

## Od czego zależy temperatura Ziemi?

By zrozumieć, w jaki sposób ludzkości udało się wpłynąć na klimat całej planety, oraz móc ocenić konsekwencje zachodzącego obecnie globalnego ocieplenia, musisz poznać kilka podstawowych pojęć.

Tę lekcję zaczniemy od wytłumaczenia, czym jest bilans energetyczny Ziemi. Wyjaśnimy też, na czym polega efekt cieplarniany, zjawisko, dzięki któremu powierzchnię naszej planety pokrywają oceany i pełne życia ekosystemy lądowe, a nie warstwa lodu.

Następnie dowiesz się, co może doprowadzić do zaburzenia bilansu energetycznego Ziemi i w efekcie globalnej zmiany klimatu. Procesy te mogą mieć charakter wymuszeń (jak działalność człowieka polegająca na emisji gazów cieplarnianych) lub sprzężeń (jak zmiany w pokrywie lodowej w efekcie wcześniejszego ocieplenia albo ochłodzenia). Rozróżnienie na wymuszenia i sprzężenia przyda się nam w kolejnych lekcjach, w których opisywać będziemy różne efekty, które są jednocześnie skutkiem zmiany klimatu i mogą prowadzić do jej nasilania.

Mysząc o postępującym obecnie ocieplaniu się klimatu, mamy tendencję do zakładania, że związek pomiędzy wzrostem temperatury a innymi zjawiskami (np. topnieniem lądolodów albo wzrostem poziomu morza) jest liniowy, czyli że:

- każde dodatkowe pół stopnia ocieplenia będzie oznaczało po prostu trochę poważniejsze skutki,
- jeśli uda nam się zatrzymać lub cofnąć ocieplenie, to cofną się także inne zmiany.

**To jednak nieprawda.** Wiele procesów ma swój punkt krytyczny – po jego przekroczeniu przyspieszają lub są nie do powstrzymania. To oznacza, że jeśli ocieplenie „zajdzie za daleko”, możemy utracić możliwość zahamowania wzrostu temperatury oraz innych związanych z nim zjawisk. Temu ważnemu zagadnieniu będzie poświęcona ostatnia część tej lekcji.

# Jak działa efekt cieplarniany?

Efekt cieplarniany to naturalne zjawisko kształtujące klimat Ziemi. Jest następstwem tego, że ziemiska atmosfera (a konkretniej – niektóre tworzące ją gazy, tzw. gazy cieplarniane) w różny sposób oddziałuje z promieniowaniem o różnej długości fali. Gdyby nie efekt cieplarniany, średnia temperatura powierzchni Ziemi byłaby o ponad 30 stopni niższa.

## ENERGIA DLA ZIEMI

Pierwotnym źródłem energii dla wszelkich procesów zachodzących na powierzchni Ziemi czy w atmosferze jest Słońce. Słońce przekazuje naszej planecie energię w postaci promieniowania elektromagnetycznego. Jest to przede wszystkim promieniowanie widzialne, czasami w skrócie nazywane krótkofalowym. Większość tego promieniowania przenika swobodnie przez atmosferę, dociera do powierzchni Ziemi i może być przez nią pochłaniana.

## KLUCZOWA JEST RÓWNOWAGA

Dzięki stałym dostawom energii ze Słońca, powierzchnia Ziemi może utrzymywać swoją średnią temperaturę na mniej więcej stałym poziomie, mimo że sama również promieniuje – wysyła w przestrzeń energię w postaci fal podczerwonych (zwanych też długimi). Nie jest to żadne tajemnicze zjawisko: promieniowanie emitują wszystkie obiekty we wszechświecie. Jak silnie i w jakich długościach fali – to zależy od ich temperatury. Im cieplejsze ciało, tym silniej promieniuje (wysyła w przestrzeń więcej energii) – mówi o tym fizyczne prawo Stefana-Boltzmanna.

Ziemia dąży do tego, aby emitować w przestrzeń kosmiczną taką samą ilość energii, jaką otrzymuje od Słońca. To kwestia bilansu energii: gdy emisja jest za mała, energia gromadzi się w systemie klimatycznym, podnosząc średnią temperaturę powierzchni Ziemi aż do momentu, w którym może ona pozbywać się takiej samej ilości energii, jaką otrzymuje. Gdy emisja jest za duża, występuje deficyt energii i spadek temperatury, co zmniejsza emisję promieniowania.

Jednak na to, w jaki sposób powierzchnia Ziemi pozbywa się energii, wpływa obecność atmosfery. Oprócz tlenu, azotu i argonu znajdują się w niej także para wodna, dwutlenek węgla, metan, tlenek azotu(I) i freony. Te ostatnie nazywamy gazami cieplarnianymi lub szklarniowymi, ponieważ spełniają w atmosferze funkcję podobną do szklanego dachu szklarni: przepuszczają krótkofalowe promieniowanie słoneczne, ale pochłaniają promieniowanie



Promieniowanie elektromagnetyczne to inaczej fale elektromagnetyczne. Ze względu na różne temperatury, Słońce i Ziemia emitują fale o różnych długościach:

- > Słońce krótkofalowe ( $< 4 \mu\text{m}$ )
- > Ziemia długofalowe ( $> 4 \mu\text{m}$ )

Promieniowanie słoneczne to przede wszystkim fale widzialne ( $0,4\text{--}0,7 \mu\text{m}$ ), a ziemskie to podczerwień.

### Bilans energii

Aby policzyć bilans energii jakiegoś ciała:

- > sumujemy, ile energii otrzymuje,
- > sumujemy, ile energii oddaje,
- > liczymy różnicę tych wielkości.

Bilans zerowy oznacza, że ciało ma stałą temperaturę, dodatni – że się rozgrzewa, ujemny – że stygnie.

## CZY WIESZ, ŻE ?

🔗 Tlenek azotu(I) (zwany też tlenkiem diazotu) funkcjonował kiedyś pod nazwami „podtlenek azotu” oraz „gaz rozwesalający”. Bywał wykorzystywany do znieczulania, zwłaszcza podczas zabiegów stomatologicznych.

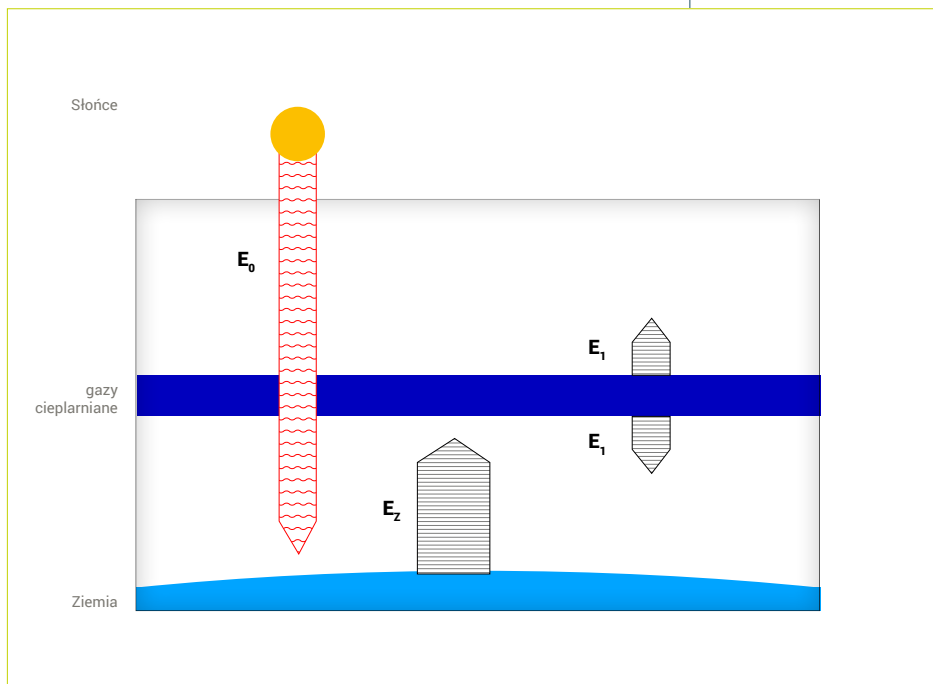
Gazy cieplarniane to gazy, które ze względu na budowę swoich cząsteczek nie pochłaniają promieniowania widzialnego, ale pochłaniają promieniowanie podczerwone.

długofalowe, podczerwone. Wskutek tego atmosfera się ogrzewa i sama również zaczyna emitować promieniowanie podczerwone. Częściowo w górę, w przestrzeń kosmiczną, a częściowo w dół, tak że dociera ono do powierzchni planety i jest przez nią pochłaniane. Dzięki temu „zwrotowi” energii, powierzchnia Ziemi ma temperaturę wyższą (o ponad 30 stopni!), niż gdyby atmosfery nie było.

Opisane wyżej zjawisko nazywamy efektem cieplarnianym.

CZY WIESZ, ŻE ?

- ☞ Większość energii zasilającej procesy zachodzące na powierzchni Ziemi pochodzi ze Słońca.
- ☞ Wszystkie ciała promieniają.
- ☞ Im cieplejsze ciało, tym więcej energii wypromiowuje.
- ☞ Długość fal promieniowania elektromagnetycznego emitowanych przez ciało zależy od jego temperatury.



Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery, w którym wszystkie gazy cieplarniane wypełniające atmosferę zastępujemy pojedynczą warstwą („szybą”). Taki model nazywamy „modelem pojedynczej szyby”.

$E_0$  promieniowanie słoneczne

$E_z$  promieniowanie ziemskie

$E_1$  promieniowanie atmosfery a konkretnie zgromadzonych w niej gazów cieplarnianych.

Zachowanie bilansu energetycznego wymaga, aby:  $E_0 = E_1$  oraz  $E_z = 2E_0$ .

**EFEKT CIEPLARNIANY** – zjawisko polegające na podwyższeniu średniej temperatury powierzchni planety w wyniku oddziaływania jej atmosfery z promieniowaniem podczerwonym emitowanym przez powierzchnię.

**DEFINICJA**  
**EFEKT CIEPLARNIANY**

### RZECZYWISTOŚĆ JEST TROCHĘ BARDZIEJ SKOMPLIKOWANA

Przedstawiony wyżej opis bilansu energetycznego atmosfery jest oczywiście bardzo uproszczony. Gdybyśmy chcieli przedstawić go dokładniej, musieliśmy uwzględnić rozpraszanie promieniowania słonecznego przez chmury, aerozol atmosferyczny (zawieszone w atmosferze cząstki stałe i płynne) i powierzchnię Ziemi. Zwrócilibyśmy także uwagę na fakt, że część promieniowania słonecznego jest jednak pochłaniana przez atmosferę (np. przez cząstki sadzy) i nie dociera do powierzchni Ziemi oraz, że promieniowanie to nie jedyny sposób przekazywania energii. Atmosfera nagrzewa się od powierzchni Ziemi także na drodze przewodnictwa cieplnego, unoszenia się powietrza ogrzanego przy powierzchni Ziemi (konwekcja) oraz poprzez pobieranie energii z powierzchni przez parującą wodę i uwalnianie jej wyżej w atmosferze.

CZY WIESZ, ŻE ?

- ☞ Gdyby nie efekt cieplarniany, średnia temperatura powierzchni Ziemi byłaby o ponad 30 stopni niższa.



rze, gdy para wodna się skrapla (ciepło utajone). Ponadto fale podczerwone z pewnego wąskiego zakresu długości (zwanego oknem atmosferycznym) nie są absorbowane przez gazy cieplarniane, przez co bez problemu uciekają w kosmos. Warto zdawać sobie sprawę z tych procesów, jednak nie są one kluczowe dla zrozumienia samej idei efektu cieplarnianego.

Uśredniony (dla całej planety i całego roku) bilans energetyczny atmosfery uwzględniający wszystkie wspomniane wyżej efekty przedstawia rysunek poniżej. Jak widzisz, bilans nie jest obecnie zrównoważony. Ziemia emituje mniej energii w kosmos niż otrzymuje od Słońca. Właśnie tego dotyczyć będzie nasz kurs.

**Właśnie tego  
dotyczyć będzie  
nasz kurs.**

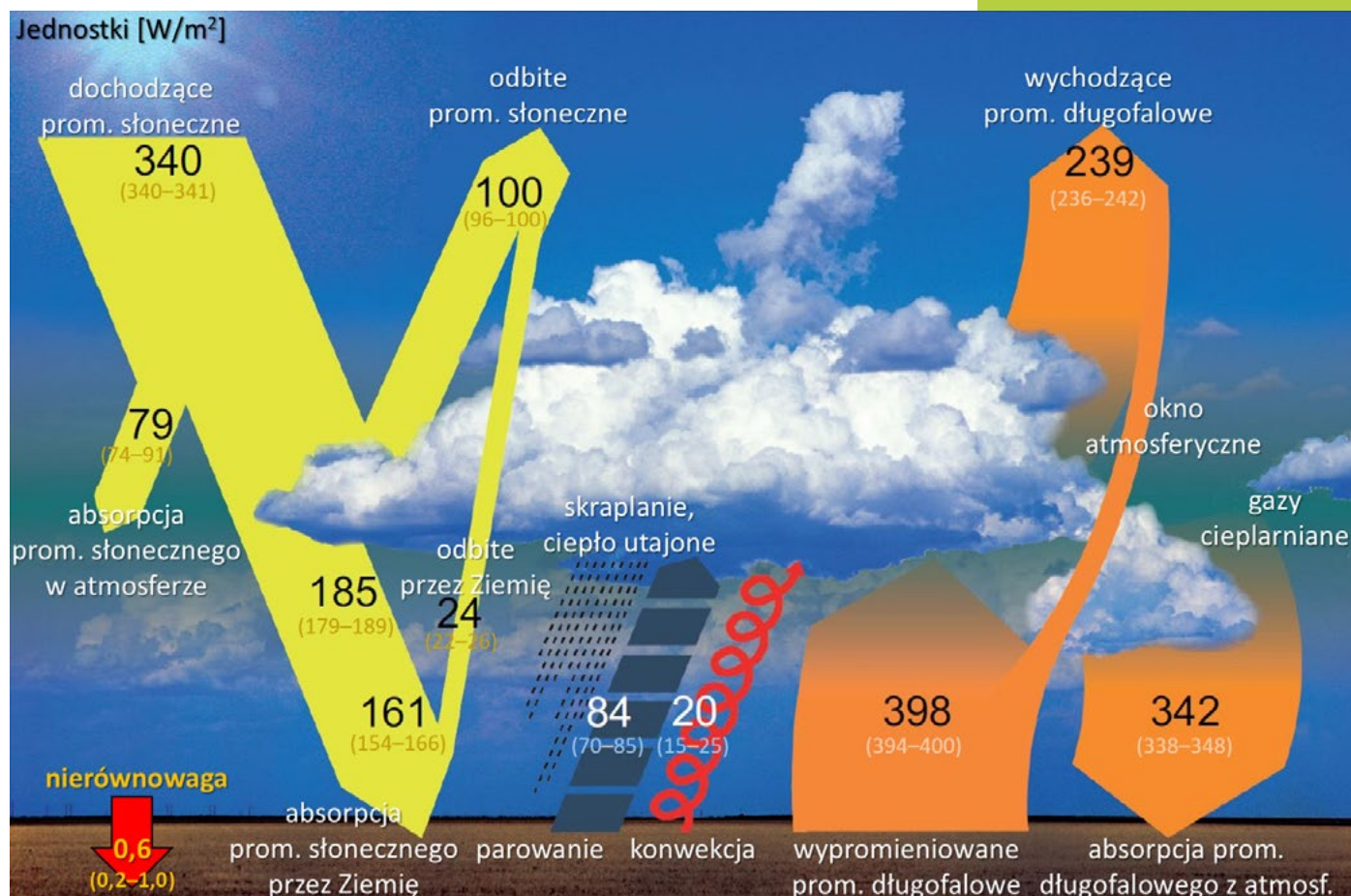
**Jeśli chcesz poznać efekt cieplarniany dokładniej, zajrzyj do tekstu:**



Efekt cieplarniany  
– jak to działa? »

**Rysunek 1:** Aktualny, wieloletni średni bilans energetyczny atmosfery wyrażony w watach na jednostkę powierzchni planety ( $\text{W/m}^2$ ). Wartości podano wraz z zakresem niepewności (nawiasy). Poszczególne składowe bilansu charakteryzują się znacznym zakresem niepewności, ale ich różnice (np. nierównowaga bilansu radiacyjnego) są znane z dużą dokładnością.

**Źródło:** Wild i in., 2013

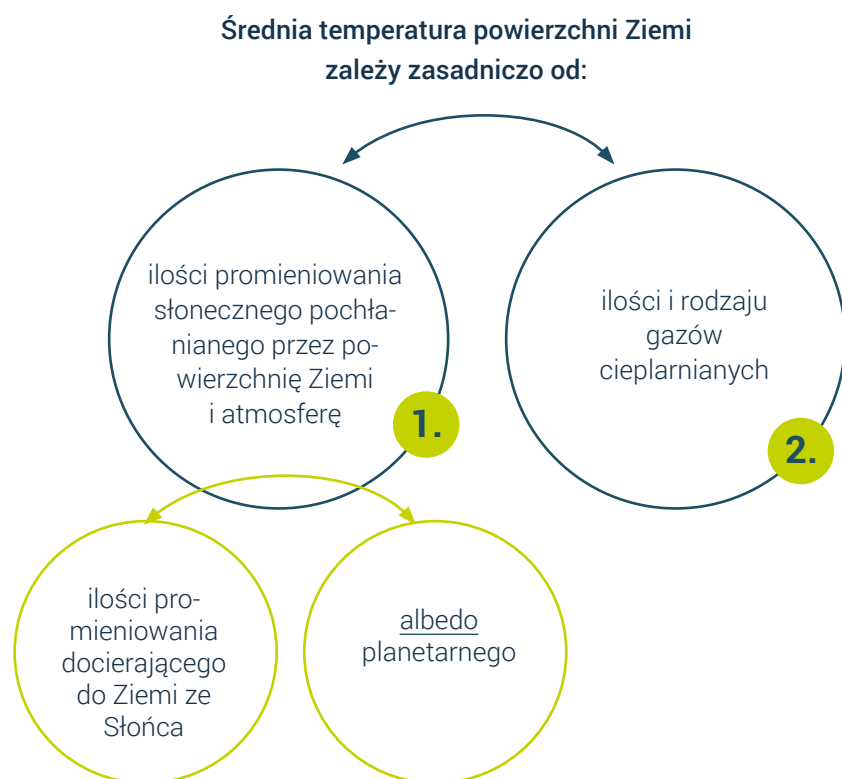


# Co się dzieje, gdy zaburzymy bilans energetyczny atmosfery?

Średnia temperatura powierzchni Ziemi zależy od ilości pochłanianego przez nią promieniowania słonecznego i składu atmosfery (nasilenia efektu cieplarnianego).

Wzrost zawartości gazów cieplarnianych w atmosferze prowadzi do wzrostu temperatury powierzchni Ziemi (ocieplenia klimatu).

Jak już wiesz, pierwotnym źródłem energii dla zachodzących na powierzchni Ziemi procesów jest promieniowanie słoneczne, a dla bilansu energetycznego planety kluczowe znaczenie ma efekt cieplarniany.



**ALBEDO PLANETARNE** – wielkość mówiąca, jaka część promieniowania gwiazdy (w przypadku Ziemi – Słońca) jest rozpraszana w kosmos łącznie przez powierzchnię planety i wszystkie składniki jej atmosfery (np. chmury, pyły).



CZY WIESZ, ŻE ?

☞ Ciepło płynące z głębi naszej planety jest zanedbywalnie małe w porównaniu z ilością energii docierającą do Ziemi ze Słońca. To dlatego pomijamy je w naszych rozważaniach.

albedo  
wielkość mówiąca, jaka część promieniowania jest rozpraszana wstecz (odbijana) przez wybrany obiekt czy powierzchnię. Im większe albedo, tym większa część promieniowania jest rozpraszana (odbijana), a mniejsza – pochłaniana.

**DEFINICJA**  
**ALBEDO PLANETARNE**



## ALBEDO

Lód ma duże albedo (odbija dużą część padającego na niego promieniowania słonecznego) i dlatego widzimy, że jest bardzo jasny.

Woda ma małe albedo (pochłania większość padającego na nią promieniowania słonecznego) i dlatego widzimy ją jako ciemną.

Albedo zależy od długości i kąta padania promieniowania. Jeśli nie są one wspomniane, to znaczy, że mowa o wartościach średnich.

# 1.

## Co się dzieje...

**gdy zmieni się ilość promieniowania słonecznego pochłanianego przez Ziemię?**

● Jeśli ilość promieniowania słonecznego docierającego do naszej planety wzrośnie lub jej albedo planetarne spadnie, Ziemia się nagrzeje.

Energia gromadzi się na jej powierzchni – lądach i oceanach – i w atmosferze, dopóki nie osiągną one temperatury na tyle wysokiej, by wypromieniowały w kosmos tyle samo energii, ile otrzymują od Słońca.

● Jeśli ilość promieniowania słonecznego docierającego do naszej planety spadnie lub jej albedo planetarne wzrośnie, Ziemia się wychłodzi.

Planeta cały czas pozbywa się energii, promieniując. Zmniejszona absorpcja promieniowania słonecznego oznacza jednak, że straty energii nie są równoważone. Stopniowo więc ilość energii zgromadzonej na powierzchni planety i w atmosferze spada, a wraz z nią średnia temperatura. W efekcie Ziemia promieniuje coraz słabiej, aż w końcu ilości energii absorbowanej i emitowanej wyrównują się.

CZY WIESZ, ŻE ?

📌 Albedo świeżego śniegu jest nawet 10 razy większe niż albedo wody.

## 2.

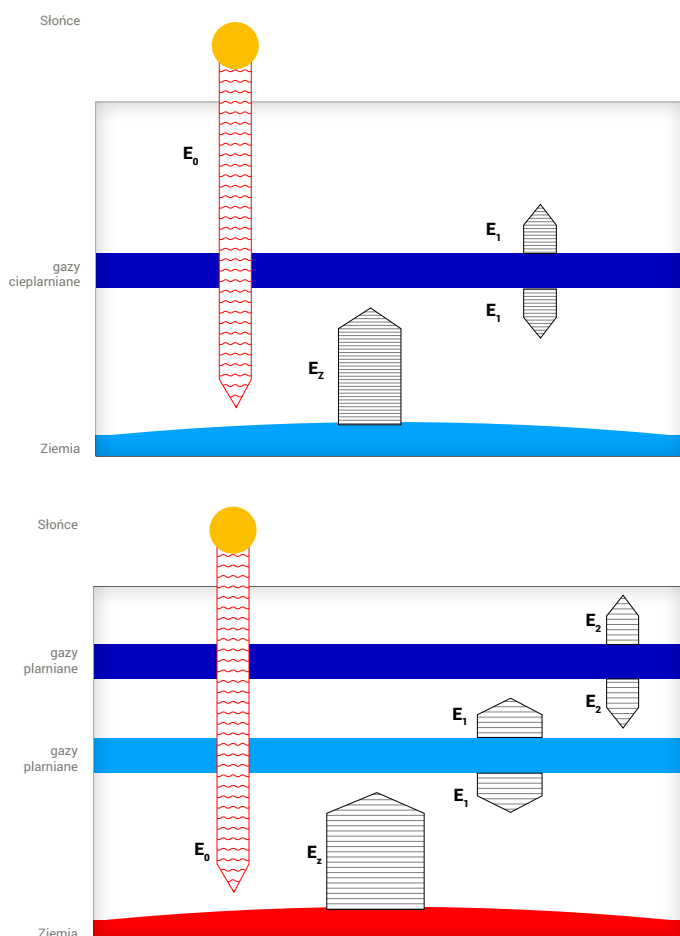
## Co się dzieje...

gdy zmieni się ilość gazów cieplarnianych w atmosferze?

**Gdy w atmosferze przybędzie gazów cieplarnianych, Ziemia się nagrzeje.**

Chociaż planeta pochłania wciąż tyle samo energii słonecznej, pozbywanie się energii przez powierzchnię Ziemi jest utrudnione. Więcej gazów cieplarnianych oznacza, że dolne warstwy atmosfery wydajniej pochłaniają promieniowanie ziemskie. Ilość energii emitowanej z górnych partii atmosfery w kosmos staje się przejściowo mniejsza niż ilość energii otrzymywanej od Słońca. Różnica jest zużywana na ogrzewanie atmosfery. Wraz ze wzrostem temperatury atmosfery rośnie też ilość promieniowania emitowanego przez nią w stronę powierzchni planety. W rezultacie wzrastają także temperatura i ilość energii emitowanej przez powierzchnię Ziemi. Trwa to do momentu, gdy uda się ponownie zrównoważyć ilości energii absorbowanej przez planetę i emitowanej w przestrzeń kosmiczną. Po osiągnięciu tego stanu, średnia temperatura ustabilizuje się na nowym, wyższym poziomie.

**Rysunek 2:** Uproszczony schemat bilansu energetycznego atmosfery, ułatwiający wyobrażenie sobie, co oznacza zwiększenie ilości gazów cieplarnianych w atmosferze.



$E_0$  energia promieniowania słonecznego  
 $E_z$  energia promieniowania ziemskiego  
 $E_1, E_2$  energia promieniowania kolejnych warstw gazów cieplarnianych

Sytuacja wyjściowa, wszystkie gazy cieplarniane w atmosferze zastępujemy pojedynczą warstwą („szybą”).

**Podwojenie ilości gazów cieplarnianych przedstawione jako dodanie drugiej warstwy.**

Zakładamy, że warstwy gazów cieplarnianych pochłaniają całe promieniowanie podczerwone, które dociera do nich z dołu czy z góry. Aby bilans energetyczny był zachowany, ilość energii pochłanianej przez Ziemię musi być równa ilości energii wychodzącej z górnej warstwy atmosfery w przestrzeń kosmiczną. Wymaga to wzrostu temperatury niższej warstwy oraz temperatury powierzchni Ziemi.  $E_2 = E_0$ ,  $E_1 = 2E_0$ ,  $E_z = 3E_0$

Pamiętaj, w rzeczywistości gazy cieplarniane nie tworzą w atmosferze wyodrębnionych warstw.

CZY WIESZ, ŻE ?

Gazy cieplarniane są „dobrze wymieszane” w atmosferze, czyli ich stężenia na różnych wysokościach są zbliżone. Wyjątkiem jest para wodna, która na pewnej wysokości się skrapla.



**Gdy z atmosfery ubędzie gazów cieplarnianych,  
Ziemia się wychłodzi.**

Choć ze Słońca dociera cały czas tyle samo energii, to pozbywanie się energii przez Ziemię energii jest ułatwione. Mniej gazów cieplarnianych oznacza, że atmosfera słabiej pochłania promieniowanie podczerwone emitowane z powierzchni. Ponieważ jednak sama atmosfera nadal promieniuje, zawartość zgromadzonej w niej energii spada i atmosfera się ochładza. W efekcie spada także ilość promieniowania podczerwonego docierającego do powierzchni planety, a jej temperatura obniża się. Trwa to tak długo, aż ilość energii wypromieniowywanej w kosmos zrówna się z ilością pochłanianą przez planetę energii słonecznej. Po osiągnięciu tego stanu, średnia temperatura ustabilizuje się na nowym, niższym poziomie.

**CZY WIESZ, ŻE ?**

📖 Czy wiesz, że efekt cieplarniany oraz konsekwencje wzrostu lub spadku koncentracji gazów cieplarnianych opisano już w XIX wieku.



Poczytaj i posłuchaj  
o historii badań klimatu »

