

Krótką historia węgla

Agnieszka Szostok

Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

E-mail: a.a.szostok@gmail.com

tutorzy: dr Karolina Sobecka^a, mgr Michał Piasecki^b

^aUniversity of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland, Academy of Art and Design

^bUniwersytet Warszawski, Instytut Kultury Polskiej

Słowa kluczowe: węgiel, cykl, obieg, zmiana klimatu, symbiocen

Węgiel jako pierwiastek odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu naszej planety. Prześledzimy drogę jak jego atomy powstawały miliardy lat temu, brały udział w powstaniu Ziemi oraz stanowiły podstawę życia na naszej planecie. Naturalny obieg węgla w przyrodzie kształtował się przez miliony lat, regulując klimat i ekosystemy. Wszystko zmieniło się wraz z nadejściem epoki industrialnej. Spalanie paliw kopalnych i inne przeobrażenia będące udziałem cywilizacji całkowicie zmieniły cykl węgla w przyrodzie i wywarły wpływ na każdy element funkcjonowania planety. Kilka kart z historii węgla pozwala prześledzić przeszłość Ziemi i zerknąć w scenariusze zmian.

Ciepło – pojęcie pełne znaczeń

Myśląc o cieple, w głowie pojawiają się różnorodne obrazy – ciepło rodzinnego domu, promienie słońca w letni dzień, żar ogniska.

Współcześnie „ciepło” to już nie tylko indywidualne doświadczenie – to również temat globalnej rozmowy. Wiele się słyszy o zmianach klimatu, roli gazów cieplarnianych oraz paliwach kopalnych. Za wymienionymi tematami kryje się niepozorna cząsteczka węgla. Pierwiastek chemiczny o symbolu C i liczbie atomowej 6 ma niebywałe znaczenie dla losów naszej planety i nas samych. Może być jednocześnie najtwardszym znanym materiałem – diamentem, jak i miękkim wypełnieniem ołówków – grafitem. Oprócz tych najbardziej znanych występuje w wielu innych odmianach alotropowych, takich jak grafen, fulereny, nanorurki czy karbin, przybierając przy każdej z nich inne fascynujące właściwości. A co najistotniejsze z naszej perspektywy stanowi podstawowy budulec życia na Ziemi (Lide, 2007).

Narodziny węgla

W pierwszych minutach istnienia Wszechświata powstały przede wszystkim lekkie pierwiastki tj. H, He, Li, Be. Natomiast węgiel powstał w masywnych gwiazdach drugiej generacji w procesie zwanym „Potrójnym procesem α ”, gdzie z trzech jąder helu 4He powstaje jedno jądro węgla 12C . Gdy takie gwiazdy umierały gwałtowną, spektakularną

eksplozją wyprodukowany w nich węgiel był wyrzucany w przestrzeń kosmiczną. Częsteczki pochodzące z takich eksplozji stworzyły obłoki gazów i pyłu będące zaczątkiem mgławic pyłowych, z których zrodziły się nowe gwiazdy. Około 4,6 miliarda lat temu z takiej mgławicy powstał Układ Słoneczny (Lodders, 2003). W trakcie formowania planet materia z mgławicy zaczęła się skupiać w zarodki planet. Węgiel uległ uwięzieniu w jądrze i płaszczu Ziemi w postaci rozpuszczonych związków C, a także w skałach płaszczu i skorupy ziemskiej. Część węgla została wydobyta na powierzchnię przez wulkanizm, głównie jako dwutlenek węgla, który trafił do pierwotnej atmosfery Ziemi (Dasgupta, 2013). Niektóre związki węgla, szczególnie złożone cząsteczki organiczne (np. aminokwasy), mogły zostać dostarczone na młodą Ziemię przez meteoryty i komety (Martins, 2008).

Fundament życia: węgiel

Historia węgla na Ziemi otworzyła nowy rozdział wraz z rozwojem życia. Najstarsza znana ziemska materia pochodzenia biogenicznego to grafit w przeobrażonych skałach osadowych z zachodniej Grenlandii, która datowana jest na 3,7 miliarda lat (Ohtomo i in., 2014). Węgiel tworzy cztery silne wiązania kowalencyjne, co pozwala mu łączyć się z innymi atomami (H, O, N, S, P) w złożone, stabilne struktury. Dzięki temu może tworzyć łańcuchy, pierścienie, rozgałęzienia, będące podstawami aminokwasów, cukrów, lipidów oraz kwasów nukleinowych (DNA, RNA) (Alberts, 2014). Węgiel jest dosłownie wdrukowany w nasze DNA. Żaden inny pierwiastek nie dorównuje węglowi różnorodnością i elastycznością wiązań przy zachowaniu stabilności cząsteczek (Smith, Morowitz, 2016). W eksperymentach (np. Miller-Urey, 1953)

pokazano, że z mieszaniny prostych gazów zawierających węgiel (CH_4 , CO_2) mogą powstawać aminokwasy i inne związki życia (Miller, 1953). Węgiel umożliwił powstanie tzw. pierwszych układów samopowielających się (hipoteza RNA) (Orgel, 2004).

Węgiel stanowił zatem zaczyn życia na naszej planecie i stanowi po dziś dzień jej szkielet, co najwyraźniej widać analizując jego cykl w przyrodzie. Cykl biogechemiczny węgla opisuje obieg atomów węgla pomiędzy atmosferą, hydrosferą, biosferą i litosferą. Zaczniemy od fotosyntezy. Rośliny, glony i cyjanobakterie pobierają dwutlenek węgla z atmosfery i wykorzystując energię słoneczną przekształcają go w związki organiczne np. glukozę (wzór sumaryczny glukozy to $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$). Węgiel trafia więc do biomasy. Następnie kolejne organizmy np. zwierzęta rozkładają materię organiczną w procesie oddychania komórkowego, którego produktami są m.in. energia i dwutlenek węgla. Część węgla wraca więc do atmosfery, natomiast część jest wbudowywana w ciała kolejnych organizmów łańcucha pokarmowego. Węgiel może zostać przekształcony w ciało danego organizmu (np. konsumenta), lub zostać martwą materią organiczną i w końcu trafić do wody, gleby lub atmosfery. Następnie martwa materia organiczna może być wykorzystana przez detrytosożerców¹ lub w inny sposób ulec rozkładowi do substancji nieorganicznych. Ilość rozłożonej martwej materii organicznej zależy od ekosystemu (Alberts, 2014). W większości gleb uwalnianie węgla do atmosfery równoważy jego coroczne odkładanie. Wyjątkiem są torfowiska, na których ze względu na wysoki poziom wód gruntowych nie ma dostępu powietrza do głębszych warstw gleby. W takich warunkach część obumarłej

¹ detrytosożercy to organizmy odżywiające się nierozłożoną, martwą materią organiczną tzw. detrytusem

materii się nie rozkłada, tylko akumuluje powodując odkładanie pokładów torfu (Dunne, 2021).

Martwa materia i geologiczna historia węgla

Proces detrytus obumarłych roślin, zwierząt, mikroorganizmów zmieniał się znacznie w różnych epokach geologicznych Ziemi. Zależał różnorodnie w zależności od składu atmosfery, obecności lub braku organizmów rozkładających czy warunków klimatycznych. Archaik i wczesny proterozoik (4,0–2,0 mld lat temu) to okres atmosfery beztlenowej i dominacja fermentacji beztlenowej, co sprawiło, że materia organiczna rozkładała się powoli i częściowo ulegała sedymentacji w osadach, tworząc prekursorzy ropy i łupków bitumicznych (Canfield, 2005).

Kolejnym ciekawym pod tym względem okresem w dziejach Ziemi był karbon trwający ok. 359–299 mln lat temu. Planetę pokrywała bujna roślinność. Dominowały widłaki, skrzypy i paprocie, często o pokrojach drzewiastych. Kluczowym budulcem tych roślin była lignina, która umożliwiła roślinom „podbicie” ładu i osiągnięcie dużych rozmiarów. Lignina wbudowana w ściany komórkowe nadaje twardość oraz odporność na zginanie. Umożliwiło to ewolucję drzew i złożonych lasów oraz odegrało kluczową rolę w ewolucji ekosystemów lądowych. Rośliny „wynały” ligninę... tymczasem „dział” odpowiedzialny za „rozkładanie materii organicznej” niejako „zaspał”. W okresie karbonu bakterie i grzyby nie potrafiły jeszcze efektywnie rozkładać ligniny. Brakowało enzymów takich jak ligninazy i peroksydazy manganowe, które pojawiły się znacznie później. Tak, więc, martwa biomasa bogata w ligninę nie ulegała rozkładowi, gromadziła się w bagniskach i tworzyła pokłady węgla kamiennego (Floudas, 2012). Dopiero w późnym karbonie do permu (około 290 mln lat temu)

pojawiły się grzyby białozgnilne, które położyły kres tak masowej ilości powstających torfowisk i pokładów węgla (Eastwood, 2011) (Gadd, 2007).

Węgiel w ruchu: oceany, wulkany i skały

Cykl węgla to nie tylko organizmy żywe. To także wulkanizm, wietrzenie skał, subdukcja i metamorfiz (węgiel z osadów może być ponownie uwalniany do atmosfery podczas przemian skał). Ważnym elementem są także oceany. Pochłaniają dwutlenek węgla z atmosfery. Prądy morskie natomiast transportują węgiel między warstwami wody, np. Z powierzchni do głębin. W atmosferze zachodzą reakcje fotochemiczne z udziałem promieniowania słonecznego, a gleba stanowi ogromny magazyn węgla (Schlesinger i Bernhardt, 2013).

Niedawno (biorąc za skalę długość życia naszej planety) na scenę cyklu dwutlenku węgla wdarł się jeszcze jeden aktor – człowiek, zakłócając cykl węgla w przyrodzie. Ludzkość stworzyła własny „podcykl” węgla opierający się na spalaniu paliw kopalnych. Nastąpiło „uaktywnianie” tej części węgla, która pozostawała poza cyklem (zgromadzona pod powierzchnią Ziemi). Drugą składową naszego „podcyklu” to blokowanie przyrody w wychwytywaniu dwutlenku węgla, polegające na przykład na wylesianiu i degradacji lasów, zmianie użytkowania ziemi, urbanizacji oraz trwałe pokrywanie gruntu materiałami nieprzepuszczalnymi, jak beton czy asfalt [1]. To nowy trybik dodany do węglowego zegara. Nowy element zmienia jednak tryb całego mechanizmu, a przez to wpływa na każdy element planety. Warto więc przyjrzeć się temu, co zaburzenie cyklu węgla oznacza dla niektórych z nich...

... dla Ziemi jako planety

Nowy „trybik” w cyklu węgla istotnie wpływa na funkcjonowanie całej planety jako systemu powiązanych ze sobą zjawisk. Najszerzej omawianym zjawiskiem są zmiany klimatu. Więcej węgla w atmosferze (w formie CO₂) oznacza ocieplenie, topnienie lodowców, mniej białych powierzchni odbijających światło słoneczne, a więcej skał lub innych powierzchni nagrzewających się pod jego wpływem, a co za tym idzie jeszcze większe ocieplenie planety. To przykład dodatniego sprzężenia zwrotnego. Jak w efekcie domino – nowy trybik w cyklu węgla pchnął jedną kostkę, a ona kolejne. Istnieją także ujemne sprzężenia zwrotne, powodujące obniżenie temperatury. Pozostając przy metaforze domino, warto podkreślić, że nie wiemy, w jaki wzór układają się kostki, co więcej, nie wiemy, jak będą na siebie wpływać. Wiemy jednak, że sprzężenia są nieliniowe – mała zmiana może prowadzić do dużej reakcji systemu. Wiele ze sprzężeń zwrotnych jest słabo poznanych lub trudnych do modelowania, a w najgorszym scenariuszu mogą prowadzić do tzw. punktów krytycznych. Są to granice, po przekroczeniu których analizowany element np. system klimatyczny zaczyna się gwałtownie i często nieodwracalnie zmieniać [1] (Steffen i in., 2018). To jak przewrócenie domina: wystarczy lekki impuls, a cały łańcuch rusza sam i nie da się go już zatrzymać. Dla planety jako systemu nowy trybik w mechanizmie oznacza więc popchniecie w stronę, której nie jesteśmy w stanie przewidzieć.

... dla życia na Ziemi

Zaburzenie równowagi systemu planety oznacza konsekwencje dla biosfery. Życie na naszej planecie mogło powstać i się rozwijać właśnie dzięki przyjaznemu i stabilnemu klimatowi. Obecne tempo jego zmian, zakwa-

szenia oceanów, utraty siedlisk i wzrost stężenia zanieczyszczeń prowadzi do masowego wymierania. Warto podkreślić, że jest to szósta taka okoliczność w historii Ziemi. Pięć poprzednich razy biosfera zdołała wyjść z bezpośredniego zagrożenia zagładą, więc prawdopodobnie i tym razem przetrwa. Za każdym poprzednim razem większość gatunków wymierała i życie odradzało się w innej odsłonie. Wielkie wymierania szczególnie dotkliwie dotyczą organizmy z wyższego rzędu troficznego. Dzieje się tak dlatego, że drapieżniki wyższego rzędu są silnie zależne od stabilności całego ekosystemu i potrzebują dużych ilości energii oraz rozbudowanej sieci pokarmowej, która łatwo się załamuje przy zaburzeniach u podstaw (Barnosky, 2011). Przy obecnym wielkim wymieraniu na samym szczycie łańcucha pokarmowego jest człowiek, więc scenariusz może nie być dla nas zbyt łaskawy a dla życia jako fenomenu...

Gdy życie masowo ginie, zaczyna się proces reorganizacji biosfery. Pojawiają się nowe formy życia – często bardziej odporne, inaczej wyspecjalizowane, lepiej przystosowane do nowych warunków, a także... nowe czuby łańcuchów pokarmowych. Po każdym wielkim wymieraniu biosfera „odzyskuje równowagę”, ale na nowo – z nowymi gatunkami, ekosystemami, klimatem (Ceballos i in., 2015). Tak więc życie na Ziemi już przeżywało masowe katastrofy, i pewnie przetrwa także obecny kryzys, ale może już bez nas na pokładzie. Tak, więc nowy trybik w cyklu węgla dla życia na Ziemi oznacza zmiany, być może katastrofalne, gdzie człowiek i ważne dla niego gatunki już niekoniecznie odegrają główne role.

... dla cywilizacji i gatunku człowieka

Teraz oderwijmy się na chwilę od biologii i ekosystemu. Wyobraźmy sobie, że nie podlegamy takim samym prawom jak inne istoty. Bo to właśnie umożliwił nam ów „podcykl” węgla. Znaleźliśmy się w śnie poza prawami

natury. Spalanie materii życia z dawnych epok – węgla, ropy, gazu – pozwoliło człowiekowi wymknąć się poza krepujące ramy ekosystemu. Wszystko zaczęło się od epoki przemysłowej – spalanie węgla i innych paliw kopalnych pozwoliło uwolnić energię zakumulowaną przez miliony lat. Poprzednie cywilizacje żyły tylko dzięki energii słońca, która docierała w trakcie ich życia, my dokopaliliśmy się, dosłownie, do energii, która trafiła na Ziemię przed milionami lat i została wbudowana przez dawne organizmy w swoje ciała. Nauka i technologia zaczęły rosnać wykładniczo. Wkroczyliśmy w epokę poznawania DNA, eksploracji kosmosu i tworzenia Internetu, sztucznej inteligencji. Nastąpiła eksplozja populacji i globalizacja. Dzięki taniej energii powstały globalne miasta, transport, medycyna, podwoiła się długość życia (Smil, 2017). Dla cywilizacji nastąpił niewyobrażalny skok w wielu aspektach, ale nowy trybik w cyklu węglowym przyniósł także załamanie w kwestiach społecznych i środowiskowych. Wydaje się, że nasza cywilizacja jest jak olbrzym naszpikowany technologią (zgodnie z prawami postępu), stojący jednak na glinianych nogach. Jedna to społeczność, które wydaje się nieprzygotowane do ciężaru, które przynoszą nowe technologie. Druga to środowisko. Nadal jesteśmy zależni od Ziemi, jedyne miejsce w znanym nam obecnie wszechświecie, gdzie możemy żyć (Steffen i in., 2015). A mimo to beztrąsko traktujemy granice jej wytrzymałości.

Namysł nad tym, co przemiany w cyklu węgla oznaczają dla cywilizacji i gatunku *Homo sapiens* moglibyśmy jeszcze długo kontynuować. Eksplozja cywilizacji wprowadziła wiele przełomów i otworzyła mnóstwo furtek. Świat przyspieszył. Epoki, które kiedyś trwały setki lat, zaczęły następować po sobie dekada po dekadzie. Paliwa kopalne pozwoliły zintensyfikować rozwój ludzkości. Warto jednak wrócić do głównego wątku: procesy, które uruchomiliśmy w kontekście przemian

węgla podlegają prawom głównego cyklu węgla. Chodzi o to, że paliwa kopalne się skończą, a być może nasze funkcjonowanie na Ziemi zostanie „zweryfikowane” w momencie uruchomienia punktów krytycznych. Nie jesteśmy samowystarczalni, w krytyczny sposób zależąc od wielu innych istot – nie tylko naszego gatunku, ale także wielu stworzeń pozaludzkich. Zrozumienie tego prowadzi do idei symbiocenu – epoki wzajemnych powiązań i współistnienia, w której człowiek nie stawia się ponad naturą, lecz uznaje się za jej część. W symbiocenie każda forma życia, niezależnie od gatunku, uznawana jest za współtwórcę wspólnego świata – sieci powiązań, w której dobrostan jednych zależy od dobrostanu wszystkich.

Zaburzenie cyklu węgla oznacza, więc, dla cywilizacji i gatunku ludzkiego tyle, że pomimo tymczasowych sukcesów cywilizacyjnych koniec końców podlegamy prawom, które rządzą planetą od milionów lat.

...na jednostki

To wszystko wydaje się tak dalekie i niewyobrażalne – system klimatyczny, dzieje życia na Ziemi, nawet cywilizacja. Warto wrócić na chwilę do czegoś namacalnego i bliskiego. Spójrzec z Własnej perspektywy. Rozjrzyjmy się i wyobraźmy sobie, że każdy przedmiot na który patrzymy znika, jeśli jest w jakimś stopniu powiązany z paliwami kopalnymi. Pierwsze pewnie znikają rzeczy z tworzyw sztucznych, pochodne ropy naftowej. Dalej metal i szkło, przecież żeby je przetopić trzeba wykorzystać odpowiednie paliwo. A rzeczy z drewna? Gdzieś musiano ścinać drzewo i je przetransportować. Nagle świat staje się nagi... tak jak my – w końcu ubrania to suma przebytych kilometrów, często z drugiego końca świata, a tkaniny zresztą nierzadko zawierają domieszki sztucznych materiałów. Nawet wzięcie kęsa do ust (żywność to nawozy sztuczne, transport, chłodnie i opakowania) czy łyka wody

(z plastikowej butelki czy wody z kranu, która przepłynęła kilometrami polietylenowych rur) nie może obejść się bez wykorzystania paliw kopanych. (Yergin, 2011).

Podejdźmy jeszcze bliżej. Spójrzmy na nasze ciało. Węgiel stanowi około 18% masy ciała człowieka (Davey, 2023). Przy wadze 70 kg daje to około 12,6 kg tego pierwiastka. Obecnie może troszkę więcej bo każdy z nas doprawiony jest szczyptą mikroplastiku (Myridakis, 2025). Węgiel to nie tylko kilogramy budulca stanowiącego nasz organizm, to też przepis na to jacy jesteśmy. Nasz kolor oczu, grupa krwi, cechy twarzy – to wszystko koduje węgiel wraz z innymi pierwiastkami w DNA. To instrukcja budowy i działania organizmu. Ważąc ok. 70 kg zawieramy ponad 600 kwadrylionów miliardów atomów węgla. A każdy z tych atomów powstał miliardy lat temu, w procesach opisanych powyżej.

Literatura:

- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Morgan, D., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2014). *Molecular Biology of the Cell* (6th ed.). Garland Science.
- Barnosky, A. D., et al. (2011). Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, 471, 51–57. DOI: 10.1038/nature09678.
- Canfield, D. E. (2005). The early history of atmospheric oxygen: homage to Robert M. Garrels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, 1–36.
- Dasgupta, R. (2013). Ingassing, storage, and outgassing of terrestrial carbon through geologic time. *Geochemical Perspectives*, 2(3), 379–407, DOI:10.2138/rmg.2013.75.7
- Davey, R. (n.d.). What chemical elements are found in the human body? News-Medical.net. <https://www.news-medical.net/life-sciences/What-Chemical-Elements-are-Found-in-the-Human-Body.aspx> [dostęp: 2021.05.19].
- Eastwood, D. C. et al. (2011). The plant cell wall-decomposing machinery underlies the functional diversity of forest fungi. *Science*, 333(6043), 762–765. DOI: 10.1126/science.1205411
- Floudas, D. et al. (2012). The Paleozoic origin of enzymatic lignin decomposition reconstructed from 31 fungal genomes. *Science*, 336(6089), 1715–1719. DOI: 10.1126/science.1221748
- Gadd, G. M. (2007). Geomycology: biogeochemical transformations of rocks, minerals, metals and radionuclides by fungi, bioweathering and bioremediation. *Mycological Research*, 111(1), 3–49. DOI: 10.1016/j.mycres.2006.12.001
- Lide D. R. (2007), *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, wyd. 88, Boca Raton: CRC Press, s. 4–56, ISBN 978-0-8493-0488-0
- Lodders, K. (2003). Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements. *The Astrophysical Journal*, 591, 1220–1247. DOI 10.1086/375492
- Martins, Z. et al. (2008). Organic chemistry of carbonaceous meteorites. *Space Science Reviews*, 138(1), 331–348. DOI:10.2113/gselements.7.1.35
- Miller, S. L. (1953). Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions. *Science*, 117(3046), 528–529. DOI: 10.1126/science.117.3046.528
- Myridakis, A. (2025). Microplastics have made it into our brains. Should we be worried? The Times. <https://www.thetimes.co.uk/article/microplastics-in-brain-should-we-worry-fv7pbk6qx> [dostęp: 2021.05.19]
- Ohtomo, Y., Takegawa, T., Ishida, A., Nagase, T. (2014). Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks. „*Nature Geosci*”. 7 (1), s. 25–28, DOI: 10.1038/ngeo2025

- Orgel, L. E. (2004). Prebiotic chemistry and the origin of the RNA world. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 39(2), 99–123. DOI: 10.1080/10409230490460765.
- Schlesinger, W. H., & Bernhardt, E. S. (2013). *Biogeochemistry: An analysis of global change* (3rd ed.). Academic Press.
- Smil, V. (2017). *Energy and Civilization: A History*. MIT Press. ISBN: 9780262536165
- Smith, E., & Morowitz, H. J. (2016). The Origin and Nature of Life on Earth: *The Emergence of the Fourth Geosphere*. Cambridge University Press.
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). "The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration." *The Anthropocene Review*, 2(1), 81-98. DOI:10.1177/2053019614564785
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), 1259855. DOI: 10.1126/science.1259855.
- Steffen, W., Rockström, J., Richardson, K., et al. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252–8259. DOI: 10.1073/pnas.1810141115.
- Yergin, D. (2011). *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. Penguin Press.
- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Sixth assessment report (AR6) – The IPCC sixth assessment report cycle. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> [dostęp: 2021.05.19]

Notka o autorce: Zajmuję się zagadnieniami związanymi z ochroną środowiska, energią i zrównoważonym rozwojem. Posiadam wieloletnie doświadczenie w doradztwie dla sektora publicznego i prywatnego w zakresie ochrony środowiska i klimatu. Z pasją angażuję się w projekty społeczne i obywatelskie, podnoszenie świadomości oraz promowanie aktywności społecznej. Obecnie biorę udział w drugiej edycji programu rezydencyjnego STUDIOTOPIA, który ma na celu przełamywanie barier między różnymi dyscyplinami nauki przez promowanie innowacyjnych, interdyscyplinarnych podejść. W ramach tego programu pracuję nad wyzwaniem zatytułowanym „Thermal Thinking: Beyond the Representation in Research”.