

<https://doi.org/10.18778/8220-870-2.03>

Jakub Boratyński*
Iwona D. Świczewska**

JAK ZMIERZYĆ ŚLAD WĘGLOWY?



* Dr, Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny, Katedra Teorii i Analiz Systemów Ekonomicznych, e-mail: jakub.boratynski@eksoc.uni.lodz.pl, <https://orcid.org/0000-0002-4288-2596>. Zainteresowania badawcze: modelowanie ekonomiczne, modele wielosektorowe (CGE, input-output), ekonometria bayesowska.

** Dr hab., Uniwersytet Łódzki, Wydział Ekonomiczno-Socjologiczny, Katedra Teorii i Analiz Systemów Ekonomicznych, e-mail: iwona.swieczewska@eksoc.uni.lodz.pl, <https://orcid.org/0000-0002-3376-5478>.

Wprowadzenie

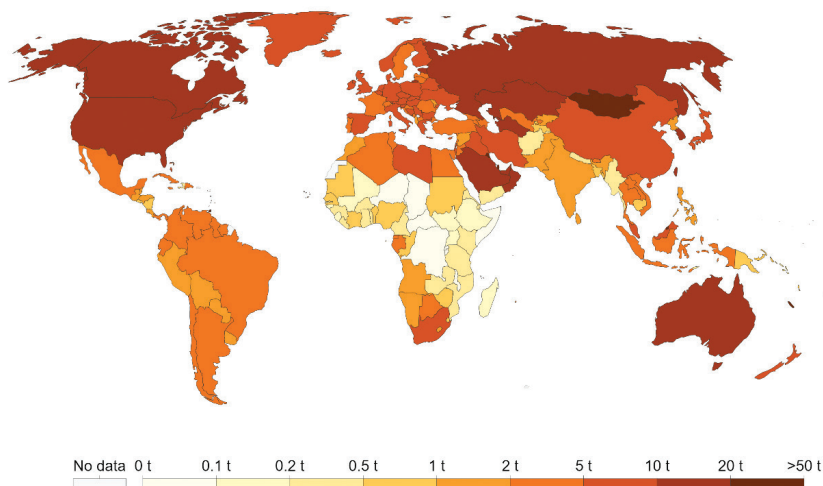
Obserwowane na przestrzeni ostatnich dziesięcioleci zmiany klimatu mogą stanowić potencjalnie największe zagrożenie dla przyszłości świata. Zmiany te wynikają głównie z efektu cieplarnianego, który sam w sobie jest zjawiskiem naturalnym kształtującym klimat na Ziemi, jednak poprzez intensywną ingerencję człowieka w środowisko istotnie zaburza bilans energetyczny naszej planety. Jedną z przyczyn zaburzenia bilansu energetycznego jest wyraźny wzrost emisji gazów cieplarnianych (*greenhouse gas* – GHG) do atmosfery ziemskiej. Skutkuje to nadmiernym nagrzewaniem się powierzchni Ziemi oraz znacznym wzrostem zasobów energii w systemie klimatycznym.

Do najważniejszych i jednocześnie najbardziej szkodliwych dla bilansu energetycznego Ziemi gazów cieplarnianych zalicza się dwutlenek węgla (CO_2), metan (CH_4) oraz tlenek azotu (N_2O). Działalność człowieka w zakresie spalania paliw kopalnych (głównie węgla kamiennego i brunatnego, ropy naftowej i gazu ziemnego) w znacznym stopniu przyczynia się do zwiększenia stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Według Friedlingsteina i in. (2019) w procesie spalania węgla, ropy i gazu powstaje ponad 80% całkowitej emisji CO_2 związanej z działalnością człowieka. W 2019 roku największym emitentem tego gazu (w przeliczeniu na 1 mieszkańca) był Katar (38,6 t/mieszkańca, por. mapa 1), na dalszych miejscach plasowały się Kuwejt (25,6 t/mieszkańca), Mongolia (20,3), Zjednoczone Emiraty Arabskie (19,5) oraz Arabia Saudyjska. Wśród krajów grupy G20 (złożonej z najbardziej uprzemysłowionych krajów świata) liderami w tym rankingu, poza wspomnianą już Arabią Saudyjską, są: Australia (16,3 t/mieszkańca), Stany Zjednoczone (16,1 t/mieszkańca), Kanada (15,4), Korea Południowa (11,9) oraz Rosja (11,5 t). Średnia dla krajów UE (UE27) to 6,6 t/mieszkańca. Polska w 2019 roku emitowała ok. 8,5 t/mieszkańca.

Metan pochodzi głównie ze źródeł geologicznych (uwalnia się podczas wydobywania wszystkich paliw kopalnych), ale powstaje również w procesie spalania biomasy oraz pochodzi ze źródeł mikrobiologicznych (Klimatyczne ABC, s. 63). Według ostatnich danych z 2016 roku największym jego emitentem na świecie (w przeliczeniu na 1 mieszkańca) jest Brunei (nieco ponad 22 t/mieszkańca), a wśród krajów grupy G20 dominuje Rosja (6,2 t/mieszkańca), Australia (5,0) Kanada (2,9) oraz Argentyna (2,8).

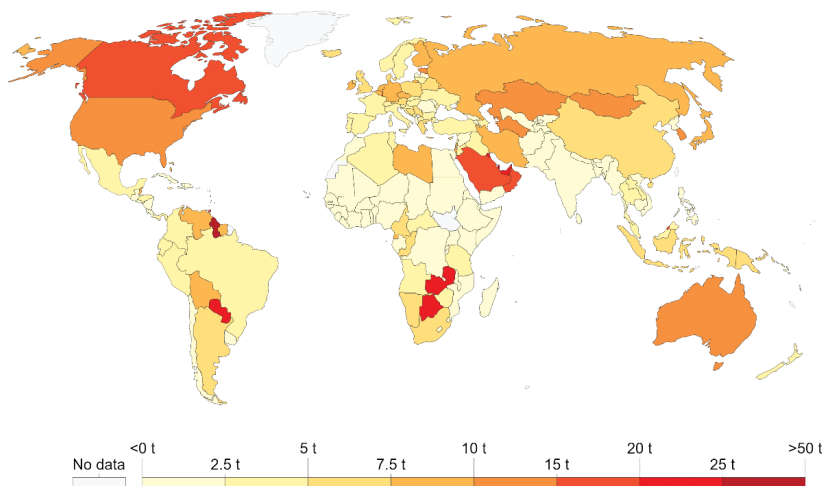
Tlenek azotu pojawia się głównie w wyniku wykorzystania nawozów azotowych w rolnictwie, reakcji chemicznych powstających w procesie ich produkcji, lecz także na skutek spalania paliw kopalnych, biopaliw i biomasy oraz w procesach oczyszczania ścieków komunalnych (Klimatyczne ABC, s. 64–65). Największym emitentem tego związku jest Republika Środkowoafrykańska (dane z 2016 roku,

wielkość emisji tlenu azotu w przeliczeniu na mieszkańca wyniosła dla tego kraju 7,6 t/mieszkańca). Spośród krajów G20 czołowe miejsca w tym rankingu zajmują Australia (ok. 2,4 t/mieszkańca), Kanada (1,2) oraz Argentyna (1,1).



Rysunek 3.1. Emisje CO₂ na mieszkańca

Źródło: Our World in Data based on Global Carbon Project, <https://ourworldindata.org/grapher/co-emissions-per-capita> (dostęp: 12.10.2021).



Rysunek 3.2. Emisje gazów cieplarnianych na mieszkańca

Źródło: CAIT Climate data Explorer via Climate Watch, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (dostęp: 12.10.2021).

Ze względu na to, iż poszczególne gazy różnią się od siebie budową atomową, masą cząsteczkową, a także zdolnością do nasilania efektu cieplarnianego, na potrzeby porównań konieczne jest wyrażenie ich wpływu na globalne ocieplenie w ekwiwalencie CO₂. Jednostka ta określa stężenie dwutlenku węgla, którego emisja do atmosfery miałaby identyczny skutek jak dane stężenie porównywalnego gazu cieplarnianego (<https://www.teraz-srodowisko.pl/sloownik-ochrona-srodowiska/definicja/ekwiwalent-dwutlenku-węgla.html>).

Sumując wielkość emisji poszczególnych gazów, okazuje się, iż największym ich emitentem na świecie w przeliczeniu na mieszkańca jest Gujana (dane z 2016 roku – 39,3 t CO₂ eq/1 mieszkańca) oraz Katar (31,1), a wśród krajów G20 liderami są: Arabia Saudyjska (17,1), Kanada (16,9) oraz Stany Zjednoczone (14,8).

Wymóg ciągłego monitorowania wielkości emisji gazów cieplarnianych do atmosfery staje się obecnie priorytetem w prowadzeniu właściwej polityki klimatycznej. Zachodzi ponadto konieczność weryfikowania oraz przewidywania wielkości ich emisji. Niezbędne jest więc posiadanie właściwego narzędzia, za pomocą którego można byłoby oszacować wielkość emisji, a co się z tym wiąże, także wpływu działalności człowieka na środowisko. Z tego właśnie zrodziła się idea „śladu węglowego” – *carbon footprint* (CF), czyli metody szacowania całkowitej wielkości emisji gazów cieplarnianych, jakie powstają na każdym etapie cyklu życia produktu¹. Mianem śladu węglowego określa się całkowitą wielkość emisji CO₂ i innych gazów cieplarnianych (przeliczoną na ekwiwalenty CO₂), które powstają w całym okresie cyklu życia danego produktu, włączając także fazę jego składowania i utylizacji. Stąd też wynika podstawowa metoda szacowania śladu węglowego, w oparciu o którą wyznacza się łączne emisje gazów cieplarnianych powstające na wszystkich etapach życia produktu, od momentu wydobywania surowców niezbędnych do jego wytworzenia, aż po jego utylizację (tzw. droga od kołyski do grobu – *from cradle to grave*). W przypadku przedsiębiorców, którzy zdecydowali się na wyliczenie śladu węglowego zawartego w wytwarzanych przez nich produktach, znacznie częściej stosowana jest metoda zwana „od kołyski aż po bramę” (*from cradle to gate*). Metodę tę, mimo że nie uwzględnia wszystkich faz życia produktu, uznaje się jednak za bardziej

¹ Koncepcja cyklu życia produktu została rozpowszechniona w latach 60. XX wieku. Przyjmuje się w niej, że każdy produkt ma swoją określoną „żywołność”, czyli okres, w którym znajduje nabywców (Zieliński, 2013, s. 12). Najczęściej wyróżnia się cztery fazy życia produktu: wprowadzenie, wzrost, dojrzałość i schyłek. Długość cyklu życia produktu i jego poszczególnych faz zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to rodzaj produktu i stopień jego innowacyjności, rodzaj zaspokajanej potrzeby, struktura rynku i jego konkurencyjność (Szwajca, 2013, s. 80).

precyzyjną, obciążoną mniejszym błędem, gdyż uwzględnia ona wszystkie etapy wytwarzania produktu, które można faktycznie kontrolować.

Ważne jest to, że przy określaniu wielkości śladu węglowego bierze się pod uwagę nie tylko wielkość emisji CO₂ i pozostałych gazów cieplarnianych powstającą na etapie produkcji, użytkowania i utylizacji danego produktu (tzw. emisja bezpośrednia), lecz także wielkość tzw. emisji pośrednich, które powstają np. na etapie wydobywania surowców, produkcji półproduktów niezbędnych do wytworzenia danego produktu czy produktów koniecznych na etapie użytkowania i utylizacji danego produktu. Biorąc pod uwagę np. cykl życia samochodu, ślad węglowy będzie sumą gazów cieplarnianych powstających na etapie produkcji, użytkowania i utylizacji samochodu (wraz z emisją gazów cieplarnianych powstających w procesie surowców i materiałów wykorzystywanych bezpośrednio i pośrednio przy produkcji samochodu), ale również emisji wynikających ze spalania paliwa w okresie użytkowania samochodu, emisji powstających przy wydobywaniu i przetwarzaniu surowców niezbędnych do produkcji tego paliwa, czy też emisji powstających np. na etapie budowy i utrzymania dróg. Uwzględnienie tych elementów w procesie szacowania wielkości śladu węglowego wymusza zastosowanie metod analiz przepływów międzygałęziowych, zwanych także metodami *input-output*.

Do zilustrowania obliczeń śladu węglowego posłużymy się tablicami przepływów międzygałęziowych, pochodzącymi z bazy WIOD (World Input-Output Database, zob. Timmer i in., 2015), a także danymi o emisjach gazów cieplarnianych, opracowanymi przez JRC (European Commission, Joint Research Centre, Román M.V. i in., 2019). Dane obejmują emisje CO₂ (nie uwzględniają emisji innych gazów cieplarnianych), pochodzące zarówno ze spalania paliw, jak i z procesów przemysłowych.

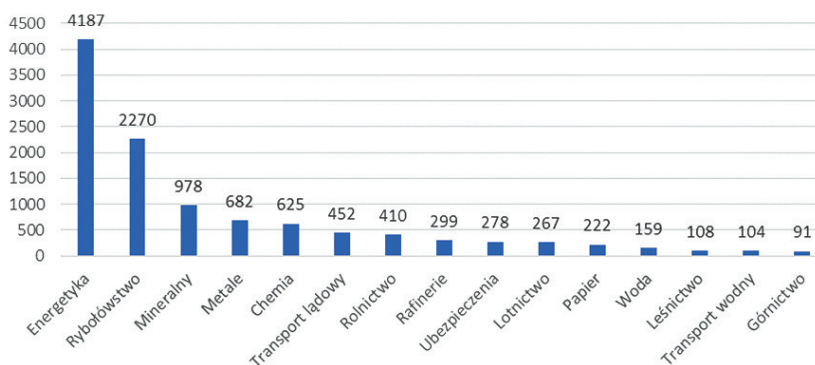
W pierwszym kroku wyznaczamy tzw. współczynniki bezpośrednich emisji, $e_{i,r}$, według wzoru:

$$e_{i,r} \equiv \frac{E_{i,r}}{x_{i,r}} \quad (1)$$

gdzie E – poziom emisji CO₂ (w tys. ton), x – wartość produkcji (w mld USD). Subskrypty i oraz r oznaczają, odpowiednio, numer gałęzi (sektora) gospodarki oraz kraj (lub region świata). W danych WIOD wyodrębniono 56 gałęzi i 43 kraje – w tym wszystkie państwa Unii Europejskiej oraz największe gospodarki światowe, a także dodatkowo, 44. region obejmujący wszystkie pozostałe kraje. W ten sposób dane obejmują całą gospodarkę światową.

Wyniki obliczeń współczynników emisji ilustruje rysunek 3.3. W Polsce największą bezpośrednią emisyjnością CO₂ (4187 kg/tys. USD, według danych

za rok 2014) charakteryzuje się sektor energetyczny, obejmujący m.in. produkcję energii elektrycznej i ciepła sieciowego, następnie rybołówstwo (2270 kg/tys. USD) i przemysł mineralny (978 kg/tys. USD), obejmujący m.in. produkcję cementu, szkła i ceramiki. Wśród gałęzi o najwyższej bezpośredniej emisyjności znajdują się również branże przemysłu ciężkiego (przemysł metalowy, chemiczny, papierniczy oraz górnictwo) oraz usługi transportowe. Zaskakujące jest pojawienie się w tym zestawieniu sektora ubezpieczeń – jednakże niemal pięciokrotny wzrost emisji w tym sektorze, występujący w latach 2007–2008 według danych JRC, każe ten wynik traktować z ostrożnością i zakładać możliwość błędu w danych źródłowych (należy pamiętać, że emisje nie są obserwowane bezpośrednio, a szacunków dokonywane są niejednokrotnie na podstawie złożonych procedur statystycznych). Warto dodać, że obraz przedstawiony na rysunku 3.3 byłby inny, gdyby w danych o emisjach uwzględniono inne gazy cieplarniane – można by się było wówczas spodziewać wyższej emisyjności rolnictwa, w którym – poza już uwzględnionymi emisjami CO₂ związanymi z wykorzystaniem paliw (działanie maszyn rolniczych, ogrzewanie itd.) – znalazłyby się również emisje CH₄ z hodowli zwierzęcej i N₂O z nawozów.



Rysunek 3.3. Współczynniki bezpośrednich emisji (kg/tys. USD) dla 15 gałęzi o najwyższej bezpośredniej emisyjności, Polska, 2014 rok

Źródło: obliczenia własne na podstawie danych WIOD i JRC.

Współczynniki bezpośrednich emisji obejmują jedynie emisje powstające w związku z procesami produkcyjnymi mającymi miejsce w danej gałęzi, nie obejmują emisji powstających na wcześniejszych etapach produkcji. Przykładowo, współczynnik bezpośrednich emisji dla przemysłu metalurgicznego obejmuje emisje CO₂ powstające w hucie stali, lecz co do zasady nie zawiera emisji związanych z produkcją energii elektrycznej, dostarczanej hucie z elektrowni lub emisji powstających w kopalni rudy żelaza. Wszystkie te składowe są natomiast ujęte we współczynnikach pełnych emisji oraz mnożnikach emisji,

a podstawą ich obliczeń są informacje o łańcuchach produkcji zawarte w tablicach przepływów międzygałęziowych (inaczej tablicach *input-output*).

Centralną częścią tablicy *input-output* wykorzystanej w tym badaniu jest macierz zużycia pośredniego (nakładów materiałowych, macierz z), składająca się z elementów oznaczonych jako $z_{i,r,j,s}$. Są to kwoty (tutaj – w mld USD) wyrażające zużycie przez gałąź j w kraju s wyrobów lub usług pochodzących z gałęzi i w kraju r . Pojedynczy element $z_{i,r,j,s}$ może zatem przedstawiać np. zużycie stali pochodzącej z Chin w polskim budownictwie. Macierz z nie zawiera jednakże nakładów na środki trwałe, a więc chociażby wartości maszyn budowlanych wykorzystywanych w budownictwie. Wobec tego łańcuchy wartości, przedstawiane za pomocą tablicy *input-output*, dotyczą wyłącznie sfery nakładów na bieżące środki produkcji – wyroby i usługi wykorzystywane, co do zasady, w całości w danym okresie rozliczeniowym (roku). Inaczej mówiąc, zużycie pośrednie obejmuje te dobra, które w całości wchodzi w skład wartości wytwarzanego produktu. Z kolei w przypadku środków trwałych, przeniesienie ich wartości na wartość produktu jest rozłożone w czasie, odzwierciedlone w postaci kosztów kapitałowych.

Zdefiniujmy tzw. współczynniki bezpośrednich nakładów materiałowych:

$$a_{i,r,j,s} \equiv \frac{z_{i,r,j,s}}{x_{j,s}} \quad (2)$$

Współczynniki te opisują w pewnym sensie technologię produkcji – strukturę nakładów, wraz ze źródłami (gałęziami i krajami) ich pochodzenia, niezbędnych do wytworzenia jednostki produktu gałęzi j w kraju s . Na przykład, wedle danych za 2014 rok, do produkcji urządzeń elektrycznych w Polsce o wartości 1 mld USD zużywano metale pochodzące z Niemiec o wartości 0,022 mld USD. Ta ostatnia wielkość jest przykładem współczynnika bezpośrednich nakładów materiałowych.

Na podstawie wprowadzonych wyżej oznaczeń i definicji możemy zapisać następującą zależność (tzw. tożsamość bilansową produkcji):

$$x_{i,r} = \sum_j \sum_s a_{i,r,j,s} \cdot x_{j,s} + \sum_s y_{i,r,s} \quad (3)$$

gdzie $y_{i,r,s}$ wyraża popyt finalny w kraju s na dobra pochodzące z gałęzi i w kraju r ; J jest liczbą gałęzi, a S liczbą krajów/regionów wyróżnionych w tablicy. Tożsamość ta wskazuje, że produkcja (w gałęzi i , w kraju/regionie r , $x_{i,r}$) jest równa sumie zapotrzebowania na tę produkcję ze strony wszystkich gałęzi i i krajów/regionów

świata (numerowanych, odpowiednio, jako j oraz s). Zapotrzebowanie dzieli się przy tym na dwie kategorie. Pierwsza suma po prawej stronie wzoru wyraża zapotrzebowanie na cele zużycia pośredniego, tj. zapotrzebowanie na dobra i usługi zużywane przez producentów w ich procesach produkcyjnych. Druga suma wyraża zapotrzebowanie finalne, obejmujące – w przypadku tablicy dla gospodarki światowej – konsumpcję i nakłady na środki trwałe (inwestycje). Produkty nabywane jako dobra konsumpcyjne lub inwestycyjne są produktami końcowymi (finalnymi) w tym sensie, że nie są już dalej przetwarzane w procesach produkcji.

Obliczenia śladu węglowego dotyczą zwykle produkcji finalnej, a nie produkcji ogółem (która obejmuje zarówno produkty finalne, jak i produkty przeznaczone na zużycie pośrednie). Takie ujęcie pozwala uniknąć wielokrotnego liczenia tej samej zawartości emisji. Gdyby ślad węglowy odnosić do produkcji ogółem, to np. emisje CO₂ związane z produkcją stali zaliczone zostałyby po raz drugi jako emisje związane z produkcją samochodów, do której tę stal wykorzystano. W przypadku gdy ślad węglowy (pełna zawartość emisji) odnoszony jest jedynie do produktu finalnego, problem ten nie występuje. Aby możliwe było zastosowanie takiego ujęcia, powyższe równanie bilansowe produkcji należy przekształcić w taki sposób, aby produkcję x można było przedstawić jako funkcję produkcji finalnej (popytu finalnego) y . Przekształcenie takie ma prostą postać w zapisie macierzowym. Zauważmy jednak, że np. macierz złożona z elementów $a_{i,r,j,s}$ jest macierzą czterowymiarową. Dla przeprowadzenia przekształceń potrzebne jest przeniesienie jej do układu dwuwymiarowego tak, że numeracja gałęzi i krajów/regionów (i, r) zastępowana jest pojedynczą numeracją wierszy macierzy, w . Podobnie, numeracja (j, s) zastępowana jest numeracją kolumn macierzy, k .

$$w = i + I \cdot (r - 1)$$

$$k = j + J \cdot (s - 1)$$

gdzie $i = 1, \dots, I; r = 1, \dots, R; j = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S$; (przy czym $I = J$ oraz $R = S$).

Równanie bilansowe produkcji można wówczas zapisać jako:

$$x_w = \sum_k^K a_{w,k} \cdot x_k + \sum_s^S y_{w,s} \quad (4)$$

a w zapisie macierzowym:

$$\mathbf{x} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{Y} \cdot \mathbf{h} \quad (5)$$

gdzie \mathbf{h} jest wektorem jedynkowym. Rozwiązując ze względu na wektor produkcji, \mathbf{x} , i przyjmując dodatkowo $\mathbf{y} = \mathbf{Y} \cdot \mathbf{h}$, otrzymujemy:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{y} \quad (6)$$

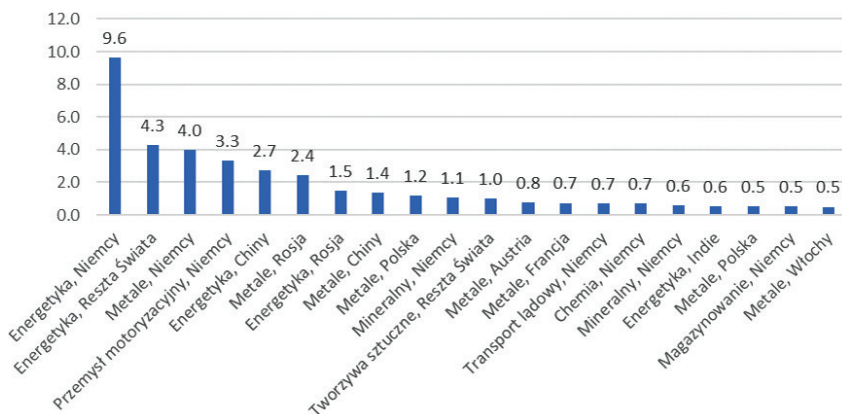
Równanie to pozwala wyznaczyć produkcję (w poszczególnych gałęziach i krajach/regionach) na podstawie zakładanego popytu finalnego, \mathbf{Y} . Na przykład, jeśli wektor \mathbf{y} będzie zawierał wartość zakupu auta produkcji niemieckiej (wymagałoby to zapisania odpowiedniej kwoty w elemencie tego wektora, odpowiadającym zapotrzebowaniu finalnemu na produkty gałęzi produkcji pojazdów; pozostałe elementy wektora \mathbf{y} byłyby równe 0), wówczas wektor \mathbf{x} pokaże wartości produkcji poszczególnych gałęzi w poszczególnych krajach (np. stali i części samochodowych w Polsce, podzespołów elektronicznych w Chinach, usług finansowych i transportowych w Niemczech, energii elektrycznej w Niemczech itd.), odzwierciedlające elementy pełnego łańcucha produkcji owego auta. Znając wielkości produkcji, możemy dalej wyznaczyć emisje CO_2 , wykorzystując zależność $E_w = e_w \cdot x_w$, gdzie e_w wyraża zdefiniowane wyżej współczynniki bezpośrednich emisji (z numeracją zamienioną na „jednowymiarową”, zgodnie ze schematem wprowadzonym powyżej). W ten sposób wyznaczamy emisje związane z produkcją stali w Polsce, energii elektrycznej w Niemczech, podzespołów elektronicznych w Chinach itd., powstałe w związku z produkcją auta w Niemczech. Sumując te emisje, otrzymujemy tzw. pełną zawartość emisji w produkcie finalnym – w tym przypadku – w samochodzie. Opisane obliczenia emisji w łańcuchu produkcji określonego dobra finalnego (lub „koszyka” dóbr finalnych) można sformalizować następująco (por. Plich, 2002, s. 204–209; zob. także Przybyliński, 2012, s. 163–174):

$$\mathbf{E} = \text{diag}(\mathbf{e}) \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{y} \quad (7)$$

gdzie $\text{diag}(\mathbf{e})$ jest macierzą diagonalną, złożoną z elementów wektora współczynników bezpośrednich emisji, podczas gdy \mathbf{E} jest wektorem poziomów emisji (powstających w poszczególnych krajach i gałęziach).

Kontynuując powyższy przykład, weźmy wartość globalnego popytu finalnego na niemieckie auta (ściślej rzecz biorąc – popytu finalnego na produkty gałęzi wytwarzającej zarówno pojazdy samochodowe, jak i części zamienne, przyczepy itd. – zob. Eurostat, 2008; dla większej przejrzystości pozostaniemy jednak przy uproszczonej interpretacji), który według danych WIOD za 2014 rok wyniósł 270,7 mld USD. Popyt finalny obejmuje prywatne zakupy aut przez gospodarstwa domowe oraz zakupy dokonywane przez firmy,

klasyfikowane jako nakłady na środki trwałe (inwestycje). Wstawiając tę kwotę do wektora y (przyjmując pozostałe elementy równe 0), a następnie podstawiając do powyższego wzoru, otrzymujemy wektor E , którego 20 największych składowych (spośród 2464) przedstawia rysunek 3.4 (wyniki podzielone zostały przez 1000, w związku z czym wyrażone są one w mln ton).



Rysunek 3.4. Emisje CO₂ (w mln ton) w wybranych sektorach/krajach, związane z popytem finalnym na produkty niemieckiego przemysłu motoryzacyjnego w 2014 roku

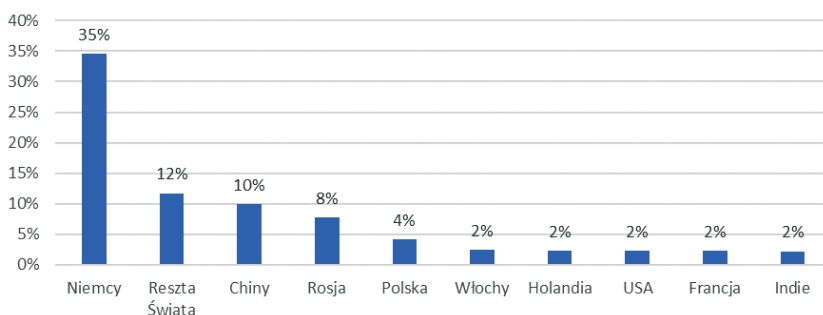
Źródło: obliczenia własne.

Rysunek 3.4 wskazuje, że produkcja niemieckich aut na zaspokojenie światowego popytu konsumpcyjnego i inwestycyjnego w 2014 roku generowała emisje CO₂ w samym przemyśle motoryzacyjnym w Niemczech na poziomie 3,3 mln ton. Jednakże większe emisje wiążą się ze zużyciem energii (głównie energii elektrycznej) w całym łańcuchu produkcji, przy czym jest to energia wytwarzana głównie w samych Niemczech, ale również w krajach sklasyfikowanych jako Reszta Świata oraz w Chinach, Rosji i Polsce. Znaczące wolumeny emisji powstają też w przemyśle metalurgicznym w Niemczech, Rosji, Chinach, Austrii, Francji, Polsce i Włoszech. Istotny udział w emisjach mają także produkcja tworzyw sztucznych w krajach Reszty Świata, ponadto usługi transportu i magazynowania w Niemczech. Emisje wskazane na rysunku 3.4 stanowią łącznie 57% całości emisji generowanych w rozważanym tu łańcuchu produkcji. Całość emisji – inaczej ślad węglowy produkcji finalnej aut w Niemczech – wyniósł 66,3 mln ton CO₂.

Warto zwrócić uwagę, że powyższy rachunek związany jest mimo wszystko z wieloma uproszczeniami. Po pierwsze, same dane (tablice *input-output*, emisje) są w znacznym zakresie szacunkowe. Po drugie, współczynniki bezpośredniej emisyjności pokazują przeciętną emisyjność danej gałęzi, podczas gdy może ona być

zróznicowana na szczeblu przedsiębiorstw i procesów produkcyjnych. Przykładowo producent aut może importować stal z Chin od dostawcy posługującego się relatywnie niskoemisyjną technologią, podczas gdy inni producenci na rynku chińskim mogą stosować technologie o wyższej emisyjności. Jednak w obliczeniach bierzemy pod uwagę średnią emisyjność wszystkich hut stali w Chinach. Przypomnijmy ponadto, że rachunek ten nie zawiera emisji powstających w łańcuchu produkcji środków trwałych – np. maszyn używanych w fabrykach samochodów, wiatraków wytwarzających energię elektryczną na potrzeby fabryki aut itd.

Powyższe obliczenia można zilustrować także z innej perspektywy. Rysunek 3.5 pokazuje 10 państw, które łącznie odpowiedzialne są za 80% emisji CO₂ w łańcuchu produkcji finalnej aut w Niemczech. Wykres ten stanowi inne zestawienie wyników zawartych w obliczonym wektorze **E**. Jak wskazują wyniki, 35% śladu węglowego w rozważanym łańcuchu produkcji powstaje w samych Niemczech, podczas gdy np. w Polsce 4%.

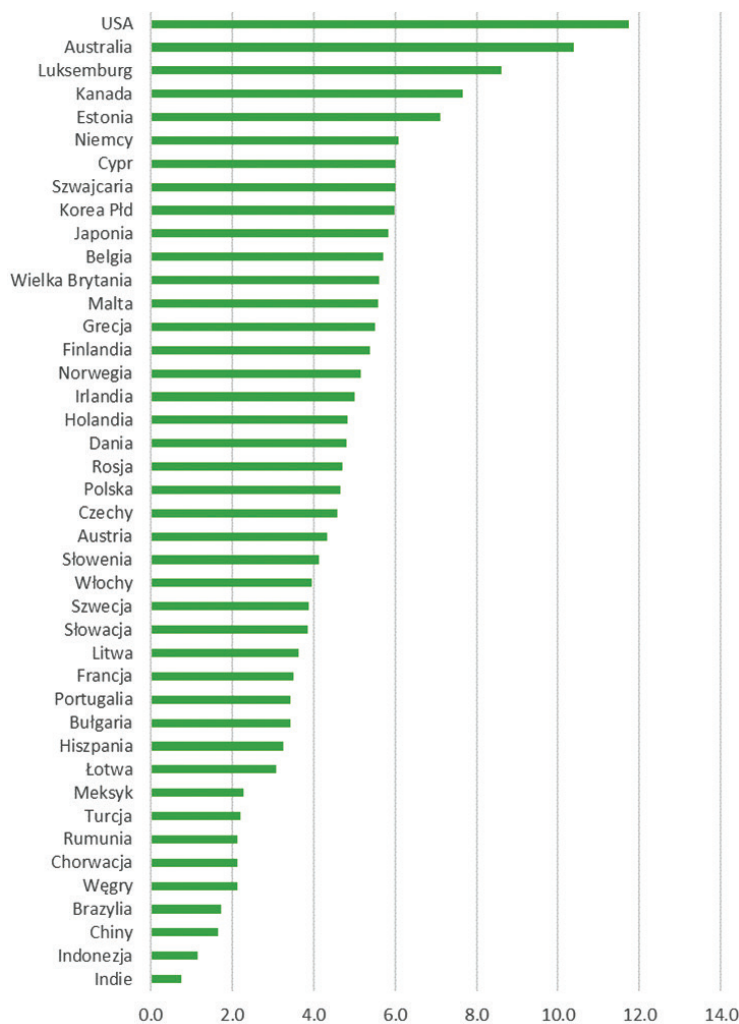


Rysunek 3.5. Udziały wybranych krajów w śladzie węglowym produkcji finalnej aut w Niemczech w 2014 roku (w %)

Źródło: obliczenia własne.

Podobny schemat obliczeniowy można zastosować do wielu innych scenariuszy (por. Przybyliński, 2012, rozdz. 4, 5 i 8). Rozważmy, jako ostatni przykład, pełną zawartość emisji w koszykach dóbr konsumpcyjnych przeciętnego mieszkańca poszczególnych krajów. Obliczenia powtarzamy, podstawiając kolejno za **y** wektory konsumpcji gospodarstw domowych z poszczególnych krajów, w przeliczeniu na jednego mieszkańca. Suma wektora **E** każdorazowo pokazuje łączne emisje CO₂, powstające w łańcuchu produkcji koszyków konsumpcji mieszkańców poszczególnych państw. Co do zasady, wyższe wartości śladu węglowego konsumpcji dotyczą krajów rozwiniętych (o wyższej konsumpcji *per capita*), a niższe – krajów rozwijających się. Poza wysokością konsumpcji *per capita*, na wielkość śladu węglowego wpływa ponadto m.in. miks energetyczny występujący w danym kraju, a także charakter powiązań

handlowych z innymi krajami, w obrębie łańcucha wartości dóbr konsumpcyjnych. Na przykład w USA i Australii pełna zawartość emisji w koszyku dóbr konsumpcyjnych przekracza 10 ton CO₂ na osobę rocznie, podczas gdy w Indiach, Indonezji, Chinach i Brazylii zawartość ta mieści się w granicach 0,7–1,7 ton CO₂ na osobę. W obliczeniach przedstawiono wyniki dla pojedynczych krajów, z pominięciem grupy państw sklasyfikowanej jako Reszta Świata.



Rysunek 3.6. Ślad węglowy przeciętnej konsumpcji gospodarstw domowych na mieszkańca w poszczególnych krajach – pełna zawartość emisji w tonach CO₂ na mieszkańca

Źródło: obliczenia własne.

Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono możliwości zastosowania metod *input-output* do szacowania wielkości całkowitych emisji CO₂ (bezpośrednich i pośrednich) związanych z popytem światowym na produkty poszczególnych gałęzi. Możliwości zastosowania tych metod zostały zilustrowane na przykładzie popytu światowego na produkty niemieckiego przemysłu motoryzacyjnego. Ze względu na dostępność danych statystycznych na poziomie gałęzi gospodarki analiza ograniczona została do emisji CO₂ wywołanej popytem na produkty poszczególnych gałęzi. Zastosowanie metod *input-output* dla tablicy dla gospodarki światowej pozwala na jednoczesne wskazanie największych emitentów CO₂ w ujęciu gałęziowym i przestrzennym. Niewątpliwą zaletą stosowania tych metod w badaniach emisyjności gospodarek jest uwzględnienie wszystkich etapów procesu produkcji produktów wytwarzanych w poszczególnych gałęziach gospodarki oraz możliwość śledzenia wielkości emisji dwutlenku węgla w różnych regionach świata.

Bibliografia

- Budziszewska M., Kardaś A., Bohdanowicz Z. (2021), *Klimatyczne ABC. Interdyscyplinarne podstawy współczesnej wiedzy o zmianie klimatu*, Wydawnictwa Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, <https://klimatyczneabc.uw.edu.pl/> (dostęp: 30.09.2021).
- European Commission, Joint Research Centre, Román M.V. i in. (2019), *World Input-Output Database Environmental Accounts. Update 2000–2016*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Eurostat (2008), *NACE Rev. 2. Statistical Classification of Economic Activities in the European Community*, Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Friedlingstein P., Jones M.W., O’Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris I., Haverd V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kaplan J.O., Kato E., Klein-Goldewijk K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Peregón A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C.,

- Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. (2019), *Global Carbon Budget 2019*, „Earth System Science Data”, t. 11, nr 4, s. 1783–1838, <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Miller R.E., Blair P.D. (2009), *Input-Output Analysis. Foundations and Extensions*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Plich M. (2002), *Budowa i zastosowanie wielosektorowych modeli ekonomiczno-ekologicznych*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Przybyliński M. (2012), *Metody i tablice przepływów międzygałęziowych w analizach handlu zagranicznego Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Szwajca D. (2013), *Działania marketingowe jako determinant kosztów w cyklu życia produktu*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie”, z. 66, s. 79–89.
- Timmer M.P., Dietzenbacher E., Los B., Stehrer R., de Vries G.J. (2015), *An Illustrated User Guide to the World Input-Output Database: The Case of Global Automotive Production*, „Review of International Economics”, t. 23, nr 3, s. 575–605.
- Tomaszewicz Ł. (1994), *Metody analizy input-output*, Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- Zieliński M. (2013), *Efektywność działań personalnych w cyklu życia produktu*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Organizacja i Zarządzanie”, z. 66, s. 11–21.