

## Jaką rolę warunki atmosferyczne odgrywają w zanieczyszczeniu powietrza w regionie Antarktydy?

**Albert Krogulski**

*Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut Oceanografii  
albertkrgsk@gmail.com*

**Tutor: dr hab. Anita Lewandowska prof nadzw.**

*Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii, Instytut Oceanografii,  
Zakład Chemii Morza i Ochrony Środowiska Morskiego*

**Słowa kluczowe** – *Antarktyda, cyrkulacja atmosferyczna, klimat, zanieczyszczenie atmosfery*

Będąc położonym najdalej na południe kontynentem świata, za kołem podbiegunowym, Antarktyda od zawsze wzbudzała ludzką ciekawość. Znajduje się na niej biegun południowy, a jej powierzchnia pokryta jest okresowo do 99% czapą lodową. Jest to najzimniejszy, najbardziej suchy i wietrzny rejon świata, pozbawiony rdzennej ludności. Bytująca tam fauna i flora musi wykazać się zdolnością adaptacji do życia w trudnych warunkach.

Antarktyda została odkryta w 1820 roku podczas rosyjskiej wyprawy Fabiana Bellingshausena i Michaiła Łazariewa na statkach „Wostok” i „Mirnyj”. Jednak już wcześniej podejrzewano istnienie tego kontynentu [1]. Ze względu na warunki tam panujące, przez długi okres nie został on dobrze rozpoznany. Obecnie wielu naukowców, w tym również polskich, prowadzi badania na stacjach zlokalizowanych na Antarktydzie. Jedną z nich jest stacja Polskiej Akademii Nauk, im. Henryka Arctowskiego. Badania na niej prowadzone dotyczą m.in.: ekologii, bioróżnorodności, meteorologii, zmian klimatu czy chemii atmosfery. Spróbujmy przyrzeć się bliżej warunkom klimatycznym panującym na Antarktydzie i odpowiedzieć na pytanie, czy mogą mieć one wpływ na wielkość zanieczyszczenia atmosfery w tym rejonie globu ziemskiego?

### **Fauna i flora Antarktydy**

Antarktyda jest uboga w faunę i florę. Nam kojarzy się najczęściej z pingwinami i fokami. I faktycznie są one integralną częścią kontynentu. Jakkolwiek zwierzęta i rośliny charakterystyczne dla tej części świata skupione są głównie wokół wybrzeży. Wynika to z faktu, że tylko niewielka część obszaru Antarktydy jest wolna od lodu, co determinuje niską wydajność biologiczną [2]. Najczęściej spotykane rośliny to mchy, porosty i wątrobowce. Niewielka bioróżnorodność Antarktydy jest wynikiem niskiej temperatury i małej intensywności nasłonecznienia. W procesach fotosyntezy produkowana jest za mała ilość energii, aby mogły rozwijać się tam rozległe sieci troficzne. Niskie temperatury nie sprzyjają również wietrzeniu skał, w związku z czym uwalnianie z nich składników odżywczych i wzbogacanie w nie gleby są mocno ograniczone [2]. Nawet w tak trudnych warunkach istnieją jednak organizmy potrafiące się dobrze przystosować do życia na powierzchni lodu, bądź śniegu. Są to glony, których obecność przejawia się w postaci żółtych, zielonych i czerwonych smug, zależnie od gatunku fitoplanktonu (Ryc. 1).



Ryc. 1. Śnieg pokryty czerwonymi algami [2]

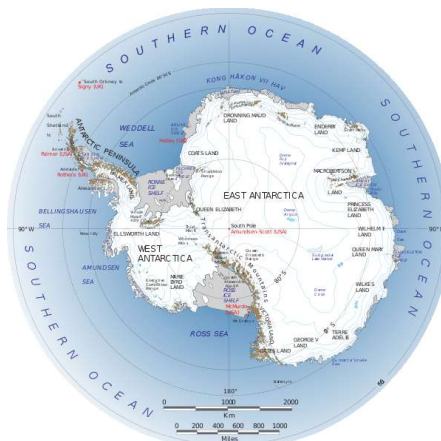
Wody otaczające Antarktydę są stosunkowo głębokie, osiągają od 4000 do 5000 metrów [3]. W przeciwieństwie do lądu, są one bardzo produktywne [2]. W Oceanie Południowym fitoplankton stanowi podstawę sieci troficznej, zamieniając w procesie fotosyntezy energię słoneczną na energię metaboliczną. Większość fitoplanktonu jest spożywana przez organizmy pelagiczne. Te, gdy umierają, opadają na dno oceanu i stają się pożywieniem dla organizmów bentosowych.

Ocean Południowy odgrywa istotną rolę w skali globalnej, w pochłanianiu dwutlenku węgla z atmosfery. W wysokich szerokościach geograficznych na półkuli południowej subarktyczny pas wód jest bardzo efektywnym odbiorcą atmosferycznego CO<sub>2</sub>. Na ten region przypada aż 35% całkowitej absorpcji oceanicznej dwutlenku węgla (Falkowska i Lewandowska, 2009). Istnieje obawa, że wzrost temperatury wody w Oceanie Południowym, wynikający z zachodzących zmian klimatu, zmniejszy skuteczność tego procesu. Wynika to z właściwości dwutlenku węgla, którego rozpuszczalność maleje wraz ze wzrostem temperatury wody. W konsekwencji w atmosferze pozostanie większa ilość CO<sub>2</sub>, przyczyniając się tym samym do dalszego wzrostu temperatury na naszym globie (Lauderdale i in., 2016).

### Ukształtowanie terenu

W krajobrazie Antarktydy dominuje lód. Jego powierzchnia zwiększa się z około 3 mln km<sup>2</sup> pod koniec lata do około 19 mln km<sup>2</sup> zimą. Grubość pokrywy lodowej Antarktydy waha się od około 2000 m do nawet 4000 m n.p.m. w centrum kontynentu. Wzrost pokrywy lodowej występuje głównie na terenach przybrzeżnych, przede wszystkim na szelfie Rossa i szelfie Ronne [3].

Gdyby na Antarktydzie nie było lodu, byłaby ona wielkim, górzystym lądem, w krajobrazie którego dominowałyby szczyty górskie. Najważniejszym pasmem są Góry Transantarktyczne, które dzielą kontynent na część wschodnią i zachodnią (Ryc. 2). Kilka szczytów osiąga wysokości ponad 4500 m n.p.m. [3].



Ryc. 2. Mapa ukształtowania terenu Antarktydy [4]

Wielka Antarktyda, inaczej zwana Wschodnią Antarktydą, zbudowana jest ze starszych skał magmowych i metamorficznych. Mała Antarktyda, tzw. Zachodnia Antarktyda, zbudowana jest z młodszych skał wulkanicznych i osadowych. Jest ona częścią obszaru aktywnego tektonicznie, tzw. Pierścienia Ognia, zlokalizowanego wokół Oceanu Spokojnego. Położona na wyspie Ross Góra Erebus jest najbardziej wysuniętym na południe aktywnym wulkanem na Ziemi [3].

### **Klimat Antarktydy i cyrkulacja powietrza**

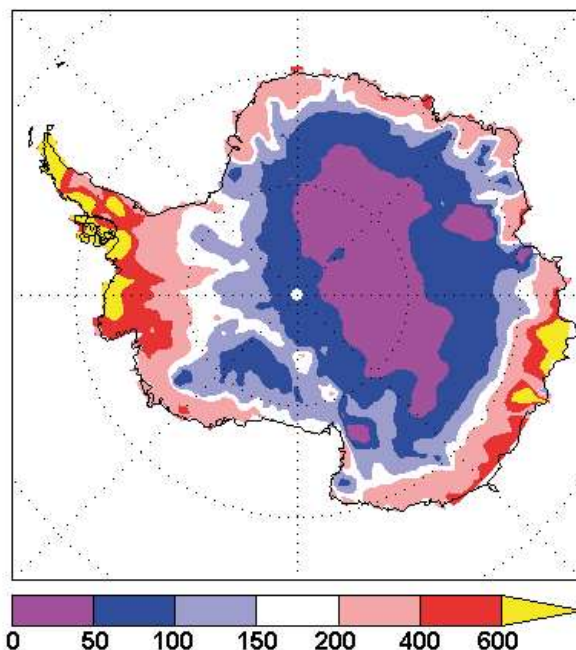
Antarktyda charakteryzuje się dużymi różnicami klimatycznymi. W głębi lądu panuje klimat bardziej kontynentalny niż na wybrzeżach.

#### **Temperatura powietrza**

Najzimniejsze i najbardziej suche obszary znajdują się w głębi lądu. Średnia roczna temperatura na kontynencie waha się od  $-10^{\circ}\text{C}$  przy wybrzeżu do  $-60^{\circ}\text{C}$  w głębi lądu. Na Antarktydzie występuje sezonowa zmienność temperatury powietrza. W głębi lądu wartości temperatury powietrza wahają się w zakresie od około  $-20^{\circ}\text{C}$  latem do  $-80^{\circ}\text{C}$  zimą. U wybrzeży amplituda temperatury powietrza jest większa ze względu na niższą szerokość geograficzną oraz położenie w bezpośrednim sąsiedztwie oceanu. Powietrze jest tutaj cieplejsze oraz bardziej wilgotne aniżeli w głębi lądu. Temperatury powietrza latem mogą dochodzić nawet do  $10^{\circ}\text{C}$ , a zimą spadają do  $-40^{\circ}\text{C}$  [5].

#### **Opady**

Powietrze nad Antarktydą jest zazwyczaj suche, a zachmurzenie nieba niewielkie. Średnia roczna suma opadów dla całej Antarktydy wynosi 166 mm (Vaughan i in., 2001). Rodzaj opadu i ich wielkość są na tym kontynencie zróżnicowane i zależne od odległości od morza. Wokół wybrzeża powietrze jest bardziej wilgotne, niebo częściej zachmurzone, a ilość opadów większa niż w głębi lądu (Ryc. 3). Opady przekraczają tu 200 mm rocznie, podczas gdy w głębi lądu roczna ilość opadów tylko sporadycznie jest wyższa od 50 mm. Najczęściej opady odnotowuje się w pobliżu Morza Bellingshausena, gdzie ich średnia roczna suma osiąga nawet 1000 mm. Charakterystycznym rodzajem opadu na Antarktydzie jest tzw. pył diamentowy, czyli opad małych kryształków lodu, powstałych w wyniku sublimacji pary wodnej [5].



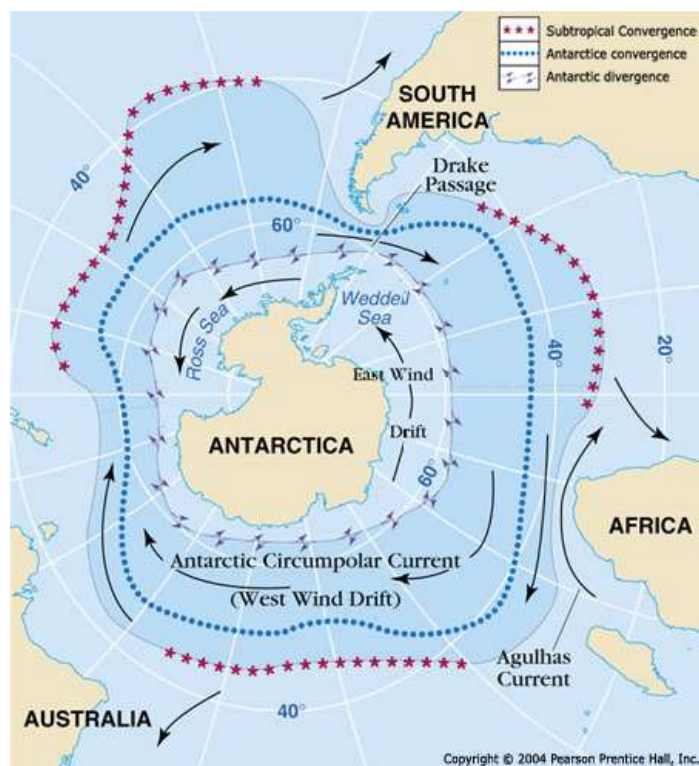
Ryc. 3. Rozkład sum rocznych opadów na Antarktydzie [mm] [6]

#### **Cyrkulacja atmosferyczna i oceaniczna**

Wielkoskalowa cyrkulacja powietrza nad Antarktydą nosi nazwę komórki polarnej. Wewnątrz kontynentu, w pobliżu bieguna, znajduje się przez znaczną część roku ośrodek wysokiego ciśnienia. Na przybrzeżnych morzach ośrodki niżowe tworzą tzw. bruzdę niskiego ciśnienia. Taki układ baryczny powoduje występowanie bardzo silnych wiatrów wiejących od bieguna do wybrzeży. Prędkość wiatrów w głębi lądu może sięgać od 50 do 90 m/s (180-325 km/h) [7].

Dzięki silnym wiatrom zachodnim, kształtującym się w komórce polarnej powstaje Antarktyczny Prąd Okolobiegunowy (ACC), będący największym prądem morskim na Ziemi (Ryc. 4).

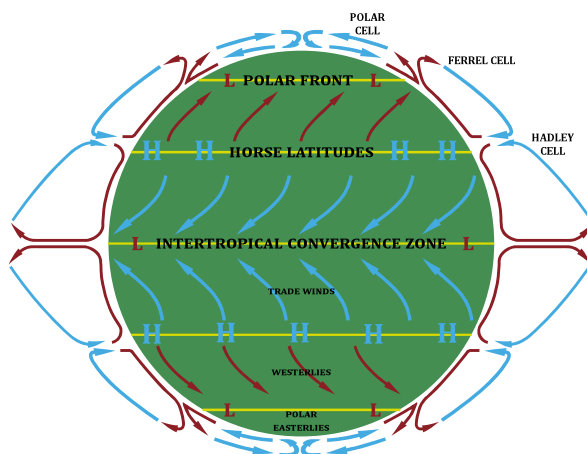
To jedyny prąd morski, który płynie wzdłuż całej naszej planety łącząc Ocean Atlantycki, Pacyfik i Ocean Indyjski. ACC powoduje ogromny przepływ wody, który działa jak bariera oddzielająca Ocean Południowy od pozostałych, położonych na północ. Prąd rozciąga się od powierzchni morza do głębokości 4000 m i może mieć ponad 190 km szerokości. Jest to bardzo zimny prąd. W zależności od pory roku, temperatura wody waha się w granicach od  $-1^{\circ}\text{C}$  do  $5^{\circ}\text{C}$  [8].



Ryc. 4. Cyrkulacja oceaniczna w rejonie Antarktydy [8].

### Źródła zanieczyszczeń nad Antarktydą i ich konsekwencje dla środowiska

Na samej Antarktydzie nie jest rozwinięte rolnictwo, ani przemysł. Głównymi źródłami zanieczyszczeń są tutaj oddalone, zurbanizowane i zindustrializowane obszary półkuli południowej, o dużej gęstości zaludnienia. Zanieczyszczenia z tych rejonów są transportowane nad Antarktydę dzięki cyrkulacji atmosferycznej i prądom oceanicznym. Ważną rolę odgrywa element ogólnej cyrkulacji atmosfery, tzw. komórka Ferrel'a, występująca na obu półkulach. W komórce tej powietrze przemieszcza się przy powierzchni ziemi w kierunku biegunów (Ryc 5).



Ryc 5. Schemat ogólnej cyrkulacji atmosfery uwzględniający komórkę Ferrel'a [10]

Zanieczyszczenia nanoszone z masami powietrza nad Antarktydę mają swoje źródło w Ameryce Południowej, w Afryce oraz w Australii. Są one wynikiem np.: pożarów lasów, emisji spalin komunikacyjnych, czy działalności przemysłowej i rolniczej. Docierając nad Antarktydę w ciągu kilku do kilkunastu godzin, wpływają na jakość wody, gleby oraz powietrza. Jednym z ważniejszych zanieczyszczeń jest czarny węgiel, powstający m.in. podczas wielkoskalowych pożarów. Wchodzi on w skład małych cząstek aerozoli i nie podlega transformacjom chemicznym w atmosferze. Transportowany w rejon Antarktydy ulega depozycji na powierzchni śniegu i lodzie, zmniejszając ich albedo, co prowadzi to do topnienia lodowców (Arizeno i in., 2017). Właściwości optyczne czarnego węgla wpływają na bilans radiacyjny w systemie Ziemia-Atmosfera. Związek ten bierze udział w semi-bezpośrednim efekcie aerozolowym. Absorbując on promieniowanie o wszystkich długościach fal, co przyczynia się do ocieplenia atmosfery, podobnie jak w przypadku CO<sub>2</sub>. W rezultacie procesu dochodzi też do odparowywania kropel chmur. Ocieplenie wywołane przez semi-bezpośredni efekt aerozolowy może częściowo rekompensować ochłodzenie wynikające z bezpośredniego efektu aerozolowego wywołanego obecnością w aerozolach takich związków, jak siarczan amonu i azotan amonu oraz węgiel organiczny (Falkowska i Lewandowska, 2009).

### **Zmiany grubości warstwy ozonowej nad Antarktydą**

Konsekwencją systematycznego zanieczyszczania atmosfery przez człowieka jest zanik warstwy ozonowej oraz globalne ocieplenie klimatu. Obecność warstwy ozonowej w stratosferze jest bardzo ważna dla życia na Ziemi. Gaz ten ma zdolność absorbowania najbardziej szkodliwej postaci promieniowania podczerwonego- UV-B. Ozon jest głównie produkowany nad równikiem, a wielkoskalowe stratosferyczne prądy powietrzne przenoszą go nad bieguny. Nad Antarktydą podczas nocy polarnej brakuje w stratosferze atomowego tlenu, gdyż nie dociera tu promieniowanie UV. Bardzo zimne powietrze (-90°C) schodzi w dół na wysokość 15-20 km i rozwija się cyrkulacja zachodnia. W ten sposób powstaje wir polarny (Falkowska i Lewandowska, 2009). Jest to układ niskiego ciśnienia, o charakterze cyklonu. Ograniczony jest on przez prąd strumieniowy, który zamyka zimne powietrze polarne w obszarze okołobiegunowym, nie pozwalając tym samym na wymianę ciepła z atmosferą w niższych szerokościach geograficznych. Powietrze wewnątrz wiru ma temperaturę poniżej -85°C, co sprzyja powstawaniu polarnych chmur stratosferycznych. Z danych NASA wynika, że zawartość ozonu w obszarze wiru jest niższa niż poza nim, ponieważ reakcje chemiczne zachodzące na powierzchni tych chmur tworzą rodniki niszczące ozon [9]. Niższe temperatury na półkuli południowej, zahamowana wymiana mas powietrza i brak produkcji ozonu sprzyjają zanikowi warstwy ozonowej w rejonie Antarktydy (Falkowska i Lewandowska, 2009).

Do zaniku warstwy ozonowej przez wiekolecia przyczyniała się również działalność ludzka, związana zwłaszcza z emisją do atmosfery freonów, obecnych w systemach chłodzących i klimatyzatorach. Ograniczenie ich użycia dzięki podpisanemu Protokołowi Montrealskiemu (1987) i Konwencji Wiedeńskiej W Sprawie Ochrony Warstwy Ozonowej (1985) już przyniosło efekt w postaci zahamowania dalszego spadku grubości warstwy ozonowej. W roku 2014 naukowcy ze Światowej Organizacji Meteorologicznej (WMO) oraz Programu Środowiskowego ONZ (UNEP) ogłosili, że powłoka ozonowa chroniąca Ziemię przed szkodliwym promieniowaniem UV po raz pierwszy od lat 80. XX wieku zaczęła się powiększać. Oszacowano, że mniej więcej w połowie obecnego stulecia warstwa ozonowa powinna wrócić do stanu z roku 1980 [9].

### **Podsumowanie**

Antarktyda, mimo, że jest bez wątpienia jednym z najczystszych rejonów świata, nie jest pozbawiona zanieczyszczeń w morzu, w atmosferze i na lądzie. Biorąc pod uwagę cyrkulację atmosferyczną i specyficzne warunki klimatyczne tam panujące, zainteresowanie naukowców tym rejonem świata w aspekcie jakości środowiska jest coraz większe. W publikacjach omawiane są zwłaszcza problemy ekologiczne, biologiczne i geologiczne. Na Antarktydzie prowadzi się obecnie także liczne badania z zakresu fizyki i chemii atmosfery. W dalszym ciągu niewiele wiemy jednak o składzie chemicznym aerozoli i opadów atmosferycznych w tym rejonie globu.

## Literatura:

- Arienzo, M. M., McConnell J. R., Murphy L.N., Chellman N., Das S., Kipfstuhl S., and Mulvaney R. 2017, *Holocene black carbon in Antarctica paralleled Southern Hemisphere climate*, J. Geophys. Res. Atmos., 122, 6713–6728, doi:10.1002/2017JD026599.
- Connolley W.M, King J.C., Mashall G.J., Mulvaney R., Vaughan D.G., 2001 *Devil in the Detail*, Science 07 Sep 2001:Vol. 293, Issue 5536, pp. 1777-1779 DOI: 10.1126/science.1065116
- Falkowska L., Lewandowska A., 2009 *Aerozole i Gazy w Atmosferze Ziemskiej – Zmiany Globalne*, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego
- Lauderdale J.M., Williams R.G., Munday D.R., Marshall D.P., 2016. *The impact of Southern Ocean residual upwelling on atmospheric CO2 on centennial and millennial timescales*, Clim Dyn (2017) 48:1611–1631, DOI 10.1007/s00382-016-3163-y
- [1][https://discoveringantarctica.org.uk/activities/antarctica\\_timeline/activity.php](https://discoveringantarctica.org.uk/activities/antarctica_timeline/activity.php) [dostęp 15 V 2018]
- [2]<https://discoveringantarctica.org.uk/ecosystems-and-foodwebs/ecosystems/biogeography-of-antarctica/> [dostęp 15 V 2018]
- [3] <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/antarctica/> [dostęp 13 V 2018]
- [4] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Antarctica.svg> [dostęp 14 V 2018]
- [5] <http://www.antarctica.gov.au/about-antarctica/environment/weather> [dostęp 14 V 2015]
- [6] [https://en.wikipedia.org/wiki/Climate\\_of\\_Antarctica#/media/File:File-Dgv-surfbal-1.gif](https://en.wikipedia.org/wiki/Climate_of_Antarctica#/media/File:File-Dgv-surfbal-1.gif) [dostęp 15 V 2018]
- [7]<https://discoveringantarctica.org.uk/oceans-atmosphere-landscape/atmosphere-weather-and-climate/regional-climate-variation-and-weather/> [dostęp 15 V 2018]
- [8] <http://polardiscovery.whoi.edu/antarctica/circulation.html> [dostęp 15 V 2018]
- [9] [https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex\\_NH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/vortex_NH.html) [dostęp 15 V 2018]
- [10]<https://content.meteoblue.com/ro/meteoscool/large-scale-weather/atmospheric-circulation> [dostęp 11 I 2019]

## Notka o Autorze

*Student trzeciego roku oceanografii, specjalność oceanografia fizyczna. Jego naukowe zainteresowania to meteorologia i GIS. Pisze pracę licencjacką o zbliżonym do eseju temacie. W wolnych chwilach uczy się języków obcych i obcuje z przyrodą jeżdżąc na rowerze i odbywając zagraniczne podróże.*