

# METEOROLOGIA

TEORIA I PRAKTYKA

---

ADAM KANTORYSIŃSKI



# METEOROLOGIA

TEORIA I PRAKTYKA

---

ADAM KANTORYSIŃSKI



Adam Kantorysiński: *Meteorologia. Teoria i praktyka*

Copyright © Adam Kantorysiński

Copyright © for this edition: Wydawnictwo Nautica, 2020

Redakcja: Jacek Zyśk

Projekt makiety i skład: Marzena Piłko

Projekt okładki: Marzena Piłko

Ilustracje: Joanna Reniger

Korekta: Joanna Dzik

Zdjęcie na okładce: Katarzyna Kolanowska

Wikimedia: str. 13, 16, 17, 20, 22, 23, 24, 25, 26–27, 30, 32, 44, 47, 77, 78

Skala Beauforta – Andrzej Bogusz, licencja: CC BY 3.0.

map\_for\_free: str. 43, 82, 83,

pixabay.com: str. 7, 14–15, 28–29, 34–35, 45, 53, 64–65, 74–75, 85, 94, 98–99

pexels.com: str. 21, 27, 32, 33, 84

Skany map: prywatne archiwum autora

Wydanie I

ISBN 978-83-956329-3-8

ISBN ebook 978-83-956329-4-5

Druk: Zakład Graficzny Colonel S.A.

Warszawa 2020



**nautica**

Wydawnictwo Nautica

e-mail: [wydawnictwonautica@wydawnictwonautica.pl](mailto:wydawnictwonautica@wydawnictwonautica.pl)

[www.wydawnictwonautica.pl](http://www.wydawnictwonautica.pl)

# SPIS TREŚCI

<b>I. ATMOSFERA I PROCESY, JAKIE W NIEJ ZACHODZĄ</b> .....	<b>7</b>
Wstęp .....	8
Dziura ozonowa .....	8
Skład i grubość atmosfery wokółziemskiej .....	9
Promieniowanie słoneczne .....	9
Pochłanianie i emitowanie energii .....	11
Efekt cieplarniany .....	12
<b>2. POWIETRZE W RUCHU I PARA WODNA</b> .....	<b>15</b>
Nagrzewanie Ziemi .....	16
Znaczenie pary wodnej w atmosferze .....	16
Procesy adyabatyczne – klucz do zrozumienia ruchu mas powietrza .....	18
Różne przyczyny wynoszenia powietrza do góry, powstawanie chmur .....	19
Osiadanie mas powietrza – inwersja temperatury .....	22
Mgły – jak i gdzie mogą powstać .....	24
<b>3. CHMURY I ICH WPŁYW NA POGODĘ</b> .....	<b>29</b>
Klasyfikacja chmur .....	30
Zjawiska związane z chmurami .....	31
<b>4. OD PROSTYCH MODELI TEORETYCZNYCH DO RZECZYWISTOŚCI</b> .....	<b>35</b>
Cyrkulacja ogólna atmosfery .....	36
Rzeczywiste układy baryczne nad oceanami i ich skutki .....	39
Szczegóły i wnioski .....	42
<b>5. CO WYNIKA Z RÓŻNICY TEMPERATUR</b> .....	<b>45</b>
Proste modele .....	46
Efekt występowania różnicy ciśnień .....	48
Co można powiedzieć o kierunku wiatru? .....	48
Jak obliczyć prędkość wiatru przywodnego .....	50
Wnioski .....	51

<b>6. FRONTY ATMOSFERYCZNE I ICH WPŁYW NA POGODĘ. . . . .</b>	<b>53</b>
Co to jest front atmosferyczny? . . . . .	54
Zjawiska atmosferyczne na obszarze niżu . . . . .	57
Teoretyczne modele ośrodków barycznych a rzeczywistość . . . . .	61
<b>7. CZY MOŻEMY PRZEWIDZIEĆ COKOLWIEK? . . . . .</b>	<b>65</b>
Sytuacja baryczna nr 1 . . . . .	66
Sytuacja baryczna nr 2 . . . . .	68
Sytuacja baryczna nr 3 . . . . .	70
Sytuacja baryczna nr 4 . . . . .	72
<b>8. ZJAWISKA DUŻEGO I MNIEJSZEGO FORMATU . . . . .</b>	<b>75</b>
Huragany (cyklony, tajfuny) w dużym skrócie . . . . .	76
Geneza i skutki monsunów . . . . .	77
Wiatry lokalne . . . . .	81
<b>9. PROSTE INTERPRETACJE . . . . .</b>	<b>85</b>
Rozwój sytuacji barycznej I . . . . .	86
Rozwój sytuacji barycznej II . . . . .	88
Rozwój sytuacji barycznej III . . . . .	90
Rozwój sytuacji barycznej IV . . . . .	92
<b>10. PODSUMOWANIE – JAK MOŻEMY PRZYGOTOWAĆ SIĘ DO ŻEGLUGI. . . . .</b>	<b>95</b>
<b>ANEKSY . . . . .</b>	<b>98</b>
Skala Beauforta . . . . .	100
Radiowe systemy ostrzeżeń . . . . .	105
Wykaz terminów używanych w fonicznych morskich prognozach pogody . . . . .	112
Słowniczek pojęć . . . . .	114
Bibliografia . . . . .	117



**1**

# ATMOSFERA I PROCESY, JAKIE W NIEJ ZACHODZĄ

## WSTĘP

Atmosfera jest powłoką gazową o bardzo różnorodnym składzie, otaczającą kulę ziemską. Naukowcy wyróżniają w niej kilka warstw różniących się składem i znaczeniem dla życia na Ziemi. Większość zjawisk mających istotny wpływ na pogodę zachodzi w warstwie o największym zasięgu pionowych ruchów powietrza spowodowanych **konwekcją**, czyli niejednakowym nagrzaniem mas powietrza. Warstwę tę nazywamy **troposferą**. Należałoby jeszcze wspomnieć o warstwie ponad troposferą, gdzie występuje wyższa koncentracja ozonu, który absorbuje częściowo promienie słoneczne. Z powodu tej właściwości ta warstwa atmosfery ma bezpośredni wpływ na stopień ogrzania powierzchni ziemi, a więc, jak się przekonamy, na to, co się nad nią dzieje. Brak ozonu mógłby okazać się zabójczy dla życia na Ziemi z powodu nadmiernego jej ogrzania. Wyższe partie atmosfery nas nie interesują, ponieważ rozrzedzając się stopniowo, w sposób niezauważalny przechodzą w przestrzeń kosmiczną i nie mają żadnego wpływu na procesy pogodotwórcze.

## DZIURA OZONOWA

Naukowcy zajmujący się fizyką atmosfery wiedzą o istnieniu dziury ozonowej od dawna. Wiedza ta przedostała się do opinii publicznej i wzbudziła zrozumiałe zainteresowanie. Przeciętny człowiek może odnieść wrażenie, że skoro gdzieś w atmosferze, nawet w jej bardzo wysokich partiach, jest jakaś dziura, to jesteśmy narażeni na zbyt dużą intensywność promieniowania słonecznego. Takie wrażenie, z pewnymi zastrzeżeniami, jest słuszne.

**Ozon** ( $O_3$ ) to izotop tlenu, który powstaje, ale też rozpada się pod wpływem promieniowania słonecznego. Natężenie tego promieniowania jest funkcją szerokości geograficznej, ale też zmienia się w różnych porach roku w zależności od kąta padania promieni sło-

necznych. Wolny ozon pełni funkcję pewnego rodzaju filtra pochłaniającego znaczną część **promieniowania ultrafioletowego** (do tego pojęcia wrócimy jeszcze trochę dalej) pochodzącego od Słońca, którego nadmiar może być dla nas szkodliwy.

Od dwudziestu paru lat, monitorując stan naszej atmosfery, stwierdzono wyraźny spadek ozonu w jej składzie. Przyczyny takiego stanu rzeczy mogą być częściowo naturalne; wahania składu atmosfery były prawdopodobnie zawsze, jednak dalsze badania doprowadziły do stwierdzenia, że przynajmniej częściowo za ten stan odpowiedzialny jest człowiek.

To samo promieniowanie ultrafioletowe, które inicjuje rozpad tlenu i powstanie ozonu, działa również na gazy z grupy freonów, rozkładając je na węgiel, fluor i chlor. Tutaj tkwi rozwiązanie całej zagadki: chlor z kolei reaguje z wolnym ozonem i powoduje jego rozpad na tlen dwuatomowy ( $O_2$ ). Jeśli będziemy wciąż dostarczać atmosferze freony, to będzie następować ciągły proces produkcji chloru, a ten wyeliminuje w końcu nasz filtr (ozon), przekształcając go w zwykły tlen. Należałoby jeszcze dodać, że freony nie reagują w niższych warstwach atmosfery i mogą pozostawać tam przez bardzo długi czas w swojej własnej postaci. Dopiero gdy przedostaną się w jej wysokie partie, następuje ich rozpad.

Tlen jest nam potrzebny bliżej powierzchni ziemi, w wysokich partiach atmosfery jest nadzwyczaj szkodliwy – zmniejsza ilość ozonu, z którego w znacznej mierze tam powstaje.

Problem polega więc na niedoborze ozonu w wysokich partiach atmosfery, co przede wszystkim może być skutkiem pojawienia



się nadmiaru gazów z grupy freonów. Należy więc się zastanowić nad głównym źródłem tych gazów. Związki te bardzo powszechnie były używane we wszelkiego rodzaju urządzeniach chłodniczych oraz klimatyzacyjnych. Stosowane są też do produkcji lakierów oraz były we wszystkich produktach sprzedawanych w postaci sprayu jako gaz umożliwiający rozpylanie.

Stwierdzenie problemu zanikania ilości ozonu w atmosferze doprowadziło do uchwalenia konwencji zobowiązującej państwa, które ją ratyfikują, do ograniczenia emisji gazów powodujących potęgowanie zjawisk pojawiania się i rozwoju dziur ozonowych. Konwencję tę podpisało do tej pory blisko dwieście państw. Rozszerzono również konwencję MARPOL dotyczącą żeglugi o artykuły zakazujące emisji gazów z grupy freonów. Najbardziej podatne na zanik ilości ozonu były prawdopodobnie zawsze rejony okołobiegunowe. Tam, gdzie promienie słoneczne zawsze padają pod małym kątem i występują wielomiesięczne okresy nocy polarnej, mamy do czynienia ze znacznym niedoświetleniem i ozon powstaje o wiele wolniej niż w niższych szerokościach geograficznych. Jednocześnie freony docierają tam niezależnie od pory roku. W takich warunkach proces niszczenia ozonu może być szybszy niż jego okresowa produkcja.

Chwilowo rozszerzanie się dziury ozonowej wydaje się opanowane, lecz przyszłość zależy prawdopodobnie od naszego zdyscyplinowania.

### SKŁAD I GRUBOŚĆ ATMOSFERY WOKÓŁZIEMSKIEJ

Atmosfera, jeśli spojrzymy na nią jako na całość, jest mieszaniną gazów, która jest

związana z Ziemią dzięki sile grawitacji. Poza różnymi gazami zawiera także cząstki stałe oraz ciekłe tworzące zawiesinę. Gazy, które stanowią największy procentowo składnik atmosfery, to tlen, azot, argon oraz woda występująca w atmosferze w zakresie możliwych temperatur w trzech stanach skupienia. Całą warstwę atmosfery można podzielić na wiele współśrodkowych powłok sferycznych różniących się składem, pionowym rozkładem temperatur i gęstością. Nas będzie interesować przede wszystkim warstwa najbliższa powierzchni ziemi, bo to w niej zachodzą niemal wszystkie procesy pogodotwórcze. Warstwę tę już poznaliśmy – to troposfera.

Troposfera jest najgrubsza tam, gdzie ciepłe powietrze, mając niewielką gęstość, jest lekkie i unosi się najwyżej, czyli w strefie międzyzwrotnikowej. Osiąga tam grubość 16–18 km. W okolicach okołobiegunowych powietrze jest najchłodniejsze, zatem ma największą gęstość i z tego powodu osiada, tworząc warstwę najmniejszej grubości: 7–10 km. Ciepłe powietrze jest wynoszone do góry, bo jest lekkie, a chłodne jako cięższe osiada. Rozwińmy tę myśl w dalszej części.

### PROMIENIOWANIE SŁONECZNE

Ciepło słusznie kojarzy nam się ze Słońcem, jednak to, co możemy zaobserwować jako światło słoneczne, jest tylko częścią całego zakresu promieniowania. Istnieje jeszcze promieniowanie niewidzialne o falach krótszych od widzialnego: to **fale nadfioletowe**. Fale dłuższe nazywamy **falami podczerwonymi**. Z całego zakresu fal przez atmosferę przedostaje się i dociera do powierzchni ziemi około połowy, pozostała część ulega pochłanianiu i rozproszeniu w atmosferze.

**Pochłanianie promieniowania** odbywa się w atmosferze i biorą w nim udział cząsteczki różnych gazów oraz, a właściwie przede wszystkim, różnego rodzaju zawiesiny

znajdujące się w powietrzu, takie jak kryształki lodu, pyły naturalne i pochodzenia przemysłowego, a także woda w postaci skroplonej. Częsteczki gazów oraz pyły powodują również **rozpraszanie promieniowania**. W największym stopniu ulegają temu zjawisku fale krótkie, czyli nadfioletowe. Właśnie rozpraszaniu zawdzięczamy błękitny kolor nieba. Część pochłonięta do nas nie dotrze. Dostaną się natomiast promieniowanie bezpośrednie oraz pewna część rozproszonego. Jego ilość oraz proporcje będą zależeć od konkretnej sytuacji.

**Odbicie promieniowania** zachodzi już częściowo w atmosferze. Jego wielkość zależy od rodzaju, a więc wysokości, budowy i grubości chmur. To, co dotrze do powierzchni ziemi, będzie odbijane niejednakowo. Zjawisko odbicia w dużej mierze zależy od kąta padania promieni, czyli po prostu od wysokości Słońca nad horyzontem.

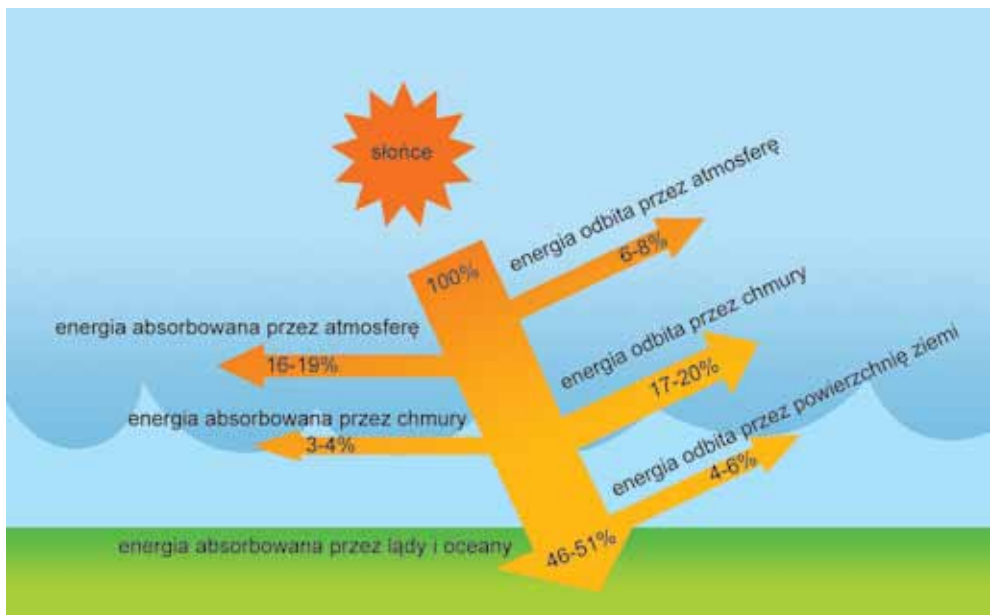
Oznacza to, że najwięcej energii otrzyma pas Ziemi w strefie międzyzwrotnikowej, gdzie

Słońce bywa najwyżej, a najmniej – okolice okołobiegunowe. Oznacza to również, że na każdej szerokości geograficznej więcej energii słonecznej otrzymamy w południe, a najmniej rano i wieczorem.

Zjawisko odbicia potęguje albo pomniejsza rodzaj podłoża, stan szaty roślinnej (a więc różnice: lato – zima), ale też pokrywa śnieżna oraz obecność lodu zarówno na ziemi, jak i na morzu. Oznacza to, że w dużych szerokościach geograficznych, gdzie bywa całkiem sporo śniegu i lodu, a jednocześnie Słońce jest bardzo nisko, odbijanie promieniowania jest dużo większe niż w pasie okołorównikowym ze Słońcem wysoko i znacznym pokryciem łąd roślinnością.

W rejonach o dużej ilości różnych pyłów wraz ze wzrostem zachmurzenia wzrasta zjawisko pochłaniania i mniej energii dotrze do powierzchni ziemi. Jeśli zachmurzenie jest całkowite, możemy mieć do czynienia głównie z **promieniowaniem rozproszonym**.

Pewna część promieniowania została roz-



Co się dzieje z energią, którą otrzymujemy od Słońca?

proszona bądź pochłonięta przez atmosferę. Zaabsorbowane promieniowanie zamienia się w energię cieplną. Atmosfera pochłania mniej niż 20 proc. energii. Cząstki absorbujące się ogrzały, lecz mniej więcej połowa całej energii dotarła do powierzchni ziemi w formie bezpośredniej lub rozproszonej. Nas najbardziej interesuje właśnie ta wchłonięta przez podłoże część, ponieważ ona ogrzeje powierzchnię ziemi. Im większa jest więc absorpcja promieniowania, tym cieplejszy będziemy mieli grunt pod nogami. Tutaj dopiero jest początek naszych dywagacji o atmosferze, gdyż to powierzchnia ziemi jest głównym źródłem ciepła dostarczanego atmosferze, a nie bezpośrednie czy rozproszone promieniowanie Słońca odbierane przez cząsteczki gazów niejako po drodze.

## POCHŁANIANIE I EMITOWANIE ENERGII

Powinniśmy się zorientować, w jakich warunkach będzie ten grunt cieplejszy. Zależy to przede wszystkim od jego rodzaju: powierzchnie gładkie i jasne więcej odbijają, niż pochłaniają, a grunt ciemny, matowy ma większą zdolność absorbowania znacznej ilości energii cieplnej. Ilość pochłaniana, jak już wiemy, zmienia się również wraz ze zmianą kąta padania promieni słonecznych; im ten kąt mniejszy, tym więcej promieni będzie odbitych i grunt pozostanie chłodny.

Wypada nam jeszcze zapoznać się z ważną cechą określającą rodzaj podłoża – tzw. **ciepłem właściwym**. Jest to ilość energii, jaką musi wchłonąć 1 cm<sup>3</sup> danego ciała, aby zmienić swą temperaturę o 1°C. Ośrodkiem bezkonkurencyjnym w zdolności pochłaniania energii jest woda. Charakteryzuje się najwyższą wartością ciepła właściwego. Mówimy, że ma największą pojemność cieplną. Podłożem o niezwykle małej pojemności cieplnej są np. jasne skały lub piasek.

Wielka pojemność cieplna wody oznacza, że będzie długo się nagrzewała, ale zmagazy-

nuje najwięcej energii w określonej jednostce czasu, za to piasek o niskiej pojemności ogrzeje się szybciej, ale też prędszy ostygnie po ustaniu promieniowania, np. po zachodzie Słońca. Powierzchnię ziemi możemy traktować jak olbrzymi akumulator przyjmujący i magazynujący energię słoneczną docierającą do nas w postaci promieniowania. Poszczególne partie tej powierzchni nagrzewają się szybciej, inne wolniej, w zależności od ciepła właściwego podłoża.

Te, które nagrzewają się wolniej (na przykład woda), mają zdolność zmagazywania większej ilości energii. Wiemy już też, że wielkość bezpośredniego promieniowania słonecznego, tego głównego źródła energii przyjmowanej przez podłoże, zależna jest od wysokości Słońca nad horyzontem oraz rodzaju podłoża. Wiedząc już o tych zależnościach, zastanowimy się teraz, co się z tą energią dzieje.

Powierzchnia ziemi zajmuje się przyjmowaniem, ale też jednoczesną emisją energii otrzymanej od Słońca. Proces ten zachodzi głównie przez wypromieniowanie innej postaci fal – długich, czyli podczerwonych. Z tego właśnie powodu w cieplarni jest ciepło – szyby przepuszczają promieniowanie widzialne oraz zdecydowaną większość nadfioletowego (głównie z zakresu fal UVA, lecz także UVB), ale gdy powierzchnia gruntu odda energię w postaci podczerwieni, szkło ją zatrzyma wewnątrz.

Przeważającą część tego wypromieniowania przyjmuje atmosfera, a właściwie jej poszczególne składniki: cząsteczki gazów zwiększającą tą drogą energię swych ruchów drgających, a u wszystkich ciał stałych obecnych w atmosferze notujemy wzrost temperatury. Szczególne znaczenie w tym procesie mają dwa gazy: **para wodna** oraz **dwutlenek węgla**. Rolę, jaką odgrywa para wodna w atmosferze, omówimy bardziej szczegółowo, gdyż jest niezwykle istotna dla procesów pogodotwórczych. Teraz kilka słów o dwutlenku węgla.

## EFEKT CIEPLARNIANY

Stwierdzono, że dwutlenek węgla spełnia szczególną funkcję w obiegu wypromieniowanego ciepła, działając jak szyba w szklarni: nie przepuszcza promieniowania podczerwonego, zatrzymując je w niższych partiach atmosfery. W ostatnim okresie jest go o wiele więcej, niż bywało wcześniej. To jest mierzalne, więc nie podlega dyskusji ani interpretacji. Bazując na takiej wiedzy, można przeprowadzić dwie odrębne drogi rozumowania.

**Wariant 1.** Wiemy, że  $\text{CO}_2$  pochodzi przede wszystkim z procesów spalania paliw kopalnych, a ludzkość w coraz większym stopniu przyczynia się do jego emisji. Jednocześnie wycinamy lasy Amazonii, które pochłaniają dwutlenek węgla. W efekcie jest go coraz więcej, zatrzymuje coraz więcej ciepła przy powierzchni; ociepla się klimat, coraz cieplejsze są wody oceanów i topnieją lodowce. Kluczem w tym toku narracji jest wzrastająca ilość dwutlenku węgla w atmosferze zatrzymująca energię ciepłą wypromienowaną przez powierzchnię ziemi. Drugim elementem jest powodowany przez nas zanik roślinności zielonej. Oba czynniki są mierzalne, a więc poza dyskusją.

O procesie fotosyntezy uczyliśmy się już w szkole podstawowej. Rośliny zielone pochłaniają  $\text{CO}_2$ , aby wyprodukować tlen. Nie myślimy jednak przeważnie o tym, że lasy to niejedyne zielone rośliny na kuli ziemskiej. Nie każdy zdaje sobie sprawę z tego, że zielone jest również w morzach i oceanach. To drobne różnorodne mikroorganizmy roślinne swobodnie unoszące się w wodzie; nazywamy je **fitoplanktonem**. Odpowiada on za ponad połowę całego procesu fotosyntezy na kuli ziemskiej.

Rozwój, a więc ilość tych mikroroślinek, zależy między innymi od dostępności zasobów odżywczych: światła potrzebnego do fotosyntezy oraz dwutlenku węgla. Tego ostatniego mamy coraz więcej, więc może teraz zacznie się lawinowo rozwijać fitoplankton i zanikać

nadmiar  $\text{CO}_2$ . Wiemy też ponadto, że wody oceanów są coraz cieplejsze, a w wyższej temperaturze fotosynteza przebiega szybciej. Ciekawe zjawisko zauważono po potężnej erupcji wulkanu Kasatochi na Aleutach. Wybuch wyrzucił wiele związków chemicznych na wysokość 11 kilometrów, a silny sztorm rozniósł te cząsteczki na odległość kilkuset mil po oceanie. Okazało się, że przyspieszyło to wzrost fitoplanktonu w tym rejonie Pacyfiku (to jest mierzalne), a ten pochłoniął ogromne ilości dwutlenku węgla (to również jest możliwe do określenia, chociaż prawdopodobnie tylko w pewnym przybliżeniu). Ten przykład wprowadza pewien dylemat do toku rozumowania.

Nie ma jednak całkowitej pewności, że to właśnie wybuch wulkanu był jedynym bądź też najważniejszym czynnikiem gwałtownego wzrostu ilości fitoplanktonu – to po pierwsze. Po drugie, nie uwzględniono wówczas ilości innych gazów, które przedostały się do atmosfery podczas wybuchu. Po trzecie wreszcie, należy zauważyć, że wszelkie badania wulkanologów prowadzone są najczęściej punktowo, a nie wielkoskalowo. To ma prawdopodobnie wpływ na dokładność wniosków bardziej ogólnych. Nie wiemy więc, jaki był prawdziwy skutek wybuchu i jego wpływ na proces cieplarniany w porównaniu z efektem nadzwyczajnego wykwitu roślinek w wodzie. Kolejne ciekawe zjawisko zanotowano w Arktyce. Badacze odkryli tam ostatnio największy jak dotychczas rozkwit fitoplanktonu pod lodem. Jest go czterokrotnie więcej niż w pobliskich wodach, które nie są pokryte powłoką lodową. Fitoplankton rozwija się znacznie szybciej pod lodem niż na wolnych wodach. Podejrzewa się, że topniejący na lodzie śnieg pozwala działać pokrywie lodowej jak szkło powiększające, dopuszczając więcej światła potrzebnego do procesu fotosyntezy. Można by było zatem stwierdzić, że prawdopodobnie topnienie śniegu pozwala na coraz większy udział fitoplanktonu w pochłanianiu  $\text{CO}_2$ , który z taką determinacją wciąż produkujemy.