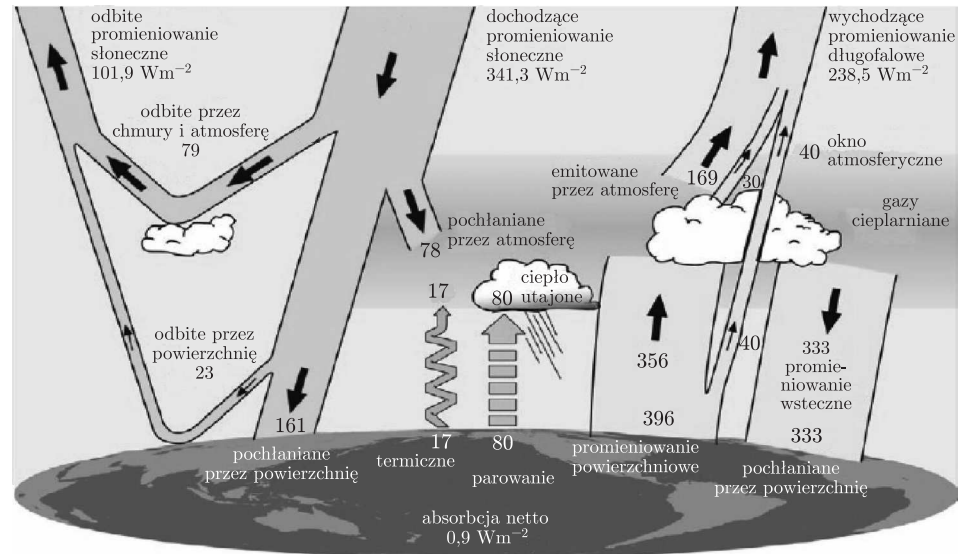
O ile szczegóły fizyczne efektu cieplarnianego są bardzo skomplikowane, a prosty model powyżej stanowi jedynie ilustrację jego niektórych cech, konsekwencje efektu cieplarnianego można przedstawić za pomocą łatwej do zrozumienia analogii. Wyobraźmy sobie dom (układ klimatyczny) z dostawą ciepła z elektrociepłowni (Słońce). Przy stałych warunkach na zewnątrz budynku w jego wnętrzu po pewnym czasie ustali się pewna temperatura: dopływ energii będzie równoważony ucieczką ciepła przez ściany. Wtedy dom okrywamy izolacją (atmosfera z gazami cieplarnianymi) pozwalającą zatrzymać energię wewnątrz budynku. Temperatura wnętrza i ścian wzrośnie. W efekcie będzie rosła ucieczka ciepła, aż do momentu ustalenia się nowego stanu równowagi – teraz już przy cieplejszym wnętrzu budynku. W tym nowym stanie ucieczka ciepła



Rys. 3. Schematyczne przedstawienie efektu cieplarnianego za pomocą „modelu szyby”. Obserwator w kosmosie widzi dwa strumienie energii: pochłanianego przez planetę promieniowania słonecznego oraz emitowanego przez nią promieniowania podczerwonego. W stanie równowagi wartości obydwu strumieni są takie same. Obserwator na powierzchni planety obserwuje strumień promieniowania słonecznego oraz strumień promieniowania termicznego atmosfery docierające do powierzchni Ziemi i równoważący je strumień promieniowania podczerwonego emitowanego z jej powierzchni.

na zewnątrz będzie znowu równoważyć dopływ ciepła do budynku, a zatem obserwator zewnętrzny nie zauważy różnicy między stanem domu po ociepleniu, odczuwają ją natomiast przebywający wewnątrz mieszkańcy.

Bilans energii Ziemi. Do tej pory zajmowaliśmy się tylko przepływami energii promieniowania wewnątrz układu klimatycznego. Nie jest to jedyny sposób, w jaki powierzchnia gruntu i ocean wymieniają energię z atmosferą. Istotne jest jeszcze bezpośrednie ogrzewanie powietrza od powierzchni gruntu czy oceanu (przewodnictwo ciepłe) oraz efekty wymiany ciepła utajonego: woda, parując z powierzchni oceanu, gleby czy roślin, zabiera ciepło przemiany fazowej (wody w parę), które oddaje podczas kondensacji pary wodnej w chmurach. Gdy woda wypadnie z chmur na ziemię w postaci opadu, ciepło kondensacji zostaje w atmosferze.

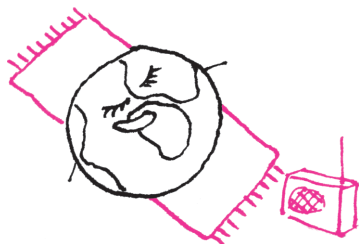


Rys. 4. Uśrednione (po całej powierzchni Ziemi i kilku latach) strumienie energii układu powierzchnia Ziemi-atmosfera-przestrzeń kosmiczna wyznaczone na podstawie danych satelitarnych z okresu III 2000–V 2004 z wykorzystaniem GCM (ang. *Global Climate Model*, Globalny Model Klimatu). Bilans pokazuje, że układ klimatyczny nie był w tym czasie w stanie równowagi, emisja energii w kosmos była średnio mniejsza o $0,9 \text{ W/m}^2$ niż absorpcja energii promieniowania słonecznego. Za: K.E. Trenberth, J.T. Fasullo, J. Kiehl, *Earth's Global Energy Budget*, Bull. Amer. Meteor. Soc. 90 (2009), 311–323.



Wymianę energii między powierzchnią naszej planety, atmosferą oraz przestrzenią kosmiczną przedstawia rysunek 4. Zilustrowano na nim uśredniony po kilku latach i całej powierzchni naszej planety bilans energii na jednostkę powierzchni (W/m^2). Liczby podane na tym diagramie przykuwają uwagę. Strumień energii promieniowania podczerwonego atmosfery dochodzącego do powierzchni Ziemi (efekt cieplarniany) jest dwukrotnie większy niż strumień energii światła słonecznego! Ponadto strumienie energii przenoszone do atmosfery przez cykl hydrologiczny są około czterokrotnie mniejsze niż wymiana energii przez promieniowanie w podczerwieni i jednocześnie mniej więcej czterokrotnie większe niż bezpośrednie ogrzewanie się powietrza od podłoża! Oznacza to, że 1% zmiany w strumieniach radiacyjnych w podczerwieni ma taki wpływ na transfery energii jak 20% zmiany w strumieniach ciepła odczuwalnego.

Dalsza uważna analiza diagramu pokazuje ogromną rolę wody w wielu kluczowych ogniwach całego bilansu energetycznego. Kondensacja pary wodnej prowadzi do powstawania chmur, których obecność reguluje dopływ energii do układu. Chmury, zarówno wodne, jak i lodowe, efektywnie odbijają promieniowanie słoneczne w kosmos, więc ich obecność i własności wpływają na albedo planety. Chmury uczestniczą także w efekcie cieplarnianym, gdyż składają się z wody, która absorbuje w podczerwieni, a jednocześnie są znacznie mniej przezroczyste dla promieniowania podczerwonego niż para wodna (mówimy, że mają dużą grubość optyczną). Fakt, że procesy kondensacji i parowania efektywnie



dostarczają ciepło z powierzchni Ziemi do atmosfery, ma jeszcze jedną niezwykle ważną cechę. Cykl hydrologiczny to wielka maszyna parowa, która działa w naszej atmosferze i efektywnie napędza cyrkulacje mas powietrza i wód w głębi oceanów, które redystrybuują energię w układzie klimatycznym, a profil temperatury w troposferze związany jest z tym, jak współgrają procesy transferu radiacyjnego i konwekcji chmurowej (równowaga radiacyjno-konwekcyjna).

Przedstawiony na rysunku 4 bilans energii, wynikający ze zmierzonych satelitarnie i obliczonych numerycznie wartości strumieni, ujawnia niepokojącą informację. Układ klimatyczny nie jest w stanie równowagi termodynamicznej: każdy metr kwadratowy naszej planety w każdej sekundzie akumuluje 0,9 J energii. Jak duża jest to wartość, można zrozumieć, porównując ją, na przykład, ze strumieniem ciepła geotermalnego, który wynosi około $0,09 \text{ W/m}^2$, czy „bezpośrednim” ogrzewaniem atmosfery przez człowieka: $0,028 \text{ W/m}^2$. Widać, że sytuacja naszej planety przypomina dom w trakcie okładania izolacją. I tak właśnie jest – potrafimy na wiele różnych sposobów pokazać, że nierównowaga radiacyjna, którą obserwujemy, jest spowodowana wzmocnieniem efektu cieplarnianego wskutek przyrostu koncentracji gazów cieplarnianych w atmosferze. Można także stwierdzić – przy użyciu fizyki jądrowej i analizy składu izotopowego dwutlenku węgla w atmosferze i paliwach kopalnych – że ten wzrost koncentracji gazów cieplarnianych jest efektem spalania paliw kopalnych. Ale to już temat na osobny artykuł.

Obraz przedstawiony w tym artykule jest bardzo uproszczony, pomija wiele zjawisk i oddziaływań w układzie klimatycznym; uproszczenia te nie wpływają jednak na najważniejszy wniosek opisywanej analizy: bilans energii globu to najważniejszy czynnik odpowiedzialny za klimat, a jego ostatnie zaburzenie odpowiada za globalne ocieplenie. Czytelników pragnących zapoznać się bardziej szczegółowo z tym, jak wygląda fizyka procesów klimatycznych oraz co nauki przyrodnicze mówią o aktualnych, przeszłych i możliwych przyszłych zmianach klimatu, zapraszam do portalu popularnonaukowego naukaoklimacie.pl.



Rozwiązanie zadania F 852.

W wyniku spalania węgla w reakcji $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ nie zmienia się liczba moli gazu w pomieszczeniu, zostanie on jednak ogrzany do wysokiej temperatury. Dla cząsteczek liniowych, takich jak N_2 , O_2 , CO_2 , ciepło właściwe w stałej objętości wynosi $\frac{5}{2}R$, gdzie $R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ jest stałą gazową. Energia wewnętrzna N moli gazu jest zatem równa $U = \frac{5}{2}NRT$. Bilans energii można zatem zapisać jako:

$$\frac{5}{2}NRT_k = \frac{5}{2}NRT_0 + 0,21NQ,$$

gdzie T_k jest temperaturą końcową. Stąd $T_k = T_0 + 0,084 Q/R \approx 4400 \text{ K}$. Zaniedbaliśmy tu fakt, że w wysokich temperaturach poza stopniami swobody ruchu postępowego i rotacyjnego cząsteczek gazu wzbudzone są także ich oscylacje, co prowadzi do zwiększenia liczby stopni swobody: z 5 do 6 dla cząsteczek N_2 i z 5 do 9 dla cząsteczek CO_2 . Uwzględnienie tego faktu w bilansie energii zmniejszy oszacowanie T_k o około 25%. Wysokość warstwy pyłu to (S jest powierzchnią podłogi):

$$h = \frac{1}{S} \cdot \frac{0,5 \text{ dm}^3}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{12 \text{ g}}{\text{mol}} \cdot \frac{0,21 SH}{22,4 \text{ dm}^3/\text{mol}},$$

skąd otrzymujemy $h \approx 5 \cdot 10^{-5} H$, czyli około 0,1 mm.



Pięciokot foremny
 fot. Waldemar Kwaśniewski



Rozwiązanie zadania M 1415.

Niech f spełnia warunek z zadania. Korzystając dwukrotnie z równości (najpierw dla $f(x)$ i y , a następnie dla y i x), dostajemy

$$\begin{aligned} f(f(x)f(y)) &= f(f(x)y) + f(x) = \\ &= f(xy) + y + f(x). \end{aligned}$$

Jeśli w otrzymanej równości zamienimy x i y rolami, to lewa strona się nie zmienia, więc przyrównując prawe strony, otrzymamy

$$f(x) - x = f(y) - y,$$

zatem $f(x) = x + c$ dla pewnej stałej c . Wstawiając to do wyjściowego równania, nietrudno się przekonać, że jedyną funkcją spełniającą zadany warunek jest $f(x) = x + 1$.



Rozwiązanie zadania M 1416.

Uczeń na wycieczce spotyka się z $n - 1$ innymi uczniami, więc aby spotkać się ze wszystkimi $2n - 1$ kolegami ze szkoły, musi wziąć udział w przynajmniej 3 wycieczkach. Stąd liczba biletów wynosi co najmniej $6n$, więc minęło co najmniej 6 tygodni.