

PIOTR PIOTROWSKI



ZJAWISKA ATMOSFERYCZNE • PROGNOZOWANIE POGODY

# ATLAS CHMUR I POGODY

**PIOTR PIOTROWSKI**



**KOMPENDIUM WIEDZY O ZJAWISKACH ATMOSFERYCZNYCH**

# **ATLAS CHMUR I POGODY**



TEKST: DR PIOTR PIOTROWSKI

REDAKCJA: MONIKA WRÓBEL

KOREKTA: DOMINIKA KONIOR

PROJEKT I OPRACOWANIE GRAFICZNE: JACEK BRONOWSKI

PROJEKT OKŁADKI: PAWEŁ PANCZAKIEWICZ

OPRACOWANIE OKŁADKI: JACEK BRONOWSKI

#### ZDJĘCIA NA OKŁADCE:

Front (od góry, od lewej): © Marzena, Michał i Jacek Bronowscy / [www.foto-baza.pl](http://www.foto-baza.pl) (2 zdjęcia), © Patryk Kosmider | Shutterstock.com,  
© Marzena, Michał i Jacek Bronowscy / [www.foto-baza.pl](http://www.foto-baza.pl), © Datskevich Aleh | Shutterstock.com, © Korionov | Shutterstock.com  
(główne i grzbiety); tył: © Peter Wollinga | Shutterstock.com.

Wydanie I © Copyright for text, cover and layout SBM sp. z o.o.  
Warszawa 2017



Wydawnictwo SBM Sp. z o.o.  
ul. Sułkowskiego 2/2  
01-602 Warszawa



[www.WYDAWNICTWO-SBM.pl](http://www.WYDAWNICTWO-SBM.pl)

ISBN 978-83-8059-442-5

# Spis treści

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| Wprowadzenie.....                        | 4   |
| Pomiary i obserwacje meteorologiczne ... | 6   |
| Skład i budowa atmosfery ziemskiej.....  | 10  |
| Chmury.....                              | 22  |
| Burze i elektryczność w atmosferze ..... | 88  |
| Hydrometeory .....                       | 122 |
| Litometeory.....                         | 144 |
| Zjawiska optyczne w atmosferze .....     | 148 |
| Prognozowanie pogody .....               | 166 |
| Literatura.....                          | 189 |
| Indeks.....                              | 190 |

# Wprowadzenie

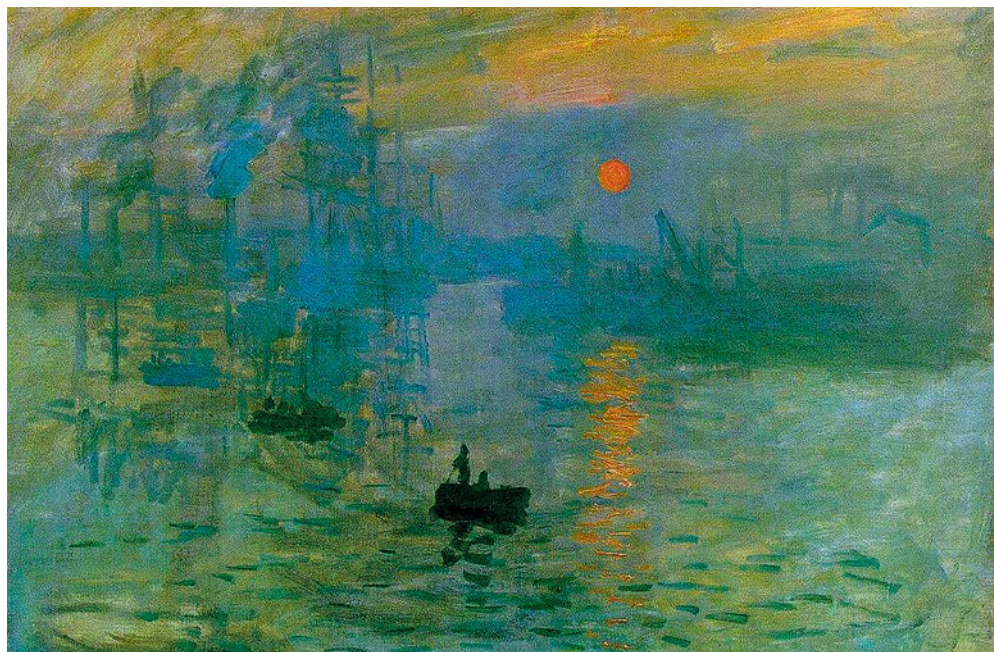
Aktualny stan atmosfery, który możemy zaobserwować, patrząc w niebo, lub też odczuć bezpośrednio na własnej skórze, np. podczas silnego wiatru, upałów, mrozu, można w pewnym uproszczeniu zdefiniować jako pogodę. Wiele zjawisk pogodowych wywołuje w nas skrajne odczucia. Burze i towarzyszące im wyładowania atmosferyczne lub gęste chmury mogą budzić z jednej strony zachwyt i podziw dla sił natury, a z drugiej – strach i panikę. Opady śniegu są dla jednych irytujące, bo zmuszają do odśnieżenia chodnika, dla innych to powód do radości, bo umożliwia wyjazd na narty czy ulepienie bałwana. Szron bywa utrapieniem, gdy trzeba zeszkrobiwać go z szyb samochodu, ale pokryte nim drzewa i krzaki, skrzące się w promieniach porannego słońca, zachwycają. Różnorodny koloryt nieba podczas wschodu i zachodu słońca, mgły ścielące się nad łąką, poranna rosa, przedzierające się przez chmury promienie słoneczne, błyskawice, grzmoty były i są natchnieniem dla artystów – malarzy,

rzeźbiarzy, fotografów, poetów, a to z powodu naturalnego piękna, ulotności i niepowtarzalności tych zjawisk. Do tych cudów należą przede wszystkim rozpościerające się nad naszymi głowami chmury, bezustannie zmieniające kształt i barwę. Oddziałują one nawet na nasze samopoczucie – kiedy niebo jest całkowicie zaciągnięte chmurami, jesteśmy zmęczeni i wpadamy w melancholię, z kolei leniwie płynące po błękitach nieba białe obłoczki wprawiają nas w dobry humor.

Pogoda bywa kapryśna i nieprzewidywalna, a jej przejawy w formie groźnych zjawisk atmosferycznych destrukcyjne. Kaprysy pogody są często powodem spektakularnych zjawisk, takich jak potężne chmury burzowe, błyskawice, grzmoty, trąby powietrzne, wielobarwne tęcze, zamiecie i zawieje śnieżne. Wiele z nich niestety powoduje duże zniszczenia oraz straty materialne, a nawet zagraża życiu. Ich prognozowanie bywa trudne, ponieważ część gwałtownych zjawisk atmosferycznych ma charakter lokalny. Ważną rolę od-



Wyładowania atmosferyczne podczas burzy



*Impresja, wschód słońca Claude'a Moneta (1872)*

grywają służby meteorologiczne, które wydają ostrzeżenia przed groźnymi zjawiskami pogodowymi, dzięki czemu można ograniczyć straty i chronić ludzkie życie. Nie bez powodu modlono się do bogów o deszcz podczas suszy lub o słoneczną pogodę w czasie powodzi. Wiele zjawisk od zawsze budziło grozę i strach.

Gwałtowna pogoda i wahania klimatyczne decydowały nieraz o historii ludzkości. Przykładem są dobrze prosperujące cywilizacje rozwinięte kulturowo, które upadły w ich wyniku. Najznakomitsi wodzowie historii, jak szwedzki król Karol XII czy Napoleon, ponieśli największe klęski w walce z... pogodą. Wielka armada hiszpańska została unicestwiona przede wszystkim przez silne sztormy, a nie siłę ognia wrogich statków.

Choć rozwój techniki komputerowej i metod pomiarowych jest obecnie zaawansowany, serie pomiarowe coraz dłuższe i możliwe jest zbieranie danych w niemal całej atmosferze, nadal nie da się przewidzieć pogody z dużym wyprzedzeniem. Mimo znacznej wiedzy meteorologicznej, naukowcy nie potrafią znaleźć odpowiedzi na wiele pytań. Nadal dyskusyjna jest np. rola chmur w kształtowaniu się warunków klimatycznych – z jednej strony zwiększają efekt cieplarniany, zatrzymując promieniowanie

długofalowe Ziemi, z drugiej osłabiają promieniowanie słoneczne, powodując słabsze ogrzewanie powierzchni Ziemi.

Prezentowana książka ma służyć poszerzeniu wiedzy na temat zjawisk atmosferycznych, ze szczególnym uwzględnieniem tematyki chmur. Jej lektura zachęci czytelnika do zwiększenia zainteresowania meteorologią i synoptyką oraz do podjęcia próby rozpoznawania chmur, uważniejszego śledzenia zjawisk atmosferycznych, a nawet samodzielnego prognozowania pogody. Chmury są wskaźnikiem zmian zachodzących w atmosferze i dzięki temu to dobry prognostyk przyszłej pogody. Warto więc czasami skierować wzrok ku górze i spróbować odczytać, co niebo ma nam do powiedzenia.



Zasady pisowni zastosowane do opisu chmur w niniejszej publikacji oparte są na Międzynarodowym atlasie chmur wydanym przez Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny w 1959 roku w charakterze instrukcji i podręcznika dla służb meteorologicznych zalecanego przez Światową Organizację Meteorologiczną do rozpoznawania i opisu chmur. Zastosowana pisownia ma charakter języka technicznego i różni się od zalecanej przez Radę Języka Polskiego.

## Pomiary i obserwacje meteorologiczne

Pogoda od zarania ludzkości odgrywała istotną rolę w codziennym życiu człowieka. Jej obserwacja niejednokrotnie przyczyniała się do podjęcia istotnych decyzji. Istnieją np. hipotezy, że przybycie pierwszych ludzi do Australii było poprzedzone obserwacjami widnokręgu, nad którym widziano chmury charakterystyczne dla obszarów lądowych lub też dymy z pożarów wywołanych wyładowaniami atmosferycznymi. Praktyczne zastosowanie miały też obserwacje rocznych cykli zmian powiązanych z wędrówkami zwierząt, na które polowali prehistoryczni myśliwi. Jednym z najłatwiejszych do określenia parametrów meteorologicznych jest kierunek wiatru, który można wyznaczyć np. na podstawie kierunku nachylania się roślin. Umiejętność jego określania była z pewnością wykorzystywana przez ludzi pierwotnych do podchodzenia zwierząt podczas polowania. Pojawianie się chmur burzowych na niebie było natomiast sygnałem do szukania schronienia. Cykliczne zmiany warunków opadowych decydowały o miejscu powstawania pierwszych starożytnych cywilizacji.

W większości przypadków osadnictwo rozwijało się w dolinach wielkich rzek, przeważnie w górnych ich biegach. Zakładanie stałych osad i pierwszych miast było możliwe dzięki nabyciu umiejętności uprawy roli i hodowli zwierząt. Wszelkie zaburzenia pogody mogły jednak powodować redukcję plonów lub ich zniszczenie, co w skrajnych przypadkach prowadziło do klęski głodu. Powtarzające się na określonym obszarze przez wiele lat zmiany warunków pogodowych miały charakter wahań, a w dłuższej perspektywie zmian klimatycznych. Wraz z przechodzeniem na osiadły tryb życia ludzie coraz więcej uwagi poświęcali pogodzie, gdyż od niej w głównej mierze zależała obfitość plonów decydująca o życiu lub śmierci. Wiedzę o pogodzie zdobywano dzięki obserwacjom zjawisk atmosferycznych.

Praktyczna informacja o wiatrach i prądach morskich była niezbędna do żeglugi. Aby bezpiecznie podróżować, żeglarze musieli rozpoznawać chmury sygnalizujące pogorszenie pogody, wykorzystywać sprzyjające żegludze prądy morskie i wiatry oraz dostosowywać terminy



Drzewo sztandarowe – skutek długoletniego oddziaływania wiatru



Wieża wiatrów w Atenach



Klimat mógł odgrywać istotną rolę w ewolucji człowieka. Jedną z hipotez zakłada, że rozbieżność dwóch linii ewolucyjnych: hominidów i małp człekokształtnych było efektem ochłodzenia i osuszenia klimatu. Skutkiem tego typu zmian były ekspansja obszarów trawiastych w miejsce lasów i zmuszenie małp człekokształtnych do używania kończyn dolnych do przemieszczania się. Ze wzrostem temperatury podłoża wiąże się natomiast zmniejszenie owłosienia ciała, którego pozbawiony był już w dużym stopniu *homo erectus*.

rejsów do warunków pogodowych. W wielu nadbrzeżnych miastach greckich w miejscach publicznych stały kolumny z kamiennymi płytami, na których wyrzeźbione były informacje o aktualnej pogodzie – parapegmata.

Dzięki zachowanym do naszych czasów tabliczkom glinianym z Mezopotamii wiemy, że próbowano prognozować pogodę na podstawie

obserwacji nieba i ciał niebieskich. Wiedzę o klimacie, zdobytą dzięki dalekim podróżom oraz umiejętnościom wnikliwej obserwacji przyrody, przekazał grecki historyk Herodot. Aspekt biometeorologiczny mają spostrzeżenia Hipokratesa dotyczące korzystnego wpływu powietrza górskiego i morskiego na stan zdrowia. Prekursor współczesnej medycyny próbował logicznie tłumaczyć takie zjawiska jak mgła, chmury i deszcz, opisywał również jakość powietrza na obszarach miejskich w zależności od kierunku wiatru. Ważnym dla meteorologii dziełem, które opisuje w sposób kompleksowy ówczesną wiedzę na temat atmosfery i występujących w niej zjawisk, jest opracowanie Arystotelesa pt. *Meteorologica*. Autor opisał m.in. obieg wody w przyrodzie, charakterystyczne cechy wiatrów wiejących z czterech głównych kierunków i ośmiu pośrednich. Kontynuatorem jego badań był Teofrast z Eresos, który opublikował traktat meteorologiczny *O oznakach deszczu, wiatru, burzy i dobrej pogody*.

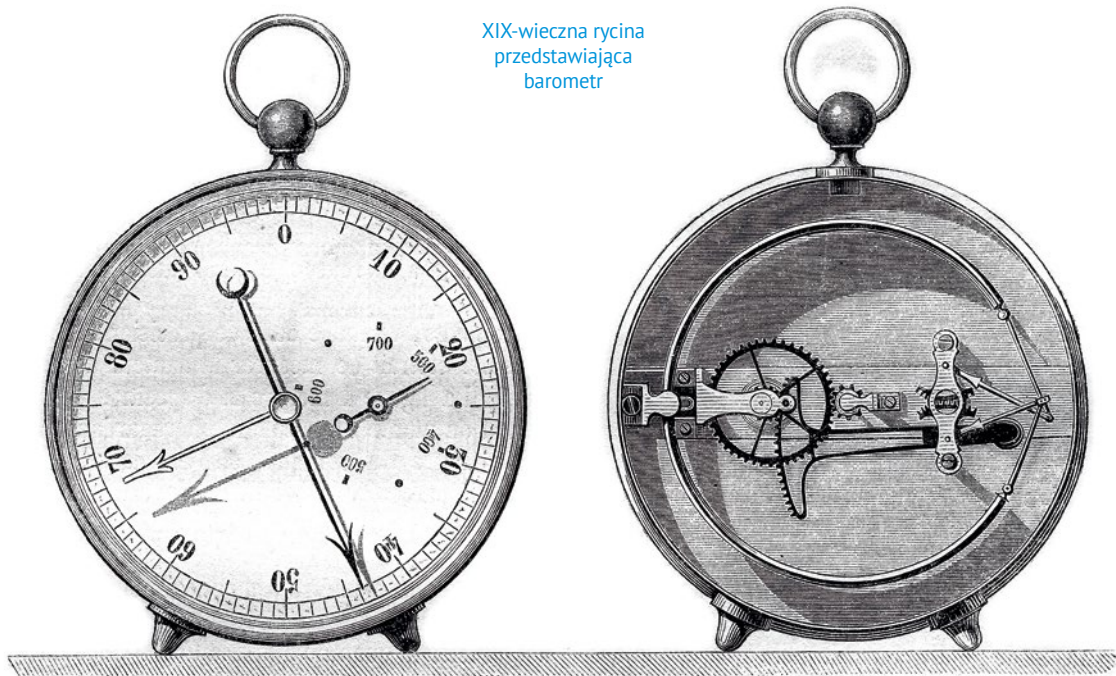
Okolo 50 r. p.n.e. wzniesiono w Atenach według projektu Andronikosa z Kyros osmiokątną wieżę, która pełniła funkcję wiatrowskazu. Na każdej ze ścian wyrzeźbiono wizerunki ośmiu głównych greckich bogów wiatru.

Pierwszą siecią stacji meteorologicznych prowadzącą pomiary i obserwacje według jednolitych zasad była florentyńska sieć meteorologiczna działająca od 1654 do 1667 r. i obejmująca 11 stacji, w tym jedną w Warszawie. Większy zasięg miała mannheimska sieć meteorologiczna utworzona w 1781 r. – jej 39 stacji znajdowało się nie tylko na obszarze Europy, ale nawet na Grenlandii. Funkcjonowanie sieci było możliwe dzięki wynalezieniu przyrządów mierzących parametry powietrza, takie jak temperatura, wilgotność czy ciśnienie atmosferyczne. Wiele z nich opatentowano w XIX w., m.in. psychrometr Augusta (do pomiaru wilgotności powietrza), pyrliometr Ångströma (do pomiaru promieniowania słonecznego), barograf (do pomiaru ciśnienia atmosferycznego), deszczomierz Hellmanna (do pomiaru sumy opadu atmosferycznego). Dokonano też wielu istotnych odkryć na polu fizyki, które były impulsem do dalszego rozwoju badań mete-



Deszczomierz Hellmanna

XIX-wieczna rycina przedstawiająca barometr



orologicznych. Odkryto m.in. promieniowanie podczerwone i ultrafioletowe, wyjaśniono budowę cząsteczki gazu, sformułowano równania hydrostatyki, prawa termodynamiki. Opracowano klasyfikację chmur i układów ciśnienia, model ogólnej cyrkulacji atmosferycznej, opisano warunki niezbędne do kondensacji pary wodnej, zbadano skład powietrza. XIX w. to również okres lawinowego rozwoju państwowych sieci meteorologicznych. Istotnym krokiem na drodze postępu meteorologii były opracowania w formie map danych meteorologicznych zebranych przez stacje. Pierwszą prognozę pogody w formie tabeli dla wybranych miast w Stanach Zjednoczonych opublikowano 1 sierpnia 1861 r. w czasopiśmie „The Times”, a pierwsza międzynarodowa konferencja meteorologiczna odbyła się w 1853 r. w Brukseli. W 1873 r. w Wiedniu została powołana do życia Międzynarodowa Organizacja Meteorologiczna, przemianowana w 1950 r. na Światową Organizację Meteorologiczną (WMO). Szybki rozwój nauki i techniki w XX w., szczególnie po II wojnie światowej, umożliwił poszerzenie wiedzy o atmosferze. Pojawiły się nowe techniki badawcze, zaczęto zbierać dane meteorologiczne za pomocą m.in. balonowych radiosond, samolotów, sond raketowych oraz satelitów meteorologicznych.



Wysokogórskie Obserwatorium Meteorologiczne na Śnieżce

Pierwsze państwowe sieci meteorologiczne na ziemiach polskich działały od początku XIX w. Dopiero po odzyskaniu niepodległości w 1919 r. powołano do życia dwie niezależne służby: meteorologiczną i hydrologiczną. W 1973 r. połączono Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny z Instytutem Gospodarki Wodnej i tak powstał Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW), który pod tą nazwą funkcjonuje do dziś. IMGW współpracuje ściśle z WMO, wymieniając się danymi, doświadczeniem i współpracując w ramach rozwoju nowoczesnych technik pomiarowo-obserwacyjnych oraz zaawansowanych technik komputerowych służących rozwojowi prognoz meteorologicznych.



Widok na Ziemię z kosmosu



## Skład i budowa atmosfery ziemskiej

Dzięki sile grawitacji Ziemia utrzymuje stałą powłokę, która jest mieszaniną różnych gazów, zwaną powietrzem. Gazy atmosferyczne odgrywają ważną rolę w licznych procesach naturalnych i chronią nas przed szkodliwym promieniowaniem słonecznym oraz materią z kosmosu. Tworzą także spektakularne zjawiska optyczne w formie barwnych zórz polarnych w wyższych szerokościach geograficznych.

### Skład atmosfery ziemskiej

Niektóre składniki atmosfery nie ulegają większym zmianom ilościowym i są ze sobą dobrze wymieszane w dolnej części atmosfery, mniej więcej do wysokości 85–100 km. Warstwę tę określa się jako homosferę. Zmianie ulega w niej jedynie zawartość pary wodnej, dwutlen-

ku węgla, ozonu i aerozoli. Powyżej homosfery znajduje się warstwa zwana heterosferą, której skład nie jest jednorodny i zmienia się wraz z wysokością. W powietrzu oprócz gazów znajdują się też cząstki stałe i krople cieczy, które określa się jako aerozole atmosferyczne. Ich ilość wraz ze wzrostem wysokości maleje. Pełnią one ważną funkcję w procesie tworzenia się chmur i mgieł oraz wpływają na ilość docierającej do powierzchni Ziemi energii słonecznej.

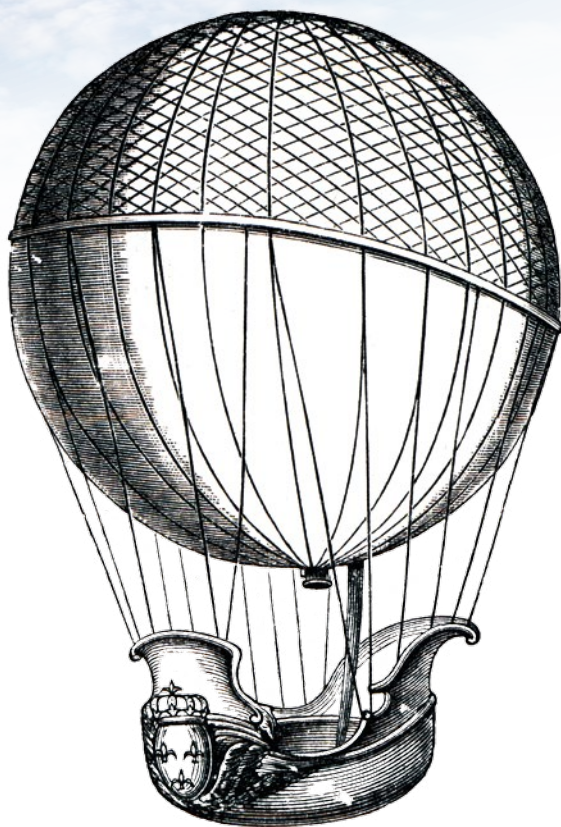
Głównymi stałymi składnikami homosfery są azot (78,09%) i tlen (20,95%), pozostałe to argon, hel, krypton, ksenon, neon, wodór. Większość składników atmosfery jest pochodzenia naturalnego, lecz dostaje się do niej coraz więcej elementów wynikających z działalności człowieka, np. dwutlenek węgla, dwutlenek siarki, podtlenek azotu, benzen, freony.



Pierwsze informacje o warunkach meteorologicznych i składzie chemicznym powietrza ponad powierzchnią Ziemi uzyskano dzięki lotom balonowym. Pierwsze pomiary temperatury na wysokości około kilometra nad ziemią wykonał Jacques Charles w 1783 r. Kolejne odkrycia związane z lotami balonowymi pozwoliły określić skład powietrza w troposferze i odkryć stratosferę.

## Azot

Azot od początku istnienia atmosfery ziemskiej stanowił jej główny składnik. Odgrywa ważną rolę w życiu roślin, szczególnie w fazie wzrostu – jest przez nie pochłaniany i przetwarzany na białko. W normalnych warunkach nie jest toksyczny dla organizmu ludzkiego, jednak wzrost ciśnienia azotu do 1 MPa powoduje chorobę kesonową, która prowadzi do tworzenia się zatorów z pęcherzyków azotu w drobnych naczyniach krwionośnych. Azot jest składnikiem podtlenku azotu ( $N_2O$ ) przyczyniającego się do wzrostu efektu cieplarnianego i powstawania dziury ozonowej. Tlenki azotu uczestniczą ponadto w reakcjach chemicznych, których efektem jest powstanie ozonu troposferycznego będącego składnikiem smogu. Niektóre z tlenków azotu reagują z parą wodną, tworząc kwas



Rycina balonu Jacques'a Charlesa (1784)

azotowy, który może opadać z deszczem na powierzchnię Ziemi, przyczyniając się do zakwaszenia gleby i wód. Głównymi źródłami tlenków azotu w atmosferze  $\text{NO}$  i  $\text{NO}_x$  są gleby uprawne, gleby pochodzenia naturalnego, nawozy mineralne i naturalne, wyładowania atmosferyczne, spalanie biomasy i paliw kopalnych. Azot jest dla nas bardzo istotny, ponieważ oddychanie czystym tlenem przez dłuższy czas jest dla organizmu ludzkiego niebezpieczne (może prowadzić m.in. do zmian nowotworowych), a azot jest jego rozcieńczalnikiem.

## Tlen

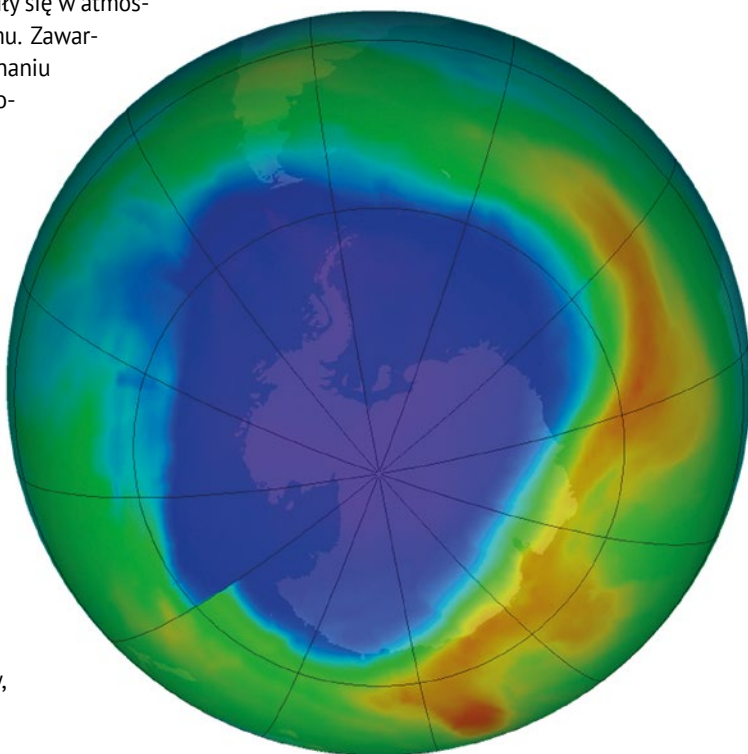
W składzie pierwotnej atmosfery praktycznie nie było tlenu. W nikłej ilości powstawał tylko w reakcjach chemicznych o charakterze nieożywionym. W większej ilości zaczął się pojawiać w powietrzu, dopiero gdy na Ziemi pojawiły się organizmy żywe, które potrafiły wytwarzać tlen w procesie fotosyntezy. Z czasem ilość tlenu w atmosferze powoli zaczęła wzrastać. Większe ilości pojawiły się w atmosferze około 2,5–2,1 mld lat temu. Zawartość tlenu w powietrzu w porównaniu z dzisiejszą była wówczas znikoma i sięgała zaledwie ułamka procentu.

Część dostarczanego przez rośliny tlenu przemieściła się ku wyższym warstwom atmosfery i na skutek oddziaływania promieniowania słonecznego przekształciła się w tlen atomowy i ozon stratosferyczny. Powstała warstwa ozonu wraz z atomami tlenu i azotu pochłania szkodliwe dla organizmów żywych promieniowanie ultrafioletowe. Warstwa ozonowa umożliwiła przyspieszenie rozwoju organizmów,

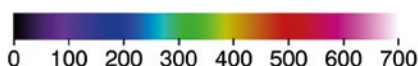


Pierwszymi znanymi organizmami, które dostarczały do atmosfery tlen w większych ilościach, były sinice – samożywne jedno- lub wielokomórkowe organizmy. Uważane są za bakterie (cyjanobakterie) mające zdolność do wytwarzania związków organicznych w procesie fotosyntezy dzięki chlorofilowi, który posiadają. Czasami sinice mogą być niebezpieczne, szczególnie podczas masowego namnażania się w wodzie, ze względu na wydzielane przez nie toksyny. Sinice są bardzo odporne na skrajne warunki środowiskowe; doskonale znoszą długotrwałe susze, wysoką temperaturę i silnie kwasowe podłoże – dzięki temu mogły przetrwać w ekstremalnych warunkach przeszło 3,5 mld lat.

których metabolizm bazuje na tlenie, a co za tym idzie zwiększenie jego ilości w powietrzu. Bardzo ważnym skutkiem redukcji promieniowania ultrafioletowego była kolonizacja przez organizmy żywe obszarów lądowych.



Zawartość ozonu w atmosferze nad półkulą południową w jednostkach Dobsona (16.09.2013). Wyraźnie widoczna dziura ozonowa nad Antarktydą





Para wodna przedostaje się do atmosfery m.in. w wyniku parowania wód powierzchniowych

Analiza pęcherzyków powietrza z rdzeni lodowych wykazała, że poziom tlenu w ciągu ostatnich 800 tys. lat spadł o 0,7%. Nie jest to duży spadek, ale budzi pewien niepokój, ponieważ jest stały. Przypuszcza się, że powolny ubytek tlenu jest efektem naturalnego utleniania skał oraz zużycia tlenu w procesie spalania paliw kopalnych.

### Argon

Argon jest gazem szlachetnym, bezwonny i bezbarwny. Jego stosunkowo duży udział w składzie atmosfery wynika z tego, że jest bierny chemicznie i nie ma żadnego znaczenia biologicznego. Niewielkie ilości argonu powstają stale na Ziemi w wyniku przemian promieniotwórczych.

### Para wodna

Para wodna charakteryzuje się znaczną zmiennością, jeśli chodzi o zawartość w powietrzu. Jej ilość zmienia się zgodnie z cyklem parowania i opadów. W zależności od cech termiczno-wilgotnościowych napływających mas powietrza ulega gwałtownemu wzrostowi lub spadkowi. Udział pary wodnej w powietrzu może dochodzić do 4% w wilgotnej strefie przyrównikowej, najmniej – ułamki dziesiątne procentu – jest jej nad gorącymi i lodowymi pustyniami. Charakterystyczny jest szybszy niż w przypadku pozostałych

składników powietrza ubytek wraz z wysokością; śladowe ilości obserwuje się jeszcze na wysokości około 90 km. Para wodna przedostaje się do atmosfery w wyniku parowania wód powierzchniowych, wilgotnego gruntu, pokrywy śnieżnej i lodowej oraz wydzielania przez rośliny pary wodnej, dlatego jej największą zawartość notuje się w przypowierzchniowej warstwie atmosfery. Pewna ilość pochodzi też z parowania kropelek chmur, mgieł, opadów deszczu oraz sublimacji kryształków lodu znajdujących się w powietrzu.

Para wodna jest gazem cieplarnianym, który odpowiada za temperaturę powietrza przy powierzchni Ziemi. Szacuje się, że może odpowiadać maksymalnie za około 60% efektu cieplarnianego.



Efekt cieplarniany to zjawisko podwyższenia temperatury planety powodowane obecnością w atmosferze ziemskiej takich gazów jak para wodna, dwutlenek węgla, metan, podtlenek azotu, ozon, freony i halony. Gazy te pochłaniają część promieniowania długofalowego powierzchni planety i częściowo emitują je z powrotem ku powierzchni Ziemi, powodując jej ogrzanie. Podłoże jest głównym źródłem ciepła dla atmosfery, więc temperatura powietrza wzrasta. Gdyby nie było efektu cieplarnianego, temperatura powietrza na Ziemi spadłaby o około 33°C.

## Dwutlenek węgla

Zawartość dwutlenku węgla w powietrzu jest zmienna, przeciętnie wynosi 0,004% objętości powietrza. Jest to gaz bezbarwny, bezwonny, niepalny, około półtora raza cięższy od powietrza i dobrze rozpuszczający się w wodzie. Głównym źródłem dwutlenku w atmosfery są: rozkład materii organicznej w warunkach tlenowych przez grzyby i bakterie, oddychanie organizmów żywych, emisja wulkaniczna, parowanie dwutlenku węgla z powierzchni wody, spalanie paliw kopalnych i materii organicznej, produkcja cementu. Dwutlenek węgla jest usuwany z atmosfery w różnorodnych naturalnych procesach. Zawarty w nim węgiel jest istotnym składnikiem materii organicznej, pobierany z powietrza przez rośliny żyjące w wodzie i na lądzie. Oszacowano, że w Polsce lasy mogą zaabsorbować około 40 mln t CO<sub>2</sub>, niestety jednak nie są w stanie pochłonąć całej jego ilości emitowanej ze źródeł antropogenicznych, czyli pochodzących z działalności człowieka. Ze względu na swoje właściwości fizyczne łatwo rozpuszcza się w znacznych ilościach w chłodnych wodach oceanicznych. Na obsza-



Dwutlenek węgla w większej ilości jest szkodliwy dla człowieka, a przy stężeniu powyżej 30% powoduje natychmiastową śmierć. W naturalnych warunkach wyższe stężenia pierwiastka powstają w wyniku działalności wulkanicznej lub utleniania i fermentacji związków organicznych. W latach 80. XX w. w pobliżu jezior Monoun oraz Nyoos w Kamerunie doszło do tragicznych katastrof ekologicznych – z dna zbiorników uwolniły się duże ilości dwutlenku węgla, który rozprzestrzenił się w pobliskich dolinach. W obrębie jeziora Nyoos zginęło około 1746 osób i tysiące zwierząt. Oba jeziora mają pochodzenie wulkaniczne. Przy ich dnie doszło do silnego nasycenia wody dwutlenkiem węgla pochodzącym z wnętrza skorupy ziemskiej i jego uwolnienia wywołanego prawdopodobnie wstrząsem sejsmicznym.

rach lądowych dwutlenek węgla jest usuwany z powietrza w procesach wietrzenia niektórych skał, np. bazaltów.

Jest to gaz cieplarniany, który przyczynia się do obserwowanego wzrostu globalnej temperatury powietrza. Zawartość dwutlenku węgla w powietrzu wzrosła od 1832 r. o około 41%.

Dymy nad przemysłowym miastem

## Metan

Zawartość metanu w atmosferze jest niewielka, wzrosła jednak przeszło dwukrotnie w ciągu ostatnich dwustu lat. Metan jest potencjalnie niebezpieczny, ponieważ jest gazem łatwopalnym. Ma też wpływ na efekt cieplarniany. Jego zwiększone stężenie w powietrzu występuje często na obszarach podmokłych, ponieważ powstaje przez rozkład roślinnych szczątków w warunkach beztlenowych, jest też emitowany przez wulkany i potrafią go wytwarzać termity. W ostatnich latach zwiększone ilości metanu wydostają się z topniejącej wskutek ocieplenia wiecznej zmarzliny. Duże ilości metanu są również uwięzione na dnie oceanów w formie krystalicznej substancji zwanej klatratem metanu. Szacuje się, że jego pokłady zawierają trzy tysiące razy więcej metanu niż jest go w atmosferze ziemskiej. Ich potencjalny rozpad na większą skalę mógłby spowodować globalną katastrofę klimatyczną. Metan przedostaje się do powietrza również w wyniku działalności rolniczej człowieka (obornik, pola ryżowe), z wysypisk śmieci i spalania biomasy.

## Aerozole

Aerozole atmosferyczne mogą być pochodzenia naturalnego i sztucznego. Główne aerozole naturalne to kryształki soli morskiej, drobne cząstki gleby i zwierzęcych skał, pyły z pożarów lasów, pyły wulkaniczne, mikroorganizmy, pyłki roślinne. Bardzo duża ilość cząstek aerozolu występuje na obszarach silnie zurbanizowanych, pochodzą głównie z procesów spalania, wywiewania przez wiatr drobnych cząstek ze składowisk odpadów przemysłowych, dróg, budow. Część z nich bardzo dobrze rozpuszcza się w wodzie i wchodzi w reakcje prowadzące do powstawania smogu. Szczególnie niebezpieczne dla zdrowia są aerozole zawierające metale ciężkie (ołów, arsen, kadm, rtęć, nikiel). Wnikają one do gleby poprzez wypłukiwane z powietrza podczas opadów atmosferycznych, a następnie mogą być pochłaniane przez korzenie roślin. Część aerozoli pochodzi z kosmosu – są to pozostałości procesu spalania i rozdrabniania meteorów w atmosferze.



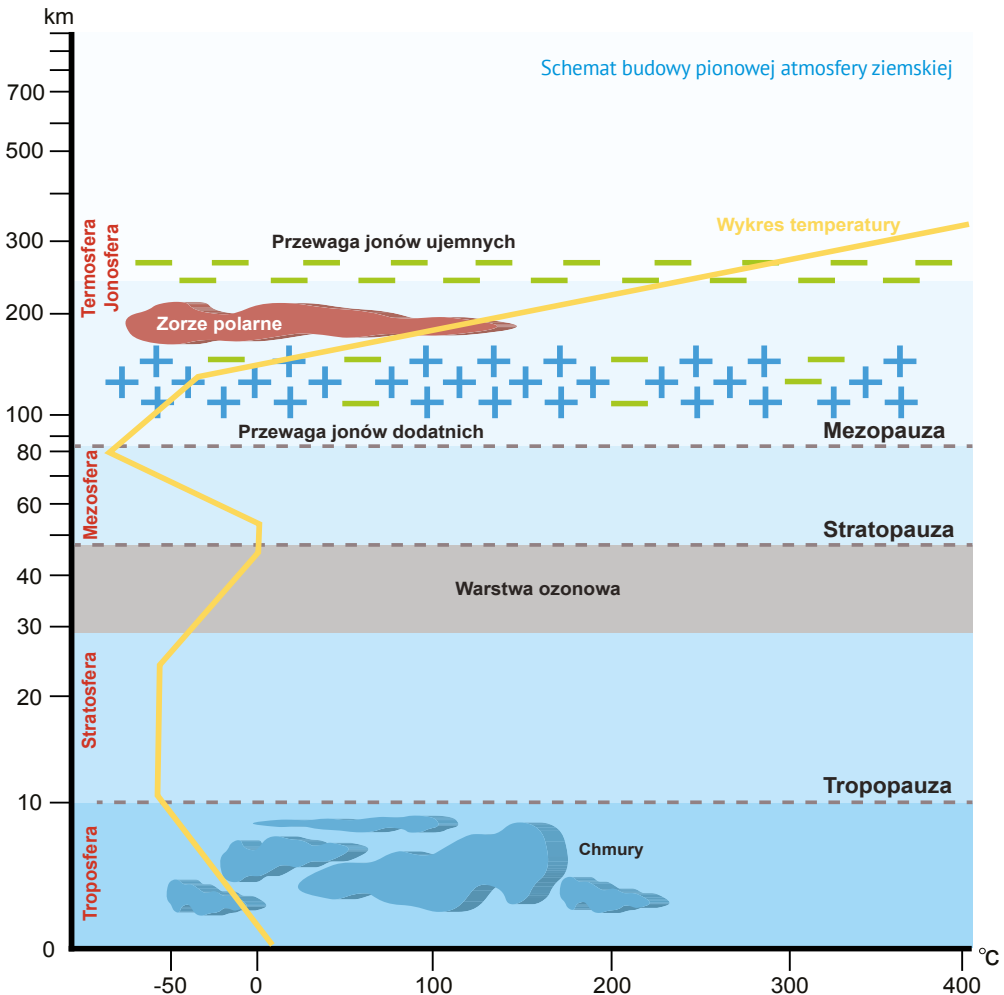
## Warstwy atmosfery ziemskiej

Ze względu na oddziaływanie podłoża na atmosferę rozróżnia się warstwę swobodną, w której interakcja ta nie zachodzi, oraz graniczną. Warstwa graniczna sięga od powierzchni Ziemi do wysokości około kilometra. Dopływ energii słonecznej i wypromieniowywanie ciepła przez podłoże wpływają na temperaturę powietrza tego obszaru. Silnemu nagrzewaniu się podłoża i powietrza sprzyja m.in. zabudowa wielkomiejska. W obrębie atmosferycznej warstwy granicznej występuje jeszcze warstwa przypowierzchniowa (przyziemna) o zasięgu około 50–100 m nad podłożem, w której warunki wietrzne, termiczne i wilgotnościowe znacząco zmieniają się w krótkim czasie.

Kategoryzacja warstw atmosfery ziemskiej powstała w wyniku zaobserwowanej zmiany temperatury powietrza wraz z wysokością. Warstwa bezpośrednio przylegająca do powierzchni Ziemi to troposfera, nad nią znajdują się kolejno: stratosfera, mezosfera, termosfera i egzosfera. Poszczególne warstwy oddzielone są od siebie około jedno-, dwukilometrowymi obszarami przejściowymi. W obrębie stratosfery wyróżnia się dodatkowo ozonosferę, a w obrębie egzosfery – jonosferę.

### Troposfera

Pierwszy człon nazwy troposfery wywodzi się z greckiego słowa *tropos*, czyli zwrot, obrót. Warstwa ta cechuje się dużą zmiennością czasowo-przestrzenną poszczególnych para-



Zdecydowana większość chmur  
tworzy się w troposferze

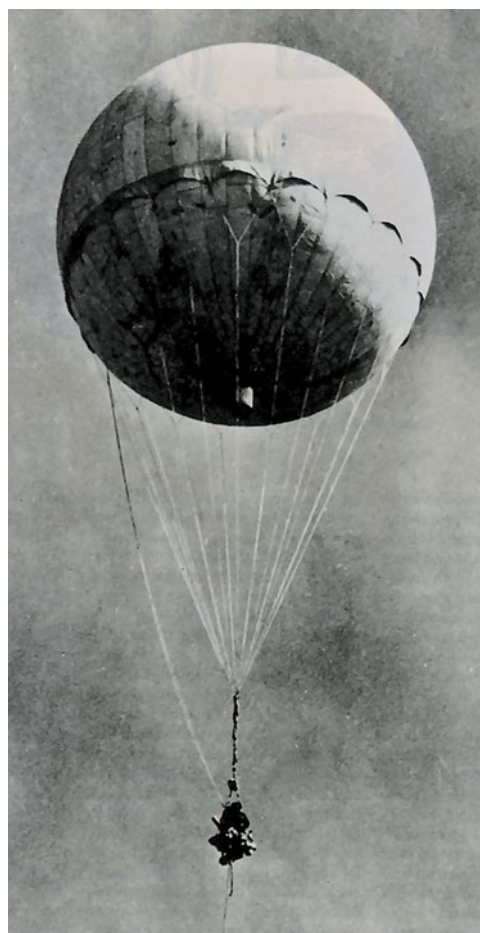


Pierwsze naukowe informacje o prądach strumieniowych zostały opublikowane w 1926 r. przez japońskiego meteorologa Wasabura Ooishiego. W czasie II wojny światowej dowództwo armii japońskiej postanowiło wykorzystać tę wiedzę do ataków balonowych na Stany Zjednoczone. Wypuszczono ponad dziewięć tysięcy balonów wodorowych z podwieszonymi bombami, jednak tylko nieliczne dotarły nad Amerykę Północną. Spadały zazwyczaj na obszary słabo zaludnione, nie wyrządzając większych szkód. Obecnie prądy strumieniowe są wykorzystywane przez lotnictwo do skrócenia czasu przelotu i zmniejszenia zużycia paliwa.

metrów meteorologicznych (temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru, ciśnienia atmosferycznego, wilgotności powietrza) oraz zjawisk atmosferycznych (np. mgły, opadów atmosferycznych, osadów atmosferycznych, trąb powietrznych). Chwilowy stan atmosfery w danym miejscu określony na podstawie parametrów meteorologicznych i występujących w atmosferze w danym momencie zjawisk definiuje pojęcie pogody. To właśnie w troposferze zachodzą najistotniejsze procesy fizyczne kształtujące pogodę, a w dłuższej perspektywie – klimat.

Wysokość tropopauzy, czyli górnej granicy troposfery, nie jest stała i zmienia się w zależności od szerokości geograficznej oraz pory roku (w ciepłej połowie roku jest większa niż w chłodnej). W badaniach klimatycznych dotyczących ocieplenia klimatu na kuli ziemskiej wysokość tropopauzy jest wykorzystywana jako wskaźnik ocieplenia troposfery. Im wyżej znajduje się tropopauza, tym temperatura powietrza w troposferze jest wyższa.

W troposferze znajduje się około  $\frac{4}{5}$  masy atmosfery i większość wody w atmosferze – około 99%. Zachodzą w niej nieustanne zmiany stanu fazowego wody, które wpływają na obieg wody w przyrodzie. Najwięcej pary wodnej znajduje się w przypowierzchniowej warstwie troposfery, wraz z wysokością jej ilość maleje.



Japońska bomba balonowa nad Kalifornią w 1945 r.

Temperatura powietrza maleje z wysokością przeciętnie o około  $0,65^{\circ}\text{C}$  na każde 100 m wysokości. Spadek ten nieco zwiększa się w górnej części troposfery do około  $0,7\text{--}0,8^{\circ}\text{C}$  na 100 m. Najniższą temperaturę powietrza notuje się nad równikiem na granicy z tropopauzą – od  $-80$  do  $-70^{\circ}\text{C}$ . Istotnymi źródłami ciepła dla troposfery są procesy zmiany stanu fazowego pary wodnej. Efektem procesu jej kondensacji jest powstanie chmur i mgieł oraz dostarczenie dodatkowej ilości ciepła troposferze.

Wraz z wysokością zmniejsza się w troposferze ciśnienie atmosferyczne. Zmiana ta najszybciej przebiega w jej dolnej części. W górnej części troposfery występują wiatry, tzw. prądy strumieniowe, których prędkość przekracza 300, a nawet 400 km na godzinę. Największe prędkości osiągają w porze zimowej – występują wtedy najsilniejsze kontrasty termiczne pomiędzy masami powietrza. Przepływ powie-

trza w prądach strumieniowych skierowany jest z zachodu na wschód. Na obu półkulach występują dwa główne prądy strumieniowe, polarny (większy) i podzwrotnikowy (mniejszy). Mogą one tworzyć zafalowania wokół całego globu o mniejszej lub większej amplitudzie. Stopień zafalowania ma wpływ na kierunek przemieszczania się mas powietrza oraz lokalizację układów barycznych. Prądy strumieniowe nie zawsze tworzą zamknięty krąg wokół Ziemi. W przypadku zmniejszania się prędkości przepływu powietrza na niektórych obszarach prąd strumieniowy występuje w formie pojedynczych przerywanych pasm.

W tropopauzie temperatura nie spada wraz z wysokością, czasami może nieznacznie wzrastać. Skutkiem takiego rozkładu pionowego temperatury powietrza jest hamowanie ruchów pionowych. Widocznym na niebie tego przejawem jest spłaszczona górna część chmury

Cumulonimbus, która z racji swojego wyglądu jest nazywana kowadłem.



Chmura Cumulonimbus z charakterystycznym kowadłem