

## Skutki emisji czarnego węgla dla środowiska

Jakub Wojtaszek

Uniwersytet Gdański, Wydział Oceanografii i Geografii

E-mail: [j.wojtaszek.733@studms.ug.edu.pl](mailto:j.wojtaszek.733@studms.ug.edu.pl)

tutor: dr hab. Anita Lewandowska, prof. UG

Uniwersytet Gdański Wydział Oceanografii i Geografii

Katedra Oceanografii Chemicznej i Geologii Morza

*Słowa kluczowe: czarny węgiel, antropopresja, zmiana klimatu, konsekwencje środowiskowe*

### Wprowadzenie

Przez setki tysięcy lat Ziemia była systemem samoregenerującym się pod względem temperatury atmosfery. Charakteryzowała się okresami, w których średnia temperatura była wyższa od obecnie odnotowywanej, ale również takimi, gdy była ona niższa. Najwyższe temperatury, sięgające średnio 33-34°C, występowały we wczesnych stadiach ziemskich, tj. eocen (55 - 48 mln lat p.n.e (Hansen, 2013). Następnie, temperatura stopniowo spadała, aż do okresu ostatniego zlodowacenia, podczas którego wynosiła średnio o około 3°C mniej niż w erze industrialnej (stan na około 20 tys. lat p.n.e.) (Hansen i in., 2013). Obecnie, średnia temperatura na Ziemi wynosi 13,9°C (National Center For Environmental Information, 2023). Wszystkie zmiany zachodzące w atmosferze zapisały się także w glebie. Można je odczytać dzięki badaniom stratygraficznym, czyli nauce zajmującej się ustaleniem wieku i przyczyn rozmieszczenia skał w skorupie ziemskiej. Bada-

nia takie przeprowadzane są głównie w formie odwiertów profili skalnych (Van Wagoner i in., 2012). Dzięki nim jesteśmy w stanie dowiedzieć się, między innymi, jakie zmiany zachodziły w atmosferze w przeszłości.

Swoisty „podpis” w glebie pozostawiła także od początku swojego istnienia rasa ludzka. Początkowo były to np. pozostałości węgla po pożarach wywołanych aktywnością rolną (Bonk i in., 2022). Ta forma zapisu była oczywiście uproszczona i nieintencjonalna. Nie charakteryzowała się także znaczącą rolą dla środowiska, w negatywnym tego słowa znaczeniu. Zmianę przyniósł dopiero rok 1950, w którym naukowcy zainicjowali początek nowej epoki, tzw. Antropocenu (National Geographic Society, 2022). Epoki, w której człowiek stał się głównym „modyfikatorem” powierzchni Ziemi i jej atmosfery. Niestety już w negatywnym tego słowa znaczeniu.

Geneza pojęcia „Antropocen” przypadła na lata 50’ XX wieku i wywodzi się z okresu, w którym prowadzono próby jądrowe. Doprowadziły one do emisji do atmosfery plutonu, który był następnie transportowany z masami powietrza na dalekie odległości od źródła. W podobny sposób

następowało przenoszenie pyłów radioaktywnych po wybuchu elektrowni w Czarnobylu. Z kolei w przypadku awarii elektrowni w Fukushima zanieczyszczenia radioaktywne przenoszone były nie tylko drogą atmosferyczną, ale także wodną (Yokoyama i in., 2022). W konsekwencji dochodziło do ich odkładania się zarówno w glebie i osadach morskich, jak i w organizmach żywych. Szacuje się, że na skutek prowadzonych prób jądrowych pluton może stanowić od 1,3% do 3,8% profilu gleby piaszczystej, a w użytkach rolnych nawet od 4,4% do 5,6%. Odkładanie się plutonu w glebie jest zauważalne od lat 50' do 70' XX wieku (Zhang i in., 2021). Prowadzone badania profili koralowców w glebie pozwoliły ustalić, że w górnej części, powyżej 54 cm stężenie plutonu jest na poziomie od 0,6 do 6,5 mBq/g, podczas gdy w dolnej części nie odnotowano jego obecności w ogóle. Należy zaznaczyć, że głębokość 54 cm w profilu odpowiada dokładnie latom 50' XX wieku. W wyżej wspomnianych badaniach profili koralowce wykorzystano jako swego rodzaju biomarkery stopnia zanieczyszczenia gleby plutonem (Yokoyama i in., 2022).

Ostatnie dziesięciolecia skutkowały na świecie coraz większą emisją różnego rodzaju związków chemicznych do atmosfery. Bardzo wiele negatywnych konsekwencji dla środowiska wynika ze wzmożonej emisji dwutlenku węgla (CO<sub>2</sub>). Znacząca rola człowieka w tej kwestii datuje się na rok 1850, czyli początek rewolucji przemysłowej. Wówczas na dużą skalę zaczęto spalać paliwa kopalne (IPCC, 2022). W tamtym czasie średnie globalne stężenie CO<sub>2</sub> było na poziomie około 280 ppm. W roku 1900 wynosiło około 300 ppm, w 2000 już około 350 ppm, a w 2022 wzrosło do poziomu ponad 418 ppm (Keeling, 2023) Może się to wydawać niedużą zmianą, jednak przed erą industrialną stężenie tego gazu w powietrzu nigdy nie wzrosło tak bardzo, nawet na prze-

strzeni kilku tysięcy lat (Keeling, 2023). Dwutlenek węgla powstaje, np. podczas spalania paliw kopalnianych do celów wytwarzania ciepła i energii, użytkowania różnego rodzaju środków transportu, procesów przemysłowych oraz użytkowania gruntów rolnych (EPA, 2012). W konsekwencji wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze, odnotowuje się szereg negatywnych zjawisk w środowisku. Pośród nich najgroźniejsze jest globalne ocieplenie, prowadzące do globalnej zmiany klimatu (IPCC, 2022) oraz zakwaszanie mórz i oceanów, skutkujące zmianami w funkcjonowaniu sieci troficznej i całych ekosystemów morskich. To z kolei może przyczyniać się do strat gospodarczych (IMGW-PIB, 2020). Ludzie na całym świecie są zależni od mórz i oceanów jeśli chodzi o pożywienie, wodę, czy ochronę przed sztormami. A zatem wszelkie zaburzenia w ekosystemach morskich mogą wpływać negatywnie na te zależności (Kardaś i in., 2022).

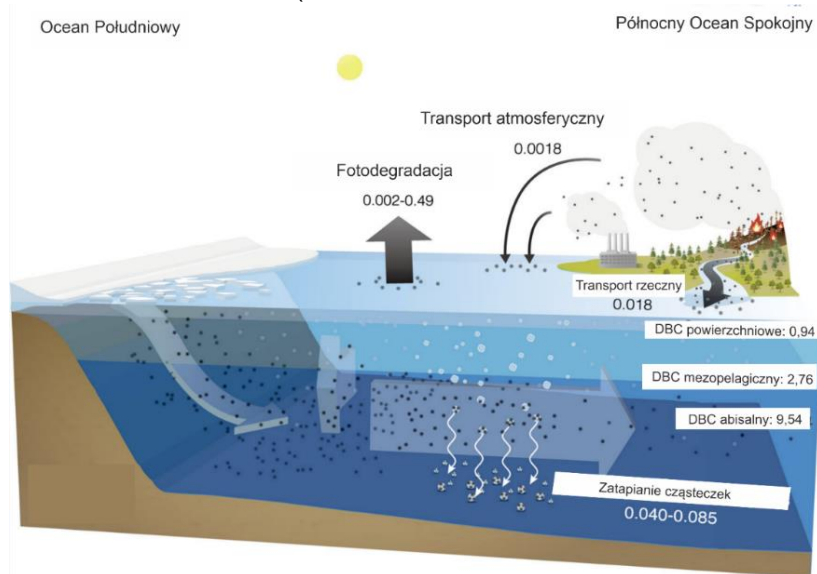
## Pochodzenie i transformacje czarnego węgla w środowisku

Biorąc pod uwagę opisane powyżej konsekwencje emisji pierwiastków promieniotwórczych i dwutlenku węgla do środowiska rodzi się pytanie, jakie jeszcze zanieczyszczenia antropogeniczne stanowią dla niego obecnie zagrożenie? Okazuje się, że działalność ludzka skutkuje również emisją aerozoli, czyli układów koloidalnych, w których gaz jest nośnikiem substancji stałych i/lub ciekłych. Przykładem składnika aerozoli o pochodzeniu antropogenicznym jest czarny węgiel (BC). BC jest złożoną mieszaniną związków. W jego składzie znajdują się: węgiel organiczny (OC), węgiel elementarny (EC) oraz inne związki, np. siarki i azotu (Long i in., 2013). W zależności od formy występowania, BC posiada odmienne właściwości fizyczne. W atmosferze występuje w pyłach zawieszonych (PM), najczęściej o średnicy do 2,5 μm (PM<sub>2,5</sub>) lub do 10 μm (PM<sub>10</sub>) (Viidanoja i in.,

2002). Dzięki temu jego czas przebywania w atmosferze wynosi od kilku do kilkunastu dni (Koelmans i in., 2006). W tym miejscu należy podkreślić różnicę między BC oraz sadzą (CB). W literaturze naukowej pojęcia te były często stosowane zamiennie. Jednak obydwie formy węgla różnią się zawartością EC. W przypadku CB węgiel elementarny stanowi do 97%, a w przypadku BC już tylko do 50% (Long i in., 2013). Dodatkowo, można się spotkać z odmiennym rozumieniem BC w kontekście jego pochodzenia ze źródeł pirogenicnych i petrogenicznych (Nakane i in., 2017). Te pierwsze odnoszą się do procesów spalania np. biomasy czy węgla (Abney i Berhe, 2018). Z kolei BC pochodzenia petrogenicznego związane jest np. z przetwarzaniem ropy naftowej (Hindersmann i Achten, 2018; Yamashita i in., 2022), Źródło pirogeniczne to na przykład sektor komunalno-bytowy, a petrogeniczne to np. transport lądowy czy morski.

Główną przyczyną emisji BC do atmosfery są: procesy niepełnego spalania paliw, np. biomasy (36% emisji BC), sektor komunalno-bytowy (25% BC), silniki z napędem Diesla (19%) oraz przemysł (19%) (Sims i in., 2015). BC charakteryzuje się wysoką ogniotrwałością, na poziomie około 3 600°C (Bond

i in., 2013) oraz zdolnością do pochłaniania promieniowania w zakresie światła widzialnego (Busseck i in., 2012). Rozpoznawany jest dodatkowo na podstawie pochłaniania promieniowania UVA i UVB, PAR oraz IR (Koelmans i in., 2006). Podczas kontaktu BC z wodą powstaje rozpuszczony czarny węgiel (DBC). Może być on transportowany wodami rzek do mórz i oceanów, a wraz z nim zaadsorbowane inne substancje chemiczne (Cooper, 2022). Frakcja DBC określaną jest również jako aromatyczna frakcja rozpuszczonego węgla organicznego (Trilla-Prieto i in., 2021). Szacuje się, że DBC stanowi od 0,1% do 7% całkowitego rozpuszczonego węgla organicznego (TOC) znajdującego w oceanach (Trilla-Prieto i in., 2021). W czasie cyrkulacji oceanicznej DBC może być uwolniony do atmosfery, gdzie z masami powietrza jest przenoszony na dalekie odległości od źródła, a następnie deponowany na powierzchni lądu/wody (Ryc. 1). Może też osadzać się w warstwie abisalnej dna morskiego, znajdującej się na głębokości od 3 do 6 tys. m p.p.m. (Sindha, 2014). Czas przebywania DBC w tej warstwie szacuje się na 2074–4148 lat (Yamashita i in., 2022).



Ryc.1. Schemat cyklu obiegu rozpuszczonego czarnego węgla (DBC) w oceanie (Yamashita i in. 2022, zmodyfikowane)

Taki sam proces transportu i depozycji w masach powietrza dotyczy BC obecnego w atmosferze w formie nierozpuszczonej (Bond i in., 2013). Także w tym przypadku może dochodzić do składowania węgla na dnie oceanu (Yamashita i in. 2022).

## Wpływ czarnego węgla na klimat i cykl obiegu wody

Stan wiedzy na temat BC jest zdecydowanie mniejszy w porównaniu do dwutlenku węgla (Koelmans i in., 2006). Na witrynie Google tematyka związana z CO<sub>2</sub> jest częściej wyszukiwana, niż ta związana z czarnym węglem (Google trends, 2023). Nie oznacza to jednak nieznaczącej roli BC dla środowiska. Wręcz przeciwnie. Na skutek jego transportu z masami powietrza, czy cyrkulacją morską/oceaniczną BC może odgrywać istotną rolę w środowisku na całej Ziemi. Może on wpływać, np. na warunki klimatyczne na wielu płaszczyznach. Absorbując promieniowanie o wszystkich długościach fali przyczynia się do ocieplenia atmosfery. Ocieplenie wywołane przez semi-bezpośredni efekt aerozolu związany z obecnością BC w atmosferze

może częściowo rekompensować ochłodzenie wynikające z bezpośredniego efektu aerozolu, ale też prowadzi do zmniejszenia ilości chmur piętra niskiego (Allen i in., 2019). Ponadto wpływa na zmianę optycznej grubości chmur i zmniejszenie wysokości opadów (Koelmans i in., 2006). Osadzenie BC na powierzchni śniegu/łodu prowadzi do zmniejszenia ich albedo. Zjawisko to jest najlepiej widoczne na obszarach pokrytych lodem w wysokich szerokościach geograficznych Ziemi (Ryc.2).

Oszacowano, że osadzenie się BC na powierzchni śniegu/łodu generuje wymuszenie radiacyjne rzędu od +0,34 do +0,6 [W/m<sup>2</sup>]. Efekt pośredni odpowiada za wymuszenie w zakresie od -0,4 do +0,2 [W/m<sup>2</sup>] (Koelmans i in., 2006). Niepewność oszacowania jest jednak znaczna. Nie ma pewności co do tego, czy cząstki BC i śniegu są wymieszane wewnątrz czy zewnątrz, ale także co do ich kształtu i rozmiarów oraz współczynnika załamania światła przez BC (IPCC, 2007). Pewnym jest natomiast, że ciemniejsza powierzchnia śniegu/łodu absorbuje promieniowanie słoneczne, a to prowadzi do jej ocieplenia i topnienia.



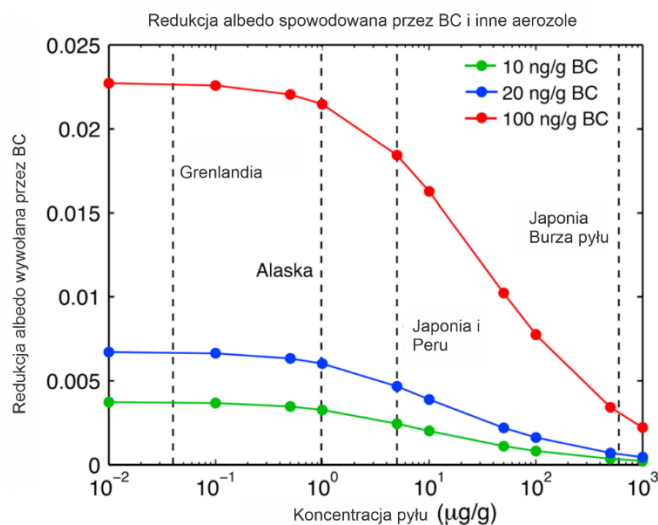
Ryc.2. Kra lodowa pokryta przez czarny węgiel (BC), (Climate and Clean Air Coalition)

Albedo śniegu na skutek pokrycia warstwy lodu ciemnym BC spada średnio o 1% do 5%, w zależności od badanego obszaru. Istnieją takie rejony, gdzie ten spadek jest wyższy. Na przykład w Arktyce na skutek pokrycia śniegu czarnym węglem albedo spadło w XX wieku o 20% (Kang i in., 2020). Wyżej wspomniany proces ma miejsce także na północnych krańcach Ameryki Północnej i Azji. Powadzi to, w skali globalnej, do podniesienia temperatury powietrza od 0,05°C do 0,20°C oraz do przyspieszenia topnienia pokrywy śnieżnej, czy lodowej. Zmiana pokrywy lodowej modyfikuje z kolei cykle topnienia lodu. Efekt ten już od lat jest wyraźnie zauważalny na Grenlandii. O ile w latach 1998–2001 w sezonie od lipca do września następowało zmniejszenie pokrycia lodem rzędu 1% - 3%, o tyle w okresie 2006–2015 spadek ten osiągał już 6,8% (Li i Flanner, 2018; Kang i in., 2020). Obszar Grenlandii nie jest jednak jedynym objętym wpływem czarnego węgla (Nagorski i in., 2019). W lipcu 2016 roku mediana tempa topnienia pokrywy lodowca Mendenhall (Ameryka Północna) wzrosła z 10 do 18 mm (Kang i in., 2020).

Na skutek osadzania się BC, topnieniu podlegają także lodowce himalajskie (Bond i in., 2013) oraz alpejskie (Kong, 2020). W przypadku lodowców himalajskich ich objętość w okresie 1984–2012 zmniejszyła się średnio o 19%. Jeżeli jednak przyjrzeć się mniejszym lodowcom, nie przekraczającym 1 km<sup>2</sup> powierzchni, ich spadek objętości wynosił nawet 43% (Muthukumara, 2021). Oszacowano, że od roku 1972 na skutek depozycji BC średnia granica lodowców himalajskich cofnęła się o 400 m (Muthukumara, 2021). Do intensyfikacji topnienia lodu do-

chodzi również w przypadku lodowców alpejskich. Średni poziom ich topnienia w latach 1914–2014 wzrósł z 15% do 19% (Gabbi i in., 2015; Kang i in., 2020).

W konsekwencji zmiany klimatu i wzrastającego stężenia BC w atmosferze, naukowcy przewidują niestety dalszy wzrost tempa topnienia lodowców (Kang i in., 2020). Zjawiska prowokowane obecnością BC w atmosferze, mimo że z założenia nie prowadzą do skutków o charakterze globalnym, są niezmiernie istotne dla środowiska. Co więcej, przenoszone z masami powietrza aerozole nie muszą się nawet charakteryzować wysokim stężeniem. Wystarczy, że są obecne w atmosferze i że wysoki jest w nich udział BC, żeby prowokować większy spadek albedo śniegu (Ryc. 3). Z kolei obecność BC w aerozolach może prowadzić do zmniejszenia pokrycia nieba chmurami od 25 do 40%. Dotyczy to zwłaszcza chmur typu cumulus (Koch i Del Genio, 2010). Wspomniany już wcześniej semi - bezpośredni efekt aerozolowy wpływa na zmianę pionowego rozkładu temperatury w atmosferze, liczbę występujących w chmurach kropelek wody i długość życia chmury (Bond i in., 2013). Proces ten może wpływać na hamowanie rozwoju chmur i zmniejszanie parowania w obszarze ich wierzchołków. Prowadzi to do zatrzymania podnoszenia się podstawy chmur. Alternatywnie, może również wzmacniać wypiętrzanie chmur piętra niskiego przez zwiększanie wilgotności ich podstawy. Dodatkowym efektem tego mechanizmu jest zmniejszenie występowania chmur piętra wysokiego (Koch i Del Genio, 2010).



Ryc.3. Redukcja albedo śniegu spowodowana osadzeniem BC w aerozolu o różnych stężeniach (Bond i in., 2013, zmodyfikowane)

## Konsekwencje emisji czarnego węgla dla człowieka

Poza ważną rolę, jaką pełni czarny węgiel w kształtowaniu klimatu i cyklu obiegu wody, posiada on również wpływ na zdrowie człowieka. BC występuje w największej proporcji w najmniejszych aerozolu, które mogą wnikać do układu oddechowego człowieka i do krwiobiegu (Yang i in., 2021). Prowadzi to do obciążenia ludzkiego organizmu i zwiększenia zachorowalności np. na astmę. W zależności od wieku i wrażliwości osoby narażonej na obecność BC we wdychanych aerozolu, śmiertelność wzrasta od 0,69% (dzieci) do 0,77% (dorośli). Ekspozycja na BC dodatkowo zwiększa o 1,77% śmiertelność na choroby sercowo-naczyniowe (WHO, 2012). Wyżej wspomniane wyniki mogą wydawać się niezbyt alarmujące, jednak szacuje się że prawie 2 mln śmierci rocznie na świecie jest związane bezpośrednio z emisją do atmosfery węgla pochodzącego z niepełnego spalania w sektorze komunalno-bytowym. W roku 2019 ilość osób, które umarły na świecie na skutek oddychania powietrzem zanieczyszczonym PM 2,5 oszacowano na około 4 miliony (State of Global air, 2023).

Jest to wynik tylko i wyłącznie dla jednego roku kalendarzowego. Jeśli jednak zestawimy się go z liczbą zmarłych podczas pandemii COVID-19, którą oszacowano na około 7 mln, jest to wynik przerażający (World Health Organization, 2023). Jeszcze większe przerażenie może budzić fakt zwiększonej śmiertelności na COVID-19 osób zamieszkujących rejon, gdzie wysoki był poziom zanieczyszczenia powietrza (Guzman, 2021).

## Podsumowanie

Stawiając czoło wszechobecnemu problemowi zanieczyszczenia środowiska powstaje myśl, czy jesteśmy w stanie przestać zatrwać samych siebie? Emisja do atmosfery, czy wody wielu związków chemicznych nie jest tylko wynikiem działalności przedsiębiorstw przemysłowych. Tak jak w przypadku BC, zależy ona od naszych codziennych decyzji. Pamiętajmy, że związki te każdego dnia prowadzą do modyfikacji w środowisku, a niektóre z nich po cichu zabijają nas w czasie. Zapewne nie da się wyeliminować całkowicie emisji BC. Jego część jest bowiem konsekwencją procesów spalania zachodzących

podczas obróbki pokarmu na uboższych obszarach, gdzie brakuje infrastruktury alternatywnej do wykorzystania węgla. Jednak jako społeczność tego globu powinniśmy szukać rozwiązań dla ograniczenia emisji do środowiska takich związków, jak czarny węgiel. Decydując się na zakup auta, możemy na przykład unikać pojazdów z silnikami Diesla. Możemy też, a wręcz powinniśmy, zmniejszyć do minimum wykorzystanie samochodów, np. decydując się na transport rowerem lub siecią komunikacji miejskiej. W naszym codziennym życiu możemy także starać się unikać węgla lub drewna na cele grzewcze, czy produkcję energii. Poza tym na pewno istnieje dalsza potrzeba prowadzenia na świecie badań naukowych nad czarnym węglem. Temat ten nie jest w pełni rozpoznany, a opracowania naukowe zawierają więcej pytań niż odpowiedzi. Ponadto ważnym wydaje się przekazywanie szerokiej wiedzy o czarnym węglu i jego właściwościach przeciętnym mieszkańcom naszego globu. Znając konsekwencje, jakie związek ten generuje dla zdrowia ludzkiego i klimatu. być może choć niektórzy z nas ograniczyli by jego emisję do atmosfery.

## Literatura:

- Abney B. R., Berhe A. A., 2018, *Pyrogenic Carbon Erosion: Implications for Stock and Persistence of Pyrogenic Carbon in Soil*, *Front. Earth Sci.*, 20 March 2018Sec. BiogeoscienceVolume 6 – 2018, <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00026>
- Allen, R.J., Amiri-Farahani, A., Lamarque, J.F., *Observationally constrained aerosol–cloud semi-direct effects*, *Clim Atmos Sci* 2, 16 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0073-9>
- Bonk A., Słowiński M., Żarczyński M., Oliński P., 2022, *Tracking fire activity and post-fire limnological responses using the varved sedimentary sequence of Lake Jaczno, Poland*, <https://doi.org/10.1177/09596836221080755>
- Busseck R. R., Adachi K., Gelencser A. i Tompa E., Posfai M., 2012, *Are black carbon and soot the same?*, <https://doi.org/10.5194/acpd-12-24821-2012>
- Climate and Clean Air Coalition, 2023, *Black Carbon*, <https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/black-carbon>
- Cooper W. L., 2022, *Measuring dissolved black carbon in water via aqueous, inorganic, high-performance liquid chromatography of benzenepolycarboxylic acid (BPCA) molecular markers*, doi: 10.1371/journal.pone.0268059
- Gabbi J., Huss M., Bauden A., Cao F., Schwikowski M., 2015, *The impact of Saharan dust and black carbon on albedo and long-term mass balance of an Alpine glacier*, <https://doi.org/10.5194/tc-9-1385-2015>,
- Google trends, 2023, <https://trends.google.com/trends/explore?date=today%205-y&q=Black%20carbon,CO2&hl=pl>, [dostęp: 13.09.2023]
- Guzman, M.I., 2021. *An overview of the effect of bioaerosol size in coronavirus disease 2019 transmission*. *Int. J. Health Plann. Manag.* 36, 257–266
- Hansen J., Sato M., Russel G., Kharecha P., 2013, *Climate sensitivity, sea level and atmospheric carbon dioxide*, <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0294>
- Hindersmann B., Achten C., 2018, *Urban soils impacted by tailings from coal mining: PAH source identification by 59 PAHs, BPCA and alkylated PAHs*, *Environmental Pollution*Volume 242, Part B, 1217-122, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.0145>
- IMGW-PIB, 2020, *IMGW-PIB: Zakwaszenie oceanów i morz wzrasta*, <https://imgw.pl/wydarzenia/imgw-pib-zakwaszenie-oceanow-i-morz-wzrasta>, [dostęp: 21.06.2023]
- IPCC, 2022, *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the*

- Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change 2022*, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926, Climate & Clean Air Coalition, Black Carbon, <https://www.ccacoalition.org/en/slcp/bs/black-carbon>, [dostęp: 08.04.2023]
- Kang S., Zhanga Y., Qian Y., Wang H., 2020, *A review of black carbon in snow and ice and its impact on the cryosphere*, <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2020.103346>
- Kardaś A., Sierpińska A., 2022, *Jak zmiana klimatu wpływa na nasze życie? Druga część raportu IPCC*, <https://naukaoklimacie.pl/aktualnosci/jak-zmiana-klimatu-wplywa-na-nasze-zycie-druga-czesc-raportu-ipcc/>, [dostęp: 19.03.2023]
- Keeling R., 2022, *Keeling curve*, <https://keelingcurve.ucsd.edu>, [dostęp: 20.06.2023]
- Koch D., Del Genio D. A., 2010, *Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis* Atmos. Chem. Phys., 10, 7685–7696, doi:10.5194/acp-10-7685-2010
- Koelmans A. A., Jonker M. T. O., Cornelissen G., Bucheli D. T., Van Noort P. C. M., Gustafsson O., 2006, *Black carbon: The reverse of its dark side*, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.034>
- Li Y., Flanner G. M., 2018, *Investigating the impact of aerosol deposition on snowmelt over the Greenland Ice Sheet using a large-ensemble kernel*, <https://doi.org/10.5194/acp-18-16005-2018>
- Long M. C., Nascarella A. M., Valberg A. P., 2013, *Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions*, Cambridge
- Long M. C., Nascarella A. M., Valberg A. P., 2013, *Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions*, Cambridge
- Muthukumara M., 2021. *Glaciers of the Himalayas: Climate Change, Black Carbon, and Regional Resilience*, South Asia Development Forum. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-0099-3
- Nagorski A. S., Kaspari D. S., Hood E., Fellman B. J., McKenzie Skiles S., 2019, *Radiative Forcing by Dust and Black Carbon on the Juneau Icefield, Alaska*, <https://doi.org/10.1029/2018JD029411>
- Nakane M., Ajika T., Yamashita Y., 2017, *Distribution and Sources of Dissolved Black Carbon in Surface Waters of the Chukchi Sea, Bering Sea, and the North Pacific Ocean*, Hokkaido University, Sapporo, Japan, <https://doi.org/10.3389/feart.2017.00034>
- National Geographic Society, 2022, *Anthropocene*, <https://education.nationalgeographic.org/anthropocene>, [dostęp: 23.05.2023]
- NOAA National Centers for Environmental Information, 2023, *Monthly Global Climate Report for Annual 2022*, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>, [dostęp: 16.06.2023]
- Sims R., Gorsevski V., Anenberg S., 2015, *Black carbon mitigation and the role of the global environment facility*
- Sindha S., 2014, *abyssal plain*, Britannica, data dostępu: 09.07.2023, <https://www.britannica.com/science/abyssal-plain>
- State of Global Air, 2023, *Health Impacts of PM2.5 Fine-particle outdoor air pollution is the largest driver of air pollution's burden of disease worldwide*. [dostęp: 19.07.2023], <https://www.stateofglobalair.org/health/pm#major-impacts>
- Trilla-Prieto N., Vila-Costa M., Casas G., Jiménez B., Dachs J., 2021, *Dissolved Black Carbon and Semivolatile Aromatic Hydrocarbons in the Ocean: Two Entangled Biogeochemical Cycles?*



- <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00658>
- United States Environmental Protection Agency, 2012, *Report to Congress on Black Carbon*, <https://www3.epa.gov/airquality/blackcarbon/>
- United States Environmental Protection Agency, 2023, *Overview of Greenhouse Gases*, <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#carbon-dioxide>, [dostęp: 21.06.2023]
- Van Wagoner J. C., Posamentier H. W., Mitchum R. M., Vail P. R., Sarg J. F., Loutit T. S., Hardenbol J., 2012, *An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions*, Exxon Production Research Company, P.O. Box 2189, Houston, Texas
- Viidanoja J., Sillanpää M., Laakia J., Kerminen V., Hillamo R., Aarnio P., Koskentalo T., 2002, *Organic and black carbon in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>: 1 year of data from an urban site in Helsinki, Finland*, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00205-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00205-4)
- World Health Organization, 2012, *Health effects of black carbon*,
- World Health Organization, 2023, *WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard*, [dostęp: 19.07.2023], <https://covid19.who.int>
- Yamashita Y., Nakane M., Mori Y., Nishioka Y., Ogawa H., 2022, *Fate of dissolved black carbon in the deep Pacific Ocean*, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-27954-0>
- Yang J., Javad Zare Sakhvidi M., de Hoogh K., Vienneau D., Siemiatyck J., Zins M., Goldberg M., Chen J., Lequy E., Jacquemin E., 2021, *Long-term exposure to black carbon and mortality: A 28-year follow-up of the GAZEL cohort*, Environment International, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106805>
- Yokoyama Y., Tims S., Froehlich M., Hirabayashi S., Aze T., Fifield L. K., Koll D., Miyairi Y., Pavetich S., Kuwae M., 2022, *Plutonium isotopes in the North Western Pacific sediments coupled with radiocarbon in corals recording precise timing of the Anthropocene*, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14179-w>
- Zhang W., Hou X., Zhang H., Wang Y., Dang H., Xing S., Chen N., 2021, *Level distribution and sources of plutonium in the north-east and north China*, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117967>

Notka o autorze: *Jakub Wojtaszek jest studentem trzeciego roku studiów licencjackich na kierunku Geografia Wydziału Oceanografii i Geografii na Uniwersytecie Gdańskim. Na co dzień interesuje się zmianami warunków pluwialnych w Polsce w obliczu zmiany klimatu. Obecnie rozszerza swoje zainteresowania o wpływ zanieczyszczeń na środowisko i trendy z tym związane.*