

Tomasz Żyłowski

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

ŚLAD WĘGLOWY GŁÓWNYCH ROŚLIN UPRAWNYCH W POLSCE*

Słowa kluczowe: ślad węglowy, emisje gazów cieplarnianych, uprawa

Wstęp

Szósty raport IPCC (Międzynarodowego Zespołu do Spraw Zmian Klimatu) (14) opublikowany w kwietniu 2022 r. wskazuje na bezpośredni wpływ działalności człowieka na wzrost stężenia gazów cieplarnianych (GHG) w atmosferze skutkujący wzrostem średniej temperatury i zmianami klimatu. Wskazano w nim, że każde dodatkowe 0,5°C globalnego ocieplenia powoduje wyraźny wzrost intensywności i częstotliwości występowania fal upałów, nawałnych opadów, a także suszy rolniczej i hydrologicznej.

Globalnie udział rolnictwa w emisji gazów cieplarnianych wynosi ok. 12%, przy czym szacuje się, iż produkcja żywności (cały łańcuch dostaw od wytworzenia środków produkcji aż do utylizacji odpadów) odpowiada za emisję od 21 do 37% gazów cieplarnianych (22).

Wielkość emisji z rolnictwa w Polsce raportowana przez KOBiZE (16) utrzymuje się na względnie stałym poziomie od roku 2000 (31,4–34,5 Mt ekw.CO₂) i podobnym udziale wynoszącym ok. 8%. Warto zauważyć, że wspomniany udział rolnictwa odnosi się do emisji występujących bezpośrednio podczas produkcji roślinnej i zwierzęcej i nie obejmuje wytworzenia użytych środków produkcji, które raportowane są w innych gałęziach gospodarki.

Do oceny wpływu uprawy roślin na środowisko używany jest ślad węglowy (ang. *Carbon Footprint*) odnoszący się do kategorii wpływu na zmiany klimatu. Jest to jeden ze wskaźników stosowanych w ocenie cyklu życia (ang. *Life Cycle Assessment*). Ślad węglowy to suma emisji lub pochłaniania gazów cieplarnianych

*Opracowanie wykonano w ramach zadania 8.0 pt. „Identyfikacja i opracowanie nowych krajowych wskaźników jednostkowych oraz zrównoważonych metod produkcji dla celów ochrony środowiska i przeciwdziałania zmianom klimatu w rolnictwie” z dotacji budżetowej przeznaczonej na realizację zadań MRiRW w 2022 r.

powstałych w całym cyklu życia produktu, wyrażona w ekwiwalencie dwutlenku węgla i odniesiona do jednostki funkcjonalnej (21). Praktycznie rzecz ujmując, w polskich warunkach klimatycznych inwentaryzacja bezpośrednich emisji w uprawie ziemiopłodów obejmuje podtlenek azotu (N_2O) oraz dwutlenek węgla (CO_2). Emisje pośrednie (powstające poza bramą gospodarstwa) związane są z wytworzeniem użytych środków produkcji.

W związku z obawami dotyczącymi zmian klimatu badania nad śladem węglowym upraw obejmują dziesiątki tysięcy pozycji literaturowych (7). W pracy Clune'a i in. (6) zestawiono rezultaty 369 artykułów badających ślad węglowy świeżych produktów żywnościowych w pięciu kategoriach, takich jak: owoce, warzywa, podstawowe produkty żywnościowe (zboża, rośliny strączkowe, orzechy, nasiona, ryż), produkty mleczne i mięso. Metaanaliza pokazała, iż owoce i warzywa mają najmniejszy ślad węglowy w odniesieniu do 1 kg produktu, natomiast mięso przeżuwaczy – ponad 100-krotnie większy. Zhang i in. (26) wyznaczyli ślad węglowy głównych roślin uprawnych w Chinach: kukurydzy na ziarno, pszenicy i ryżu. Polskie badania nad śladem węglowym obejmują uprawę, m.in.: rzepaku ozimego (1), kukurydzy na ziarno (10), pszenicy ozimej (11) oraz pszenżyta ozimego (2). Warto zwrócić uwagę na występowanie szerokiego zakresu otrzymywanych wyników dla tej samej rośliny, w zależności od przyjętej metodyki, zakresu badań, a także jakości i reprezentatywności danych użytych do obliczeń; w metaanalizie Clune'a i in. (6) pokazano na przykład, iż wyznaczony w różnych publikacjach ślad węglowy uprawy zbóż zawierał się w przedziale od 0,11 od 1,38 kg CO_2 ekw. $\cdot kg^{-1}$.

Celem pracy jest ocena śladu węglowego uprawy głównych roślin w Polsce, tj.: pszenicy ozimej, pszenżyta ozimego, jęczmienia jarego, mieszanki zbóż, kukurydzy na ziarno i na kiszonkę, ziemniaka, buraka cukrowego i rzepaku ozimego.

Material i metodyka badań

Największą trudność przy szacowaniu śladu węglowego uprawy wybranych ziemiopłodów, na poziomie krajowym, stanowi brak dostępu do szczegółowych statystyk publicznych. W opracowaniach GUS (8) przedstawione są średnie wielkości plonów wybranych roślin, brak jest jednak informacji dotyczących technologii uprawy poszczególnych roślin, zwłaszcza ilości zastosowanych nawozów mineralnych i naturalnych.

Z uwagi na brak danych na poziomie krajowym, w pracy użyto wybranych danych ankietowych zebranych w projekcie LCAgri w sezonie wegetacyjnym 2015/2016 (12). Dane te zawierają szczegółowe informacje o plonie, zabiegach uprawowych, zastosowanych nawozach i środkach ochrony roślin (ŚOR), zużyciu paliwa, glebie (klasa bonitacyjna, odczyn). Ankiety zostały zebrane wśród gospodarstw należących do polskiego FADN o trzech kierunkach produkcji: uprawie roślin, hodowli bydła mlecznego oraz trzody chlewnej i obejmują obszar całej Polski. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie sumaryczne opisujące średnią technologię produkcji wybranych roślin.

Do analiz wybrano 9 roślin o największej powierzchni zasiewów w Polsce w roku 2016 (17): pszenicę ozimą (1881 tys. ha), pszenżyto ozime (1191 tys. ha), jęczmień jary (778 tys. ha), mieszankę zbóż (798 tys. ha), kukurydzę na ziarno (594 tys. ha) i na kiszonkę (597 tys. ha), ziemniaka (301 tys. ha), buraka cukrowego (206 tys. ha) i rzepak ozimy (823 tys. ha; areal z rzepikiem).

Tabela 1

Charakterystyka zużycia środków produkcji oraz plony analizowanych roślin

| Roślina | n* | Plon (t·ha ⁻¹) | Azot (kg N·ha ⁻¹) | Fosfor (kg P ₂ O ₅ ·ha ⁻¹) | Potas (kg K ₂ O·ha ⁻¹) | Obornik (t·ha ⁻¹) | Gnojowica (m ³ ·ha ⁻¹) | Paliwo (t·ha ⁻¹) | Środki ochrony roślin (kg s.a.·ha ⁻¹)** | Maszyny (h·ha ⁻¹) |
|--------------------------|-----|-------------------------------|----------------------------------|---|--|----------------------------------|--|---------------------------------|---|----------------------------------|
| Pszenica ozima | 140 | 5,99 | 106,96 | 35,27 | 55,57 | 5,59 | 0,85 | 111,55 | 1,94 | 11,93 |
| Pszenżyto ozime | 130 | 4,46 | 102,97 | 32,86 | 45,35 | 9,37 | 2,28 | 95,85 | 1,21 | 11,40 |
| Jęczmień jary | 103 | 4,5 | 77,72 | 33,22 | 48,34 | 9,60 | 2,18 | 99,65 | 1,13 | 12,23 |
| Mieszanka zbóż | 67 | 5,19 | 74,04 | 33,92 | 40,38 | 11,06 | 1,33 | 104,20 | 1,00 | 12,63 |
| Kukurydza na ziarno | 43 | 9,37 | 121,48 | 58,47 | 92,70 | 6,86 | 2,92 | 113,10 | 1,12 | 12,10 |
| Kukurydza na kiszonkę | 59 | 52,07 | 104,52 | 42,25 | 56,37 | 26,75 | 2,89 | 141,42 | 0,80 | 12,05 |
| Ziemniak | 39 | 21,62 | 76,51 | 41,71 | 54,44 | 21,48 | 1,09 | 115,33 | 1,50 | 13,70 |
| Burak cukrowy | 29 | 56,65 | 137,01 | 59,10 | 92,11 | 9,22 | 0,00 | 136,06 | 2,79 | 12,28 |
| Rzepak ozimy | 84 | 2,74 | 157,16 | 52,62 | 89,98 | 3,07 | 1,07 | 113,18 | 2,58 | 10,98 |

*w kolumnie oznaczonej literą n podano liczbę gospodarstw uprawiających poszczególne rośliny;

**kg s.a. – kilogram substancji aktywnej w środkach ochrony roślin

Źródło: opracowanie własne na podstawie bazy danych z projektu LCAGri (12)

Ślad węglowy jest zdefiniowany jako bilans (emisji lub pochłaniania) gazów cieplarnianych wywołanych przez uprawę i wyrażony w ekwiwalencie dwutlenku węgla (25). Ekwiwalent dwutlenku węgla (CO₂ ekw.) obliczany jest jako iloczyn masy danego gazu przez odpowiedni współczynnik globalnego ocieplenia (GWP, ang. *Global Warming Potential*) w pewnym horyzoncie czasowym, zazwyczaj 100-letnim. Współczynnik globalnego ocieplenia jest jednostką bezwymiarową i wyraża wpływ danego gazu na globalne ocieplenie w porównaniu z CO₂, dla którego przyjęto GWP = 1. Do analiz przyjęto, że dla N₂O potencjał globalnego ocieplenia w 100-letnim horyzoncie czasowym jest równy 298 (23).

Za główną jednostkę funkcjonalną do dalszych analiz przyjęto 1 kg zebranego plonu (świeża masa); jest to najczęściej przyjmowana jednostka w badaniach śladu węglowego pozwalająca na porównywanie efektywności środowiskowej uprawy wybranej rośliny. Dodatkowo emisje gazów cieplarnianych odniesiono do 1 ha uprawy, co

umożliwia bezpośrednie porównywanie wpływu uprawy różnych roślin na środowisko. By uniknąć dwuznaczności, w dalszej części pracy termin „ślad węglowy uprawy” (ślad węglowy) odnosi się do jednostki produktu ($\text{kg CO}_2 \text{ ekw.} \cdot \text{kg}^{-1}$), a pojęcie emisji gazów cieplarnianych (emisje GHG) do 1 ha uprawy ($\text{kg CO}_2 \text{ ekw.} \cdot \text{ha}^{-1}$).

Zakres analiz obejmuje emisje N_2O i CO_2 z gleby, a także emisje pochodzące z wytworzenia środków produkcji oraz wszystkie zabiegi agrotechniczne po zebraniu przedplonu, aż do zebrania plonu głównego i pobocznego (jeśli jest zbierany).

Bezpośrednie i pośrednie¹ (depozycja atmosferyczna spowodowana ulatnianiem amoniaku i tlenków azotu, przesiąkanie i spływ powierzchniowy azotanów) emisje podtlenku azotu z gleby ($\text{N}_2\text{O}_{\text{Gleba}}$) obliczono, korzystając z przewodnika IPCC i domyślnych współczynników na poziomie Tier 1 (13). Wielkość emisji N_2O zależy między innymi od ilości azotu wnoszonego do gleby w postaci nawozów mineralnych, naturalnych, resztek roślinnych oraz wielkości mineralizacji węgla z substancji organicznej gleby, w wyniku zmian sposobu gospodarowania.

Uwzględniono emisje CO_2 z gleby po zastosowaniu mocznika i nawozów wapniowych ($\text{CO}_{2\text{Gleba}}$) (13).

Analizy obejmują emisje powstające przed bramą gospodarstwa, pochodzące z wytworzenia użytych środków produkcji, takich jak: nawozy mineralne (Prod_Naw_Min), paliwo (Prod_Paliwo), maszyny (Prod_Maszyn), nasiona albo sadzeniaki ($\text{Nasiona/Sadzeniaki}$) oraz środki ochrony roślin (Prod_ŚOR). Wartości przyjętych współczynników emisji wraz z referencjami przedstawiono szczegółowo w tabeli 2. Zużycie maszyn obliczono dla każdego wykonywanego zabiegu agrotechnicznego, przyjmując wagę maszyny i jej całkowity czas pracy za Nemeckiem i Kägim (20), według następującego wzoru:

$$\text{Zużycie maszyny [kg]} = \frac{\text{Czas zabiegu agrotechnicznego [h]}}{\text{Całkowity czas pracy maszyny [h]}} \times \text{Waga maszyny [kg]}$$

Gdzie:

Czas zabiegu agrotechnicznego [h] – czas zabiegu w godzinach;

Całkowity czas pracy maszyny [h] – przewidywany czas pracy, aż do całkowitego zużycia maszyny w godzinach.

Emisje z użycia maszyn policzono dla trzech kategorii: traktorów, maszyn rolniczych i kombajnów, przyjmując współczynniki emisji z tabeli 2. W pracy nie uwzględniono emisji pochodzących z powstawania i przechowywania nawozów naturalnych; przypisano je do produkcji zwierzęcej, co jest jednym ze stosowanych sposobów ich alokacji (18).

¹Należy zwrócić uwagę na występowanie pewnej niespójności dotyczącej nazewnictwa emisji. W przewodniku IPCC (13) istnieje podział na bezpośrednie i pośrednie emisje N_2O z gleby, które to (obie kategorie) z punktu widzenia metodyki LCA są zaliczane do emisji bezpośrednich, występujących w systemie pierwszoplanowym (foreground system).

Zawartość azotu w nawozach naturalnych przyjęto zgodnie z normatywami produkcji rolnej na poziomie $5 \text{ kg N} \cdot \text{t}^{-1}$ dla obornika i $4 \text{ kg N} \cdot \text{m}^{-3}$ dla gnojowicy (5). W opracowaniu założono zerowy bilans zmian glebowej materii organicznej.

Tabela 2

Ślad węglowy wytworzenia zastosowanych środków produkcji przyjętych w pracy

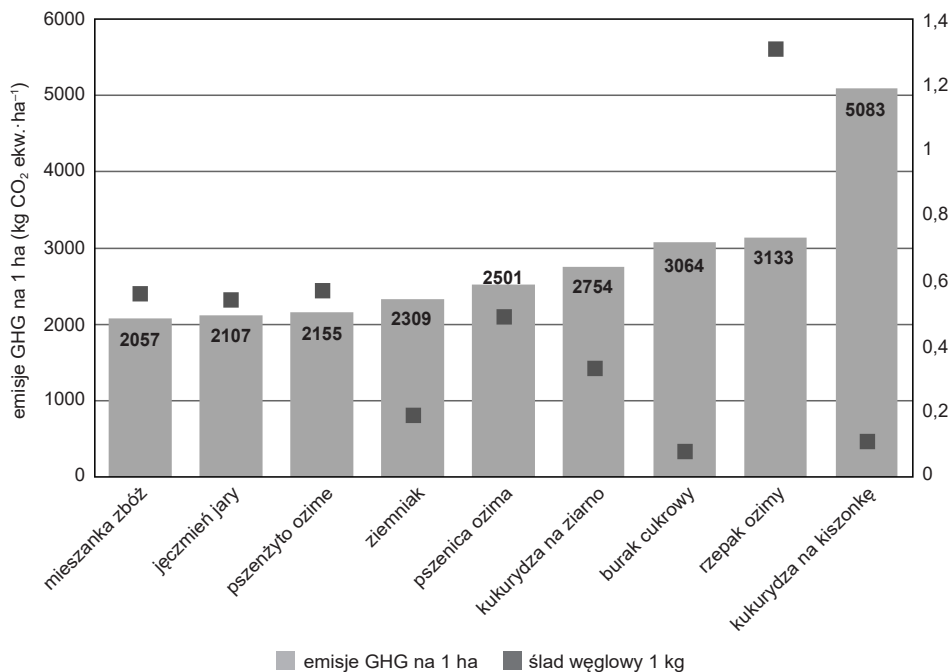
| Środek produkcji | Oznaczenie | Jednostka | Emisje (kg CO ₂ ekw. Jednostka) | Źródło |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Nawozy mineralne | <i>Prod_Naw_Min</i> | | | |
| Azotowe | | kg N | 5,88 | (18) |
| Fosforowe | | kg P ₂ O ₅ | 1,01 | (18) |
| Potasowe | | kg K ₂ O | 0,58 | (18) |
| Wapniowe | | kg CaO | 0,13 | (18) |
| Środki ochrony roślin | <i>Prod_ŚOR</i> | kg s.a. | 10,97 | (18) |
| Paliwo | <i>Prod_Paliwo</i> | l | 3,15 | (18) |
| Maszyny rolnicze | <i>Prod_Maszyn</i> | | | |
| Traktor | | kg | 7,78 | (24) Tractor, 4-wheel, agricultural {RoW} production APOS, U |
| Maszyny | | kg | 5,56 | (24) Agricultural machinery, unspecified {RoW} production APOS U |
| Kombajn | | kg | 6,66 | (24) Harvester{RoW} production APOS U |
| Nasiona/ Sadzeniaki* | <i>Nasiona/ Sadzeniaki</i> | kg | | |
| Pszenica ozima | | kg | 0,50 | (4) |
| Pszenżyto ozime | | kg | 0,50 | (4) |
| Jęczmień jary | | kg | 0,50 | (4) |
| Mieszanka zbóż | | kg | 0,50 | (4) |
| Kukurydza na ziarno | | kg | 0,90 | (4) |
| Kukurydza na kiszonkę | | kg | 0,90 | (4) |
| Ziemniak | | kg | 0,11 | (4) |
| Burak cukrowy | | kg | 6,83 | (4) |
| Rzepak ozimy | | kg | 1,40 | (4) |
| Nawozy naturalne | | t lub m ³ | 0 | (18) |

*dla nasion zbóż przyjęto wartość śladu węglowego nasion pszenicy ozimej

Źródło: opracowanie własne na podstawie źródeł wymienionych w tabeli

Wyniki i dyskusja

Emisje gazów cieplarnianych z 1 ha uprawy zawierają się w przedziale od 2,1 (mieszanka zbożowa) do 5,1 t CO₂ ekw. · ha⁻¹ (kukurydza na kiszonkę) (rys. 1). Wielkość emisji jest wprost zależna od intensywności uprawy, zwłaszcza ilości użytych nawozów azotowych; dla mieszanki zbóż i kukurydzy na kiszonkę średnie ich zużycie wynosi odpowiednio: 134,7 kg · ha⁻¹ oraz 249,8 kg · ha⁻¹.



Rys. 1. Emisje gazów cieplarnianych w odniesieniu do 1 ha uprawy (oś lewa, wykres słupkowy) i 1 kg plonu (oś prawa, wykres punktowy). Na osi poziomej rośliny posortowano rosnąco względem wielkości emisji GHG na hektar uprawy

Źródło: opracowanie własne

Ślad węglowy badanych roślin uprawnych oraz udział poszczególnych źródeł emisji, takich jak: emisje podtlenku azotu i dwutlenku węgla z gleb oraz emisje powstałe podczas produkcji użytych nawozów mineralnych, środków ochrony roślin, paliwa, nasion oraz maszyn rolniczych, przedstawiono w tabeli 3. Ponieważ emisje gazów cieplarnianych odnoszone są do plonu, najmniejszy ślad węglowy 1 kg produktu mają rośliny dające relatywnie duży plon, tj.: burak cukrowy, kukurydza na kiszonkę i ziemniak. Wytworzenie 1 kg rzepaku obarczone jest emisją 1,31 kg CO₂ ekw. Ślad węglowy uprawy zbóż zawiera się w przedziale od 0,49 do 0,57 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ plonu i jest podobny do średniej dla zbóż uzyskanej w metaanalizie Clune'a i in. (6)

wynoszącej 0,53 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ (6). Należy zauważyć, że chociaż uprawa pszenicy ozimej powoduje największą emisję gazów cieplarnianych wśród analizowanych zbóż na 1 ha, to jej ślad węglowy w odniesieniu do 1 kg plonu jest najniższy ze względu na relatywnie najwyższy plon. Ślad węglowy produkcji 1 kg kukurydzy na ziarno oszacowano na 0,33 kg CO₂ ekw., co jest wynikiem znacząco mniejszym niż podany przez Clune'a i in. (6) (0,63 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹). Jednakże w pracy Holka i in. (10) otrzymano wyniki w zakresie 0,18–0,19 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ ziarna w zależności od systemu uprawy, natomiast w opracowaniu kanadyjskim (15) – w zakresie od 0,24 do 0,35 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ ziarna.

Średni ślad węglowy uprawy ziemniaka podany przez Clune'a i in. (6) wynosi 0,20 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ i jest bardzo zbliżony do wartości uzyskanej w tym opracowaniu (0,19 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹). Wielkość śladu węglowego uprawy buraka cukrowego i kukurydzy na kiszonkę w bazach danych Agro-Footprint i Ecoinvent wynosi odpowiednio: 0,08 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ i 0,11 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ (procesy: *Sugar beet, at farm PL Mass* (3) oraz *Maize silage {RoW}|production|APOS, S*) (19) i jest równa przedstawionym wynikom.

Tabela 3

Ślad węglowy głównych roślin uprawnych z udziałem rozpatrywanych kategorii emisji

| Roślina | <i>N₂O</i> _Gleba (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>CO₂</i> _Gleba (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>Prod_Naw_Min</i> (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>Nasiona/ Sadzeniaki</i> (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>Prod_ŚOR</i> (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>Prod_Paliwo</i> (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | <i>Prod_Maszyn</i> (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) | Ślad węglowy (kg CO ₂ ekw. · kg ⁻¹) |
|-----------------------|---|---|--|---|--|---|---|---|
| Pszenica ozima | 0,23 | 0,0038 | 0,13 | 0,0195 | 0,0039 | 0,07 | 0,026 | 0,49 |
| Pszenżyto ozime | 0,26 | 0,0021 | 0,17 | 0,0277 | 0,0034 | 0,08 | 0,035 | 0,57 |
| Jęczmień jary | 0,28 | 0,0036 | 0,12 | 0,0222 | 0,0029 | 0,08 | 0,034 | 0,54 |
| Mieszanka zbóż | 0,27 | 0,0044 | 0,13 | 0,0280 | 0,0027 | 0,09 | 0,039 | 0,56 |
| Kukurydza na ziarno | 0,17 | 0,0043 | 0,09 | 0,0038 | 0,0014 | 0,04 | 0,014 | 0,33 |
| Kukurydza na kiszonkę | 0,08 | 0,0009 | 0,02 | 0,0007 | 0,0002 | 0,01 | 0,003 | 0,11 |
| Ziemniak | 0,10 | 0,0016 | 0,02 | 0,0198 | 0,0011 | 0,03 | 0,015 | 0,19 |
| Burak cukrowy | 0,04 | 0,0003 | 0,02 | 0,0004 | 0,0009 | 0,01 | 0,004 | 0,08 |
| Rzepak ozimy | 0,65 | 0,0118 | 0,43 | 0,0021 | 0,0119 | 0,15 | 0,052 | 1,31 |

Źródło: opracowanie własne

Strukturę emisji gazów cieplarnianych analizowanych roślin uprawnych, w podziale na kategorie przedstawiono w Tabeli 4. Największym źródłem emisji gazów cieplarnianych dla wszystkich ziemiopłodów są emisje podtlenku azotu z gleby

stanowiące, w zależności od rośliny, od 46 do 72%. Dla zbóż udział tego źródła zawiera się w zakresie od 46 do 49%. Emisje N_2O w uprawie kukurydzy na kiszonkę stanowią 72%, co wynika z największej ilości azotu wnoszonego do gleby, w porównaniu z innymi roślinami. Wkład tego źródła w ślad węglowy uprawy ziemniaka wynosi 55,3% przy nawożeniu azotowym równym $188,3 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$; dla pozostałych roślin waha się od 46 do 52% przy nawożeniu azotowym z zakresu od $134,5$ do $176,8 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Drugim w kolejności źródłem emisji jest produkcja nawozów mineralnych; w zależności od rośliny stanowi ona od 11 do 33% emisji całkowitych.

Tabela 4

Udział źródeł emisji w śladzie węglowym głównych upraw

| Roślina | N_2O_{Gleba} (%) | CO_2_{Gleba} (%) | $Prod_Naw_Min$ (%) | $Nasiona/Sadzeniaki$ (%) | $Prod_SOR$ (%) | $Prod_Paliwo$ (%) | $Prod_Maszyn$ (%) | Ślad węglowy (%) |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Pszenica ozima | 48,03 | 0,78 | 27,26 | 4,01 | 0,79 | 13,70 | 5,44 | 100,00 |
| Pszonczyto ozime | 45,75 | 0,37 | 28,78 | 4,83 | 0,59 | 13,53 | 6,14 | 100,00 |
| Jęczmień jary | 51,09 | 0,67 | 22,82 | 4,11 | 0,54 | 14,38 | 6,40 | 100,00 |
| Mieszanka zbóż | 49,03 | 0,78 | 22,51 | 4,99 | 0,49 | 15,20 | 7,01 | 100,00 |
| Kukurydza na ziarno | 51,64 | 1,30 | 28,33 | 1,14 | 0,42 | 12,80 | 4,37 | 100,00 |
| Kukurydza na kiszonkę | 72,13 | 0,80 | 14,06 | 0,68 | 0,17 | 9,18 | 2,98 | 100,00 |
| Ziemniak | 55,34 | 0,84 | 11,24 | 10,42 | 0,61 | 13,69 | 7,86 | 100,00 |
| Burak cukrowy | 49,04 | 0,36 | 29,98 | 0,58 | 1,13 | 13,97 | 4,94 | 100,00 |
| Rzepak ozimy | 49,89 | 0,90 | 32,67 | 0,16 | 0,91 | 11,50 | 3,98 | 100,00 |
| Średnia | 52,44 | 0,76 | 24,18 | 3,44 | 0,63 | 13,10 | 5,46 | 100,00 |

Źródło: opracowanie własne

Analizy Hilliera i in. (9) dotyczące emisji gazów cieplarnianych z uprawy roślin strączkowych, zbóż jarych i ozimych, rzepaku i ziemniaka pokazują, iż średnio 75% emisji z uprawy jest skutkiem użycia nawozów azotowych (zarówno mineralnych, jak i naturalnych); przy czym brano pod uwagę zarówno produkcję nawozów mineralnych, jak i indukowane ich użyciem emisje N_2O z gleb. Według Holka i in. (10) nawożenie mineralne jest dominującym składnikiem śladu węglowego uprawy kukurydzy na ziarno, stanowiąc od 79,4 do 84,6% w zależności od systemu uprawy. Z kolei Jayasundara i in. (15) podają, że udział nawożenia azotowego w strukturze emisji w uprawie kukurydzy wynosi 72%. Podobny udział nawożenia został też

stwierdzony w polskich badaniach dotyczących uprawy rzepaku ozimego – 78% (1) oraz pszenicy ozimej – ponad 70% (11).

Produkcja i spalanie paliwa oraz użycie maszyn stanowi od 12 do 22% emisji z uprawy, mając najmniejszy udział w uprawie kukurydzy na kiszonkę, a największy w uprawie mieszanki zbóż i ziemniaka. Udział użytych nasion stanowi od 0,2 do 5% emisji, a w przypadku sadzenia ziemniaka – 10,4%. Środki ochrony roślin odpowiadają za 0,17–1,13% śladu węglowego uprawy.

Podsumowanie

Oszacowane emisje gazów cieplarnianych pochodzące z uprawy głównych roślin, w odniesieniu do 1 ha uprawy wyniosły od 2,1 do 5,1 t CO₂ ekw. · ha⁻¹. Można je uszeregować rosnąco, w następujący sposób: zboża < ziemniak < kukurydza na ziarno < burak cukrowy < rzepak ozimy < kukurydza na kiszonkę. Wielkość emisji jest miarą intensywności uprawy i zależy głównie od ilości azotu wnoszonego do gleby.

Wyznaczone wartości śladu węglowego (w odniesieniu do 1 kg produktu) wynosiły od 0,08 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ w uprawie buraka cukrowego do 1,31 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹ w uprawie rzepaku; przyjmując dla zbóż średnio 0,54 kg CO₂ ekw. · kg⁻¹. Ograniczenie śladu węglowego uprawy jest możliwe przy wykorzystaniu postępu technicznego i biologicznego; może nastąpić poprzez obniżenie emisji lub zwiększenie plonu.

Największy wkład w emisje gazów cieplarnianych w uprawie mają: emisje podtlenku azotu z gleby (52%), produkcja nawozów mineralnych (24%), a także produkcja paliwa oraz użycie maszyn rolniczych (19%). Pozostałe źródła, takie jak emisje CO₂ z gleb będące skutkiem użycia mocznika i nawozów wapniowych oraz emisje związane z produkcją środków ochrony roślin i nasion stanowią razem ok. 5%. Ze względu na strukturę emisji gazów cieplarnianych największy potencjał ograniczenia śladu węglowego upraw związanych jest z racjonalnym nawożeniem azotowym.

Literatura

1. Bięńkowski J., Hołka M., Jankowiak J.: Ocena emisji GHG za pomocą śladu węglowego w intensywnej produkcji rolniczej, na przykładzie rzepaku ozimego. Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie – Problemy Rolnictwa Światowego, 2017, vol.17(32), 2: 18-28.
2. Bięńkowski J., Hołka M.: Cost and environmental efficiency in measuring the eco-efficiency performance of winter triticale production. BOOK OF PROCEEDINGS X International Scientific Agriculture Symposium “AGROSYM 2019”, Jahorina Bosnia Herzeg. 3–6 Oct 2019, p. 1325-1330.
3. Blonk Agri Footprint. Agri-Footprint® Database v. 2.0. 2015.
4. Bouchu J.L., Metayer N., Bordet C., Gimared M., Tuomisto H., Hastrup P., et al.: Development of Carbon Calculator to promote low carbon farming practices. 2013.
5. CDR. Normatywy produkcji rolniczej. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie, Oddział w Poznaniu. 2018 [cited 2019 Feb 11]. Protokół dostępu: <http://80.48.251.51/normatywy/Spis>

6. Clune S., Crossin E., Verghese K.: Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **140**: 766-783.
7. Google Scholar. Wyszukiwanie frazy ' „carbon footprint” AND cultivation ‘ pokazało 26100 wyników; wyszukiwanie dnia: 21-06-2022r.
8. GUS. Wyniki produkcji roślinnej w 2016 r.
9. Hillier J., Hawes C., Squire G., Hilton A., Wale S., Smith P.: The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, **7(2)**: 107-118.
10. Holka M., Bieńkowski J.: Carbon footprint and life-cycle costs of maize production in conventional and non-inversion tillage systems. *Agronomy*. 2020, **10(12)**: 1-1877.
11. Holka M.: Life cycle assessment (lca) of winter wheat in an intensive crop production system in Wielkopolska region (Poland). *Applied Ecology and Environmental Research*, 2016, **14(3)**: 535-545.
12. <https://www.lcagri.iung.pl/pl/>
13. IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute. 2006.
14. IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.; 2022.
15. Jayasundara S., Wagner-Riddle C., Dias G., Kariyapperuma K.A.: Energy and greenhouse gas intensity of corn (*Zea mays* L.) production in Ontario: A regional assessment. *Canadian Journal of Soil Science*, 2014, **94(1)**: 77-95.
16. KOBIZE. Poland's National Inventory Report 2021. Greenhouse Gas Inventory for 1988–2019. Submission under the UN Framework Convention on Climate Change and its Kyoto Protocol. 2021.
17. Łącznyński A.: *Rocznik statystyczny rolnictwa 2017*.
18. Neft J.: Biograce—complete list of standard values, Version 4 public to harmonise European GHG calculations. [Internet]. 2011 [cited 2018 Apr 11]. Protokół dostępu: <http://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/standardvalues>
19. Nemecek T.: Maize silage {RoW}| production | APOS, S, ecoinvent database version 3.4
20. Nemecek T., Kägi T.: Life cycle inventories of agricultural production systems. 2007, **15**: 1-360.
21. Pandey D., Agrawal M.: Carbon footprint estimation in the agriculture sector. In: Muthu SS, editor. *Assessment of carbon footprint in different industrial sectors, Volume 1*. Singapore: Springer Singapore; 2014 [cited 2018 Mar 26]. p. 25-47. Protokół dostępu: http://link.springer.com/10.1007/978-981-4560-41-2_2
22. Shukla P.R., Skea J., Calvo Buendia E., Masson-Delmotte V., Pörtner H.O., Roberts D.C., Zhai P., Slade R., Connors S., van Diemen R., Ferrat M., Haughey E., Luz S., Neogi S., Pathak M., Petzold J., Portugal Pereira J., Vyas P., Huntley E., Kissick K., Belkacemi M., Malley J. (eds.): *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC; 2019.
23. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds.): *Climate Change 2007: The Physical Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York. 2007. Protokół dostępu: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.

-
24. Wernet G., Bauer C., Steubing B., Reinhard J., Moreno-Ruiz E., Weidema B.: The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, **21(9)**: 1218-1230. Protokół dostępu: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> [Accessed 05-07-2022].
 25. W i e d m a n n T., M i n x J.: A definition of ‘carbon footprint’. *Ecological Economics Research Trends*, 2008, **1**: 1-11.
 26. Z h a n g D., Shen J., Zhang F., Li Y., Zhang W.: Carbon footprint of grain production in China. *Scientific Reports*, 2017, **7(1)**. Protokół dostępu: <http://www.nature.com/articles/s41598-017-04182-x>
-

Adres do korespondencji:

Tomasz Żyłowski
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8,
24-100 Puławy
tel. 81 4786 898
email: Tomasz.Zylowski@iung.pulawy.pl

AUTOR
Tomasz Żyłowski

ORCID
0000-0002-6665-2787