

Antoni Faber, Zuzanna Jarosz, Artur Łopatka, Grzegorz Siebielec

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

OCENA ZMIAN ZAWARTOŚCI WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBACH
NA PODSTAWIE DANYCH MONITORINGU CHEMIZMU
GLEB ORNYCH W POLSCE*

Słowa kluczowe: węgiel organiczny, gleby, monitoring

Wstęp

Zawartość węgla organicznego (C_{org}) w glebach użytków rolnych uważana jest za istotny wskaźnik kultury rolnej gleb. Sam zaś C_{org} , zawarty w glebowej materii organicznej (SOM), traktowany był i jest, jako czynnik wpływający na chemiczne, fizyczne i biologiczne właściwości gleb, a przez to pośrednio na ich produktywność.

W glebach gruntów ornych w Polsce (9), a także w wielu krajach europejskich (5) notuje się tendencję spadku zawartości C_{org} . Nazbyt często jednak istnieją wątpliwości, co do wielkości podawanych w publikacjach średnich spadków zawartości C_{org} w glebach krajów UE. Owe wątpliwości wynikać mogą głównie z niewystarczającej liczby punktów monitoringowych, z różnych, w różnych krajach, metodyk monitorowania zawartości C_{org} w glebach oraz różnych metod opracowywania wyników. Jedno pozostaje jednak poza wszelką wątpliwością – nadmierne straty węgla organicznego z gleb są przejawem ich degradacji.

Na potrzebę dbałości o zasoby C_{org} w glebach zwrócono uwagę w projekcie Dyrektywy Glebowej UE (2), która w życie nie weszła, nie ze względów na błażość merytoryczną tego i innych objętych nią zagadnień ochrony gleb, lecz ze względu na koszty, które mogłyby być trudne do uniesienia nawet przez bogate kraje UE. Ostatnio jednak sprawa zawartości C_{org} w glebach nabiera nowego znaczenia w związku z decyzją Parlamentu Europejskiego i Rady UE w sprawie zasad rozliczania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w rolnictwie i leśnictwie (4) oraz projektem nowych ram polityki klimatyczno-energetycznej (3). Oba dokumenty w konsekwencji mające prowadzić, nie wdając się w szczegóły, do obligatoryjnego w rolnictwie i leśnictwie ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz/lub zwiększe-

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.5 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

nia pochłaniania C w perspektywie po 2020 r. Wiadomym przy tym jest, że relatywnie efektywniejszym, technicznie i ekonomicznie, może być w rolnictwie zwiększenie pochłaniania C (głównie CO₂) poprzez zwiększenie sekwestracji C w glebach, niż ograniczanie emisji CH₄ czy N₂O (8). W ten sposób zawartości C w glebach i jego sekwestracja nabierają istotnego znaczenia w mitygacji zmian klimatu, stając się na nowo przedmiotem szczególnego zainteresowania specjalistów oraz decydentów. W sytuacji już obowiązujących i mających nastąpić regulacji prawnych rodzą się więc pytania: jakim monitoringiem węgla organicznego w glebach już obecnie dysponujemy w Polsce, a jakim winniśmy dysponować, aby możliwym było sprostanie przez rolnictwo nowym wymaganiom określonych w tych regulacjach prawnych? Celem niniejszego opracowania jest więc próba znalezienia odpowiedzi na te pytania. Próba ta, ze względu na dostępność danych, ograniczona została do zawartości węgla organicznego w glebach gruntów ornych.

Metodyka

W analizach wykorzystano wyniki oznaczeń zawartości węgla organicznego w warstwie ornej gleb, pochodzące z monitoringu chemizmu gleb ornych w Polsce (7), który jest częścią składową Państwowego Monitoringu Środowiska, w zakresie jakości gleb i ziemi. Obowiązek prowadzenia tych i innych badań monitoringowych wynika z zapisów krajowych aktów prawnych, m.in. ustawy Prawo Ochrony Środowiska (Dz.U., 2008 r., 25 poz. 150 z późniejszymi zmianami). Monitoring realizowany jest od 1995 r. w 5-letnich odstępach czasowych (turach). Próbkę gleb w czterech turach monitoringu (1995, 2000, 2005 i 2010) pobierane były z 216 stałych punktów, które zlokalizowane zostały na gruntach ornych charakterystycznych dla pokrywy glebowej kraju. W próbkach z tur monitoringu oznaczano, między innymi, zawartości węgla organicznego metodą spalania na mokro (zmodyfikowana metoda Tiurina). Monitoring prowadzony jest przez Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy w Puławach na zlecenie Głównego Inspektoratu Ochrony Środowiska, który finansuje badania ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Wyniki oznaczeń węgla organicznego poddano analizom statystycznym, których celem było: porównanie regresji liniowych zawartości C_{org} w turach monitoringu (2000, 2005 i 2010) w porównaniu do roku wyjściowego (1995), analiza przyrostów i spadków zawartości węgla organicznego w turach monitoringu, analiza wariancji (Robust Analysis of Variance), analiza ryzyka związanego z przyjęciem zawartości C_{org} dla rozkładów statystycznych oraz rozkładów symulowanych metodą Monte Carlo oraz analiza niepewności oznaczeń C_{org}. Wszystkie wymienione analizy wykonywano dla całego zbioru oznaczeń C_{org} z 216 punktów monitoringu po jego oczyszczeniu z oznaczeń nadmiernie odstających. W analizach wykorzystywano pakiety statystyczne Statgraphics, Palisade @Risk, ROBSTAT oraz metodę szacowania

niepewności oznaczeń dla 95% przedziału ufności według rozkładu t-Studenta. Dodatkowo oszacowano na podstawie oznaczeń zawartości C_{org} w glebach w 1995 r.: minimalne wykrywalne zmiany zawartości C_{org} w monitorowanych glebach, liczbę punktów monitoringu niezbędną do wykrycia zmian zawartości C_{org} o 5, 2,5 i 1%, wartości średnie C_{org} z monitoringu oraz minimalny odstęp czasu pobierania próbek w monitoringu niezbędny dla wykrycia stwierdzonego tempa zmian zawartości C_{org} w turach monitoringu. Szacunki wykonano z uwzględnieniem założeń i metodyki zaczerpniętej z literatury (5). Uzyskane oszacowania porównano z analogicznymi oszacowaniami dla liczniejszej próby oznaczeń ($n = 764$) zawartości C_{org} w warstwie ornej gruntów w Polsce. Dane zaczerpnięte zostały z bazy danych dla krajów UE, która utworzona została w projekcie LUCAS (<http://eussoils.jrc.ec.europa.eu/projects/Lucas/Data.html> - referencja). C_{org} w tych próbach oznaczano metodą spalania na sucho, z różnicy pomiędzy węglem całkowitym i węglem nieorganicznym (referencja: ISO 10694: 195 - referencja).

Wyniki i dyskusja

Oznaczenia zawartości C_{org} w każdym systemie monitoringu obciążone są zawsze pewnymi błędami, mimo wszelkich starań o należyłą staranność metodyczną i analityczną. Dlatego przed każdą analizą statystyczną wyników monitoringu warto i należy zbiór danych oczyścić z wyników nadmiernie odstających. Czyniono to dwuetapowo. W etapie pierwszym, po policzeniu wiązki porównywanych regresji liniowych, wyłączano ze zbioru rekordy danych nadmiernie wpływające na regresje (zbyt wielkie reszty z regresji lub nadmierny wpływ na regresje). W ten sposób wyłączono do oddzielnego opracowania 26 punktów z ogólnej liczby 216 punktów w monitoringu (12% danych). Zawartości C_{org} w owych punktach zbyt mocno odbiegały od zawartość w pozostałych 190 punktach monitoringu. W drugim etapie oczyszczania zbioru zbadano rozkłady statystyczne danych dla każdej tury oznaczeń C_{org} w monitoringu i na ich podstawie przeprowadzono symulacje rozkładów metodą Monte Carlo dla 10 000 interakcji losowych. Zgodnie z dość powszechnie przyjętą konwencją uznano, że oznaczenia C_{org} mniejsze od wartości granicznych 5% lub większe od 95% z każdego rozkładu symulowanego są obciążone zbyt wysokim ryzykiem, aby mogły być uwzględnione w dalszych analizach. Aby jednak liczebności zbioru, i tak niezbyt liczny, nie pomniejszać – wartości oznaczeń C_{org} mniejsze lub większe od podanych wartości granicznych rozkładu zastąpiono oszacowanymi wartościami granicznymi w każdej turze monitoringu. W ten sposób uzyskano oczyszczony i gotowy do dalszych analiz zbiór zawartości C_{org} (tab. 1).

Tabela 1

Statystyki zawartości węgla organicznego w warstwie ornej gleb ornyc w Polsce
(g C kg⁻¹, liczba próbek w każdej turze: 190)

Statystyki	Rok (rok monitoringu)			
	1995 (0)	2000 (5)	2005 (10)	2010 (15)
Średnia	10,08	10,11	9,55	10,05
Mediana	9,80	9,70	9,40	9,60
Wariancja	5,95	5,82	5,06	7,13
Odchylenie standardowe	2,44	2,41	2,25	2,67
Współczynnik zmienności	24,2	23,9	23,6	26,6
Błąd standardowy	0,177	0,175	0,163	0,194
Bezwzględne odchylenie medianowe (MAD)	1,60	1,65	1,60	1,80
Minimum	6,18	6,41	5,99	6,23
Maksimum	14,84	15,24	14,19	15,88
Zakres	8,66	8,83	8,20	9,65
Standaryzowana skośność	1,76	2,65	2,53	3,47
Standaryzowana kurtოza	-2,05	-1,58	-1,46	-1,52

Źródło: opracowanie własne

Z przedstawionych danych wynika, że zawartości C_{org} wraz z kolejnymi turami monitoringu w coraz większym stopniu odchylają się od statystycznych rozkładów normalnych. W tej sytuacji najlepszą miarą tendencji centralnej zawartości C_{org} w latach monitoringu jest mediana, zaś miarą zmienności bezwzględne odchylenie medianowe (MAD). Pewien wyjątek stanowić mogą dane z 1995 r., ponieważ, jak stwierdzono, nie można odrzucić hipotezy, że mają one rozkład normalny. Test Mood'a dla median C_{org} w turach monitoringu wykazał, iż z 95% ufnością można przyjąć, że nie różnią się one istotnie. Innymi słowy w okresie piętnastolecia „przeciętna” zawartość C_{org} w warstwie ornej gruntów ornyc w Polsce nie zmieniła się. Nie oznacza to, że zmiany takie nie zachodziły w glebach poszczególnych punktów monitoringu.

Polski monitoring uwzględnił stosunkowo mało punktów (jest ze względu na koszty rozwiązaniem oszczędnym). Powstaje więc pytanie: czy podane w tabeli mediany zawartości C_{org} w turach monitoringu mogły być inne przy większej ilości punktów monitoringowych? Odpowiedzi na to pytanie dostarczyły symulacje wykonane metodą Monte Carlo. Mediany C_{org} w turach monitoringu i symulacjach wynosiłyby odpowiednio (g C kg⁻¹): 1995: 9,80 i 9,83; 2000: 9,70 i 9,70; 2005: 9,40 i 9,24 oraz 2010: 9,60 i 9,49. Zakładając więc losowość zmian, zawartości C_{org} w 3 i 4 turze monitoringu powinny być niższe od stwierdzonych przez monitoring odpowiednio o: 0,16 i 0,11 g C kg⁻¹. Nasuwa to kolejne pytanie: czy monitoring takie zmiany może wykryć?

Porównanie uzyskanych regresji liniowych wykazało, że zawartości C_{org} w 5, 10 i 15 roku monitoringu, w stosunku do roku wyjściowego 1995, można opisać równaniami:

$$C_{\text{org}}(1995) = 0,529 + 0,945 \cdot C_{\text{org}}(2000)$$

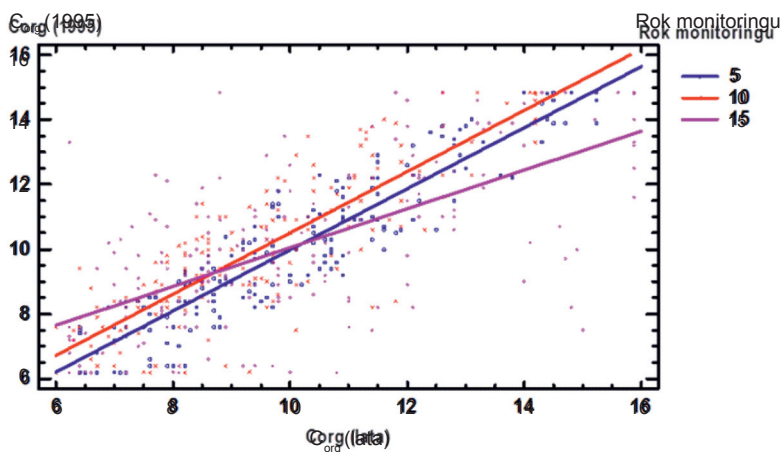
$$C_{\text{org}}(1995) = 1,040 + 0,946 \cdot C_{\text{org}}(2005)$$

$$C_{\text{org}}(1995) = 4,059 + 0,598 \cdot C_{\text{org}}(2010)$$

gdzie:

C_{org} – zawartość węgla organicznego w latach monitoringu w $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Model wyjaśnia 68,5% zmienności. Bliższa analiza modelu wykazała, że pierwsze dwie regresje (2000 i 2005) są przesunięte względem siebie o wartość wyrazu wolnego (rys. 1). Przesunięcie to nie jest statystycznie istotne, co oznacza, że zawartości C_{org} w 5 i 10 roku monitoringu mogłyby być opisane wspólną regresją. W konsekwencji można uznać, że zawartości C_{org} istotnie statystycznie różniły się dopiero w 15 roku monitoringu.



Rys. 1. Porównywane regresje liniowe ($C_{\text{org}} - \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Źródło: opracowanie własne

W nachyleniu regresji C_{org} w 5 i 15 roku monitoringu znamionym jest to, że w glebach o niskiej zawartości węgla organicznego zawartości tego pierwiastka w 15 roku monitoringu wzrosły w porównaniu do 5 i 10 roku monitoringu. Wartości te mały do zera przy zawartości C_{org} ok. $10,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, po czym zawartość C_{org} zaczęła maleć w glebach o większej zawartości C_{org} . Wynik ten potwierdza co do zasady podobną zależność, którą opisali wcześniej *Stuczynski i in.* (9) analizując historyczne zawartości C_{org} w profilach wzorcowych gleb. Wyniki opisane przez cytowanych autorów próbowano różnie interpretować, np. efektem rozcieńczenia C_{org} wskutek pogłębiania głębokości orki z biegiem lat. W omawianym przypadku trudno zakładać, że w okresie lat 1995-2010 nastąpiły znaczące zmiany w głębokości orki. Wyjaśnienie przyczyn tej zależności, w sposób niewątpliwie istniejącej – jak wykazały analizy dwóch niezależnych serii danych, wymaga głębszych badań.

Zakresy różnic zawartości C_{org} w stosunku do roku 1995, traktowanego jako rok „zerowy” monitoringu, rosły w kolejnych turach monitoringu (tab. 2). Rozkłady statystyczne różnic odbiegały od rozkładów normalnych. Podobnie jak w przypadku zawartości C_{org} statystykami dobrze opisującymi różnice i ich zmienność są mediana oraz bezwzględne odchylenie medianowe (MAD). Testowanie median różnic zawartości C_{org} wykazało, że nie różnią się one istotnie od „zera” dla tury drugiej monitoringu (1995-2000) oraz czwartej (1995-2010). Jedynie w turze trzeciej (1995-2005) mediana różniła się od „zera”, co równoznaczne było z przyrostami zawartości węgla organicznego w tej turze monitoringowej. Mediany wykazały więc, że generalnie gleby objęte monitoringiem nie tracą C_{org} , jakkolwiek zmienność różnic w porównywanych turach monitoringu była dość duża i wynosiła odpowiednio: $0 \pm 0,70$; $0,6 \pm 0,70$; $0,1 \pm 1,13$ (mediana \pm MAD).

Tabela 2

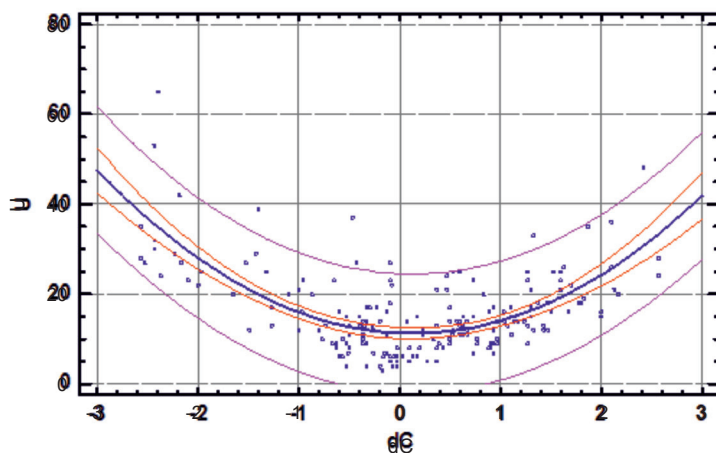
Statystyki różnic zawartości węgla organicznego w warstwie ornej gleb ornyc w Polsce
(g C·kg⁻¹, liczba próbek w każdej turze: 190)

Statystyki	Tura monitoringu		
	1995-2000	1995-2005	1995-2010
Średnia	-0,0271	0,5271	0,0283
Mediana	0,000	0,600	0,100
Wariancja	0,776	1,433	4,542
Odchylenie standardowe	0,881	1,197	2,131
Współczynnik zmienności	-3256%	227%	7541%
Błąd standardowy	0,0639	0,0868	0,1546
Bezwzględne odchylenie medianowe (MAD)	0,700	0,700	1,130
Minimum	-1,9	-3,4	-7,5
Maksimum	2,0	3,2	7,1
Zakres	3,90	6,60	14,57
Standaryzowana skośność	-0,22	-3,11	-1,85
Standaryzowana kurtoza	-2,45	1,99	3,75

Źródło: opracowanie własne

Jeśli przedstawione wyniki monitoringu miałyby być wykorzystywane jako miary strat C_{org} wyrażonych wartościami ze znakiem ujemnym lub sekwestracji wyrażonej wartościami ze znakiem dodatnim, niezbędnym byłoby określenie jakie są niepewności oznaczeń tego pierwiastka. Wiadomym jest, że na wartość tej niepewności składają się niepewności związane z pobieraniem próbek gleb, analitycznym oznaczaniem C_{org} oraz pedogenezą i użytkowaniem gleb. Oddzielne oszacowanie tych niepewności dla posiadanych danych nie było możliwe. Przybliżone ich oszacowanie polegało na obliczeniu niepewności oznaczeń zawartości C_{org} w punktach monitoringowych, a następnie określeniu zależności pomiędzy tymi niepewnościami, a średnimi różnicami

zawartości C_{org} w tych punktach. Oszacowana zależność miała postać wielomianu drugiego stopnia, była istotna statystycznie i wyjaśniała 48,3% zmienności różnic zawartości C_{org} (rys. 2).



Rys. 2. Zależność pomiędzy niepewnościami oznaczeń C_{org} w monitoringu (U , %) a średnimi różnicami zawartości C_{org} ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w trzech turach monitoringu (15-leciu)

Źródło: opracowanie własne

Jak wynika z przedstawionej zależności, wraz ze zwiększaniem się różnic zawartości C_{org} rośnie niepewność oznaczeń. Przy różnicach zawartości C_{org} w latach monitoringu równych „zero”, oszacowana niepewność zawierałaby się w zakresie 0-25% dla 95% przedziału predykcji nowych wartości lub w zakresie 10-13% dla 95% przedziału ufności wartości średniej z wielu oznaczeń różnic C_{org} (tab. 3). Wartości te można przypisać niepewnościom związanym z pobieraniem próbek oraz procedurami analitycznymi. Różnice pomiędzy niepewnościami przy zerowych zmianach zawartości C_{org} i zmianach większych można przypisać historii rolniczego użytkowania gleb. Jeśli oszacowane wartości porównać z oszacowaną wartością niepewności emisji CO_2 z użytków rolnych, wynoszącą według KOBiZE 20,6% (1), to monitoring gwarantowałby uzyskanie takich niepewności, w zakresie zmian zawartości C_{org} $0\pm 1 \text{ g C kg}^{-1}$ (ok. $0\pm 4,3 \text{ t C ha}^{-1}$) (tab. 3). Problem jednakże w tym, że jak wynika z literatury minimalna wykrywalna różnica zawartości C_{org} , dla punktu monitoringowego (pola) przy pobraniu 100 próbek, waha się w zakresie $0,12\text{-}0,31 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($0,5\text{-}1,3 \text{ t C ha}^{-1}$) (6). Zagadnienie minimalnej wykrywalności C_{org} jest dla szacunków emisji tak ważne, że poddane zostało dalszym, głębszym analizom dla całego monitoringu. Zmierzają one do określenia: minimalnej wykrywalnej zmiany zawartości C_{org} w monitoringu, niezbędnej liczby punktów monitoringu oraz minimalnego okresu czasu wymaganego dla wykrycia określonego tempa zmian zawartości C_{org} .

Tabela 3

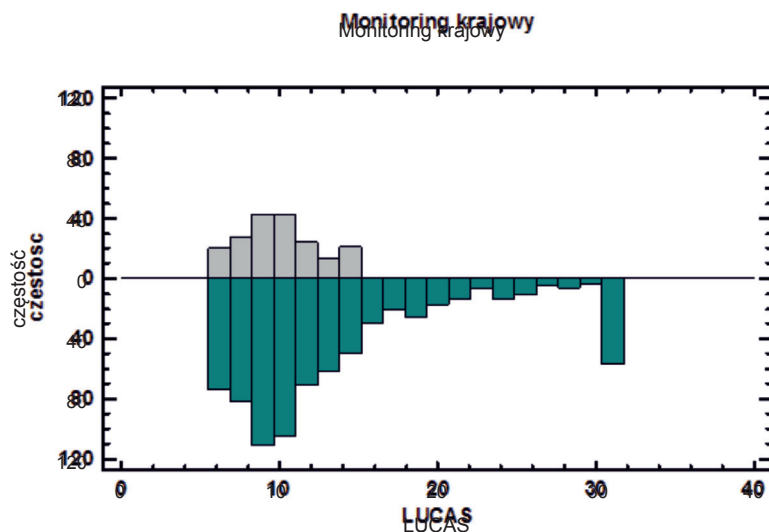
Szacunki zmian zawartości węgla organicznego ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) w turach monitoringu oraz wielkości niepewności oznaczeń C_{org} (%)

Zmiany C	Niepewności	95% przedział predykcji		95% przedział ufności średniej	
-3	48	33	62	43	53
-2,5	37	23	51	33	40
-2	28	15	41	26	31
-1,5	21	8	34	19	23
-1	16	3	29	15	17
-0,5	13	0	26	11	14
-0,3	12	0	25	11	13
-0,1	11	0	25	10	13
0	11	0	25	10	13
0,1	11	0	24	10	12
0,3	11	0	25	10	13
0,5	12	0	25	11	13
1	14	1	27	13	15
1,5	18	5	32	17	20
2	24	11	38	22	27
2,5	32	18	46	29	36
3	42	28	56	37	47

Źródło: opracowanie własne

Biorąc za podstawę wyniki monitoringu z 1995 roku, minimalna wykrywalna zmiana zawartości C_{org} , oszacowana zgodnie z wcześniej przywołaną metodyką (5), wynosiła $0,41 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (ok. $1,75 \text{ t C ha}^{-1}$). Jest to wartość co do wielkości zbliżona do tych jakie oszacowano dla najlepszych monitoringów w Europie (5). Niestety, wartość ta jest zbyt duża, aby skutecznie wykrywać mniejsze zmiany zawartości C_{org} szacowane średnio dla gruntów ornych w Polsce. Według KOBiZE szacunkowe straty węgla organicznego z gruntów ornych wynosiły w Polsce średnio $0,0638 \text{ t C ha}^{-1}$ w 2011 r. (1). Była to więc zmiana zawartości C_{org} leżąca poza limitem detekcji monitoringu. Hipotetycznie można zakładać, co zostanie sprawdzone, że minimalna wykrywalna zmiana C_{org} w monitoringu mogłaby się zmniejszyć (większa precyzja monitoringu) wskutek zwiększenia liczby punktów monitoringu. Jednakże koszty prowadzenia monitoringu byłyby wtedy większe. Zachodzi więc pytanie, jakie wielkości zmian zawartości C_{org} należałoby monitorować. W brytyjskim monitoringu, należącym do bodaj najlepszych obecnie w Europie, dostosowano liczbę punktów monitoringu do wykrywania zmian na poziomie 5% średniej wartości zawartości węgla organicznego w glebach kraju (5). Jednakże dla lepszej pogładowości wyników szacunki przeprowadza się niekiedy dla 5, 2,5 i 1% średniej wartości zawartości C w glebach kraju (5). Do wykrywania podanych różnic zawartości C_{org} potrzebowalibyśmy

odpowiednio 126, 505 i 3142 punktów monitoringowych zlokalizowanych na gruntach ornych w Polsce oraz analiz wykonywanych z odstępem czasowym 11 lat (tab. 4). Według danych literaturowych oszacowana liczba punktów dla analogicznych procentowych odchyłek od średniej zawartości C_{org} wynosiłaby w Polsce odpowiednio: 1580, 6320 i 39502 punktów monitoringowych z analizami w odstępem czasowym tur monitoringu co 10 lat oraz minimalną wykrywalnością C_{org} wynoszącą $0,4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, gdyby monitoring obejmował grunty orne, użytki zielone, lasy oraz gleby organiczne (5). Różnica pomiędzy przedstawionymi szacunkami wynika z różnic w zmienności zawartości węgla organicznego we wziętych pod uwagę danych. Cytowane wyniki literaturowe nie mogą stanowić miarodajnych danych porównawczych dla monitoringu krajowego, który obejmuje jedynie grunty orne. Dlatego, jako niezależną serię porównawczą wykorzystano oznaczenia zawartości węgla organicznego w glebach wykonane w projekcie LUCAS dla wszystkich krajów UE. W przeprowadzonych analizach statystycznych wykorzystano serię oznaczeń C_{org} w warstwie ornej gleb w Polsce, którą oczyszczono z wartości odstających. Mediana zawartości C_{org} wynosiła dla tej serii danych $11,3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i była dla przedziału ufności 95% istotnie różna od mediany z monitoringu krajowego, która wynosiła $9,8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Serie danych z monitoringu krajowego oraz LUCAS istotnie różniły się również rozkładem danych (rys. 3). Monitoring LUCAS w większym stopniu uwzględniał gleb zasobniejsze w węgiel organiczny.



Rys. 3. Rozkłady statystyczne zawartości C_{org} ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) w monitoringu chemizmu gleb ornych w Polsce (1995 r.) oraz serii danych z projektu LUCAS

Źródło: opracowanie własne

Minimalna wykrywana zawartość C_{org} dla serii danych z projektu LUCAS była wyższa w porównaniu z monitoringiem krajowym i wynosiła $0,46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. Niezbędne ilości punktów monitoringu dla wykrycia 5, 2,5 i 1% średniej wartości C_{org} w kraju wynosiły odpowiednio 416, 1667 i 10418, zaś minimalny okres wykrycia zmian zawartości C_{org} wyniósł 12 lat. Tak więc, zwiększenie liczby punktów monitorowania zmian zawartości C_{org} w gruntach ornych w Polsce może zwiększyć reprezentatywność monitoringu, ale raczej nie przyczyni się do obniżenia minimalnej wykrywalności zmian zawartości C_{org} (tab. 4).

Tabela 4

Charakterystyki porównywanych monitoringów zawartości węgla organicznego w gruntach ornych

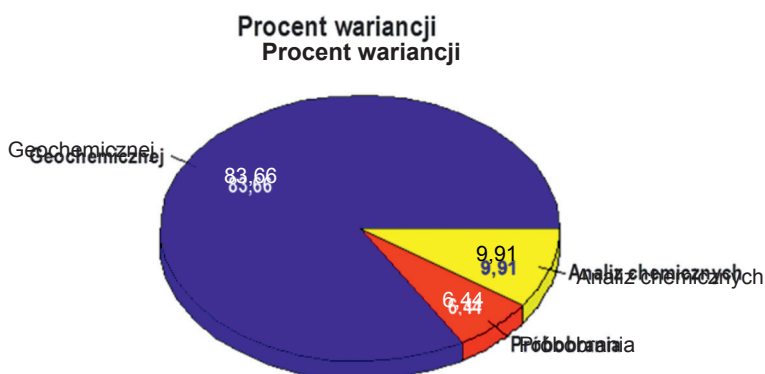
Wyszczególnienie	Jednostka	Monitoring	
		krajowy	LUCAS
Liczba punktów monitoringu	-	190	764
Średnia zawartość C w warstwie ornej	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	10,1	12,5
Mediana zawartości C w warstwie ornej	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	9,8	11,3
Minimalna wykrywalna zawartość C	$\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	0,41	0,46
Liczba punktów niezbędnych do wykrycia zmiany zawartości C w procentach średniej zawartości dla kraju	5,0%	126	416
	2,5%	505	1667
	1,0%	3142	10418
Minimalny czas niezbędny do wykrycia zmiany	lata	11	12

Źródło: opracowanie własne

Przeprowadzone analizy potwierdzają wnioski wynikające z analiz monitoringów zawartości C_{org} w glebach UE (5), które wskazują, że ich wyniki będą nieprzydatne w inwentaryzacjach krajowych emisji gazów cieplarnianych. Czy istnieje jakakolwiek szansa, że poprawa procedur monitoringu mogłaby wyżej podaną konstatację zmienić? Aby odpowiedzieć na to pytanie przeprowadzono analizę wariancji (Robust Analysis of Variance; R_ANOVA). W analizie tej przyjęto, że tury monitoringu 1995 i 2000 oraz 2005 i 2015 są powtórzeniami analiz chemicznych. Jest to, jak się wydaje, dopuszczalne uproszczenie wynikające z wcześniej przeprowadzonych analiz regresji. R_ANOVA rozdzieliła całą wariancję na kategorie: wariancja geochemiczna (pedogeneza i użytkowanie gleb), wariancja pobrania próbek, wariancja analiz chemicznych (rys. 4).

Udziały tych kategorii wariancji wynosiły odpowiednio: 83,7%, 6,4% oraz 9,9%. Z wyników tych możnaby wnosić, że w polskim monitoringu mamy dostatecznie dobrą lokalizację pobierania próbek. Należałoby dążyć natomiast do zmniejszenia wariancji analitycznej. Teza ta wymaga sprawdzenia poprzez wprowadzenie wykonywania oznaczeń C_{org} co najmniej w dwóch powtórzeniach, np. w 10% prób w każdej turze. Można by wtedy oszacować w każdej turze niepewności oznaczeń

oraz wariancje. Wydaje się, że takie działanie dostarczyłoby lepszej rękąjmi jakości monitorowania zmian C_{org} w gruntach ornych.



Rys. 4. Wariancja geochemiczna, pobrania próbek i analiz chemicznych w polskim monitoringu zawartości C_{org} w powierzchniowej warstwie ornej gleb użytkowanych rolniczo (1995-2010)

Źródło: opracowanie własne

Podsumowanie

1. Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce, prowadzony w okresie 15-lecia, nie wykazał istotnych statystycznie różnic w przeciętnych (mediana) zawartościach węgla organicznego w warstwie ornej gleb w 5-letnich turach monitoringu (1995, 2000, 2005, 2010),
2. Przeciętnie (mediana) nie stwierdzano strat zawartości węgla organicznego w glebach ornych w Polsce, jednakże w 15 roku monitoringu odnotowano wzrost zawartości węgla organicznego w glebach o niskiej wyjściowej zawartości tego pierwiastka oraz spadek w glebach o wyższej wyjściowej zawartości węgla organicznego,
3. Minimalna wykrywalna różnica zawartości węgla organicznego w monitoringu krajowym wynosiła $0,41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, co pozwalało wykrywać zmiany zawartości węgla na poziomie 5% średniej zawartości tego pierwiastka w warstwie ornej gleb przy 126 punktach monitoringu,
4. Zwiększenie liczby punktów monitoringu nie zmniejszyło minimalnej wykrywalności różnic która wynosiła $0,46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ i pozwalała wykrywać zmiany zawartości węgla na poziomie 5% średniej zawartości tego pierwiastka w warstwie ornej gleb przy 416 punktach monitoringu,
5. Monitoring zawartości węgla organicznego w gruntach ornych w Polsce będzie nieprzydatny dla krajowych inwentaryzacji emisji gazów cieplarnianych z rolnictwa, podobnie jak inne monitoringu istniejące w UE.

Literatura

1. B e b k i e w i c z K. i in.: Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2013. Inwentaryzacja gazów cieplarnianych dla lat 1988-2011. Instytut Ochrony Środowiska – PIB, KOBiZE, Warszawa 2013.
2. COM(2006)232. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC (<http://ec.europa.eu/environment/soil/>).
3. European Commission, 2014. 2030 framework for climate and energy policies (http://ec.europa.eu/clima/policies/2030/index_en.htm).
4. Parlament Europejski, 2013. Decyzja Parlamentu Europejskiego i Rady NR 529/2013/UE z dnia 21 maja 2013 r, w sprawie zasad rozliczania emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w wyniku działalności związanej z użytkowaniem gruntów, zmianą użytkowania gruntów i leśnictwem oraz informacji o działaniach związanych z tą działalnością, (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:165:0080:0097:PL:PDF>).
5. S a b y N. P. i in.: Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? *Global Change Biology*, 2008, **14**: 2432-2442.
6. S c h r u m p f M. E. D. i in.: How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences Discuss.*, 2011, **8**: 723-769.
7. S i e b i e l e c G. i in.: Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010-2012. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Warszawa 2012.
8. S m i t h P. I. in., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil. Trans. R., Soc. B*, 363, 789-813.
9. S t u c z y Ń s k i T. i in.: Przyrodnicze uwarunkowania produkcji rolniczej w Polsce. *Studia i Raporty IUNG-PIB, Puławy* 2007, **7**: 77-115.

Adres do korespondencji:

prof. dr hab. Antoni Faber
Zakład Biogospodarki i Analiz Systemowych
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: (81) 47 86 767
e-mail: faber@iung.pulawy.pl