

Możliwości bilansowania wymiany CO₂ przy wykorzystaniu aparatury pomiarowej

Andrzej Górnik

Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, Polska

Abstrakt. W publikacji przedstawiono przegląd metod pomiarowych strumieni dwutlenku węgla (CO₂) oraz możliwości jego bilansowania. Dokonano porównania następujących metod: komór zamkniętych bez możliwości przepływu powietrza, komór zamkniętych z możliwością przepływu powietrza, komór otwartych z możliwością przepływu powietrza. Ponadto w publikacji opisano: zautomatyzowany system pomiaru wymiany gazowej CO₂ z gleby typu ACE, przenośny system pomiaru wymiany gazowej CO₂ z gleby SRS-1000, oraz metodę kowariancji wirów. Duża rozbieżność wyników pomiarów przy uwzględnieniu dostępnych metod jest zagadnieniem, które wymaga szczególnej dyskusji prowadzącej do oszacowania dokładnej wymiany strumieni CO₂. Szerokie spektrum działania oraz duża uniwersalność zautomatyzowanych systemów pomiarowych daje możliwość ich dopasowania do bilansowania strumieni CO₂ w różnych ekosystemach.

słowa kluczowe: strumienie CO₂, metody pomiarowe, aparatura pomiarowa, bilansowanie CO₂

WSTĘP

W dobie zauważalnych zmian klimatycznych, takich jak: wzrost średniej temperatury powietrza o 0,6⁰C w ostatnim stuleciu, zmiany długości pór roku czy nierównomierność rozkładu opadów w ciągu roku, istnieje potrzeba obserwacji zmian stężenia gazów znajdujących się w atmosferze (www.ipcc.ch). Niektóre gazy mają zdolność pochłaniania promieniowania podczerwonego z powierzchni Ziemi oraz oddawania go do atmosfery i nazywane są gazami cieplarnianymi (Dz.U. 1996 r. Nr 53 poz. 238). Do najbardziej aktywnych gazów cieplarnianych należą: para wodna, tlenek węgla IV, nazywany potocznie dwutlenkiem węgla (CO₂), metan (CH₄), podtlenek azotu (N₂O).

Niegdyś do pomiaru strumieni CO₂ z gleby stosowano metodę absorpcji alkalicznej, która oparta była na zjawisku pochłaniania CO₂ przez gąbczasty krążek nasączony wodorotlenkiem potasu. Jednakże rozwój technik pomiarowych spowodował, że obecnie dostępnych jest wiele innych, bardziej zaawansowanych technicznie metod, takich jak: statyczne i dynamiczne metody komorowe, zautomatyzowane stacje komorowe czy metoda kowariancji wirów. Przyszłość obserwacji strumieni CO₂ leży jednak po stronie sieci złożonych z pojedynczych stacji pomiarowych oraz wykorzystania ich na skalę światową. Sieć Fluxnet jest globalnym koordynatorem skupiającym informacje z międzykontynentalnych sieci takich jak: Fluxnet-Canada, AmeriFlux, LBA, CarboEuropeIP, NECC, CarboAfrica, Afriflux, Chinaflux, USCCC, Asiaflux, Koflux, Ozflux, TCOS-Siberia oraz indywidualnych stacji pomiarowych nie zrzeszonych w sieciach (www.fluxdata.org). Stacje pomiarowe uczestniczące w międzykontynentalnych sieciach pomiarowych w głównej mierze wykorzystują metodę kowariancji wirów do oceny strumieni pary wodnej, ciepła oraz CO₂ pomiędzy ekosystemem lądowym a atmosferą. Dane zgromadzone przez sieci pomiarowe mogą być wykorzystywane w celu porównania i uzupełnienia braków danych przez pojedyncze stacje badawcze lub też kalkulacji poszczególnych strumieni CO₂ na podstawie danych pochodnych (Falge i in., 2002). Istnieje potrzeba ciągłego monitoringu oraz analizy stężenia gazów cieplarnianych w atmosferze, ponieważ efekt globalnego ocieplenia jest głównym skutkiem nadmiernej ich emisji. CO₂ jest drugim po parze wodnej najbardziej rozpowszechnionym gazem cieplarnianym. Jego głównym antropogenicznym źródłem emisji jest produkcja energii ze spalania paliw kopalnych, jednakże warto zaznaczyć, że przemysł, transport, wylesianie, rolnictwo, zmiany struktury użytkowania ziemi to również bardzo istotne czynniki, które mają dodatni wpływ na saldo bilansu CO₂ w atmosferze. Nasza cywilizacja stała się wysoce uzależniona od spalania węgla, ropy i gazu ziemnego jako podstawowych źródeł energii (Włodarczyk

Autor do kontaktu:

Andrzej Górnik
e-mail: agornik@iung.pulawy.pl
tel. +48 81 4786 822

Praca wpłynęła do redakcji 22 października 2014 r.

i in., 2007). Ważne jest, aby konsekwentnie podejmować działania ograniczające emisję, stosując się do zasad zrównoważonego rozwoju, lub przynajmniej nie zwiększać emisji do atmosfery (www.planetaziemia.pan.pl; Stańczyk, Bieniecki, 2007). Warto zwrócić uwagę na dużą różnicę w emisyjności podczas spalania węgla kamiennego i gazu ziemnego. W tabeli 1 zostały zaprezentowane wskaźniki emisji CO₂ w zależności od poszczególnych rodzajów paliwa. Przy wyprodukowaniu jednej jednostki energii z węgla kamiennego powstaje o 70% więcej CO₂ niż przy wykorzystaniu gazu ziemnego (www.kobize.pl).

Przy doborze rodzaju paliwa główną barierą, która w wielu przypadkach staje się nie do pokonania, są względy finansowo-ekonomiczne. Korzystanie z energii paliw gazowych wiąże się z wyższymi kosztami zakupu w porównaniu do paliw stałych i z uwagi na ten fakt węgiel wciąż pozostaje paliwem dominującym oraz wysoce konkurencyjnym (Pająk, Bujanowski, 2013). Węgiel, który znajduje się na Ziemi jest częścią zamkniętego cyklu zachodzącego w atmosferze, litosferze, hydrosferze i biosferze. Rośliny występujące na naszej planecie pobierają dwutlenek węgla z atmosfery podczas procesu fotosyntezy, a węgiel w nim zawarty wykorzystują jako surowiec budulcowy swoich tkanek. Następnie w chwili obumierania i rozkładu uwalniają węgiel z powrotem do atmosfery pod postacią dwutlenku węgla (www.ec.europa.eu). Szacuje się, że roczna emisja CO₂ państw Unii Europejskiej wynosi blisko 5862 Mt. Jest to równowartość 16,2% światowej emisji dwutlenku węgla, który trafia do atmosfery, wynoszącej około 36 Gt. Emisja CO₂ w Polsce w roku 2013 wynosiła około 312 Mt, co stanowi 0,86% emisji światowej (www.globalcarbonatlas.org). Racjonalne podejście do zagadnienia bilansu dwutlenku węgla ma bardzo duże znaczenie, ponieważ pozwala na pełniejsze rozpoznanie przyczyn zachodzących zmian klimatu.

Celem podjętej pracy jest przedstawienie oraz porównanie charakterystyk dostępnych metod pomiarowych strumieni CO₂. Zostały również przedstawione możliwości bilansowania CO₂ z uwagi na coraz bardziej zauważalne zmiany w klimacie.

Tabela 1. Wskaźniki emisyjności CO₂ w 2011 r.
Table 1. CO₂ emission factors in 2011.

Rodzaj paliwa Fuel type	Wskaźnik emisyjności CO ₂ CO ₂ Emission factor [kg·GJ ⁻¹]	Wartość opałowa Calorific value [MJ·kg ⁻¹]	Cena netto Net price [zł·GJ ⁻¹]
Węgiel kamienny Hard coal	94,65	22,37	42–68
Węgiel brunatny Brown coal	109,53	8,37	
Gaz ziemny Natural gas	55,82	48,00	77–86

Źródło: opracowanie własne na podstawie Pająk, Bujanowski, 2013.
Source: own calculation based on Pająk, Bujanowski, 2013

APARATURA I METODY POMIAROWE CO₂

Pomiar strumieni CO₂ wymienianych pomiędzy powierzchnią czynną ziemi i atmosferą jest procesem niezwykle trudnym. Precyzyjne wykonanie pomiarów jest bardzo kłopotliwe ze względu na dużą zależność od czynników środowiskowych, występowanie różnic przestrzennych i czasowych czy też odmienną specyfikę pomiarową dostępną na rynku szerokiej gamy aparatury badawczej. Czynniki te mogą istotnie wpłynąć na pomiary i tym samym uniemożliwić uzyskanie zbieżnych wyników (Norman i in., 1997).

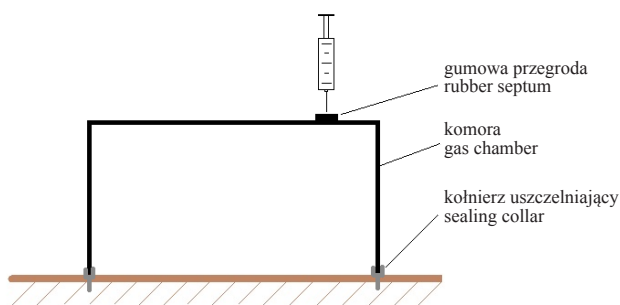
Metody komorowe

Spośród kilku dostępnych metod służących do oznaczania strumienia CO₂ wymianianego pomiędzy glebą a atmosferą metody komorowe należą do najbardziej rozpowszechnionych (Heinemeyer, McNamara, 2011). Ogólnie metody komorowe można podzielić na statyczne i dynamiczne.

System komór zamkniętych bez możliwości przepływu powietrza (ang.: closed chamber method)

System ten jest zaliczany do statycznych metod pomiarowych dwutlenku węgla. Zasada działania polega na odizolowaniu strumienia gazu od otoczenia w komorze, nakładanej na kołnierz uszczelniający zamontowany na powierzchni gleby. Wewnątrz komory znajduje się niewielki wentylator, który wprowadza powietrze w zawirowania w celu wymieszania i wyrównania stężenia gazów w całej objętości komory. Jego praca nie wpływa negatywnie na poziom strumienia gazów. Powietrze z wnętrza komory jest pobierane za pomocą strzykawek w określonych interwałach czasowych (co 10, 20, 30 minut), a następnie przy użyciu chromatografu gazowego dokonywane jest pomiar stężenia dwutlenku węgla. W tej metodzie możliwe jest również stosowanie komór bez wbudowanego wewnątrz wentylatora. Ponadto należy podkreślić, iż przed pobraniem próbek do analizy w zależności od wielkości komory wykonuje się kilkunastokrotne zasysanie i ponowne wypompowywanie powietrza za pomocą strzykawki w celu ujednolicenia stężenia gazów. Dla komory o pojemności 8 litrów zaleca się kilkunastokrotne zassanie i wtłoczenie powietrza 60 ml strzykawką (Norman i in., 1997) (ryc. 1).

W ramach tej metody istnieje również możliwość zmodyfikowania komory. Wówczas pomiar stężenia CO₂ wykonywany jest na zasadzie podczzerwieni nierozproszanej NDIR za pomocą miernika dyfuzyjnego umieszczonego w komorze. W warunkach dopływu energii świetlnej pomiar wykonywany jest przez około 2–3 minuty, a w przypadku zaciemnienia komory przez około 4–5 minut. Na podstawie sumy zmian stężenia dwutlenku węgla w komorze z dostępem światła oraz zaciemnionej można obliczyć wartość fotosyntezy brutto, która określa rzeczywistą wielkość pobierania CO₂ przez rośliny (Alm i in., 1997).



Ryc. 1. Komora zamknięta bez przepływu powietrza
Fig. 1. Closed chamber without air flow.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Bekku i in., 1997
Source: own study based on Bekku et al., 1997

System komór zamkniętych z możliwością przepływu powietrza (ang.: *dynamic closed chamber method*)

System komór zamkniętych z przepływem powietrza jest dynamiczną metodą pomiarową. Używane w niej zamknięte komory połączone są z układem sterującym przepływem powietrza. Podstawową ideą jest zablokowanie porcji powietrza na czas wykonywania pomiaru. Powietrze wewnątrz komory zostaje przepompowane przez układ, w którym znajduje się analizator gazowy. Wartość przepływu dwutlenku węgla pomiędzy powierzchnią gleby a atmosferą obliczana jest na podstawie zwiększenia bądź też zmniejszenia stężenia gazu w funkcji czasu (Chojnicki i in., 2008). Następnie powietrze będące w układzie analizatora gazowego IRGA (ang.: *Infra-red Gas Analyzer*) jest kierowane z powrotem do komory w wyniku cyrkulacji (Rochette i in., 1991, 1992; Norman i in., 1997).

System komór otwartych z możliwością przepływu powietrza (ang.: *open-flow method*)

System pomiarowy składa się z cylindrycznej komory roboczej, wykonanej z polichlorku winylu, przez którą przy podciśnieniu przepływa powietrze pobierane z zewnątrz. Ilość przepływającego gazu określa się za pomocą pomiaru różnicy stężenia na wlocie oraz wylocie z komory, uwzględniając przy tym wielkość przepływu powietrza (Chojnicki i in., 2008; Witkamp i in., 1969; Garret, Cox, 1973). Stosowanie systemów komorowych, wymagających nieustannej ingerencji człowieka do przeprowadzenia pomiaru strumieni CO₂ staje się coraz mniej popularne, jednak nadal stanowi cenną technikę przy prowadzeniu doświadczeń w mniejszej skali.

Zautomatyzowany system pomiaru wymiany gazowej CO₂ z gleby typu ACE (ang.: *Automatic CO₂ Exchange System*)

Jest to stacjonarne narzędzie pomiarowe służące do pomiaru wymiany CO₂ w glebie. Stacja zbudowana jest

z ruchomego ramienia, na którym umieszczona jest komora robocza, oraz konsoli kontrolnej wyposażonej w zespół dostarczający powietrze. Stacja ACE ma zasilanie akumulatorowe i jest połączona z zespołem kontrolnym MCU (ang.: *Master Control Unit*), który gromadzi dane oraz steruje trybem pracy. Zespół kontrolny MCU jest w stanie współpracować jednocześnie z 30 stacjami ACE, tworząc jedną zintegrowaną sieć. System może dokonywać pomiaru CO₂ w trybie zamkniętym oraz w trybie otwartym.

Pomiar w trybie zamkniętym zaczyna się od określenia koncentracji CO₂ w komorze podczas procesu autozerowania, a następnie jej szczelnego zamknięcia. Komora ma pojemność 2,6 litra. W zależności od aktywności gleby w komorze następuje wzrost lub spadek koncentracji CO₂. Istnieje możliwość, że minimalna wartość stężenia CO₂ nie zostanie osiągnięta i wówczas pomiar kończony jest po upływie zaprogramowanego wcześniej czasu. Praca systemu ACE w trybie otwartym polega na ciągłym przepompowywaniu stałej ilości powietrza z otoczenia przez szczelnie zamkniętą komorę pomiarową o pojemności 1 litra. W momencie stabilizacji warunków wewnątrz komory oraz po przeprowadzeniu procesu autozerowania system określa wartość końcową stężenia CO₂ (Pawlak, 2014; ADC BioScientific – manual 2008). Dostatecznym problemem technicznym, który jest zauważany przy stosowaniu analizatorów strumieni CO₂ z otwartą i zamkniętą ścieżką pomiarową, są rozbieżności w otrzymanych wynikach pomiarów. Na podstawie badań w warunkach temperatury powietrza bliskiej 0°C, kiedy aktywność respiracyjna ekosystemu oraz fotosynteza są praktycznie zahamowane, stwierdzono, że analizator gazu z otwartą ścieżką ma wyższe wskazania pomiarowe od analizatora z zamkniętą ścieżką. Rozbieżność pomiarowa w tym przypadku wynika z nadmiernie ogrzewanego powietrza, które jest przepompowywane przez układ roboczy analizatora. W okresie letnim dokładność pomiarowa analizatorów z otwartą i zamkniętą ścieżką pomiarową są zbliżone ze względu na nieznaczne różnice temperatur pomiędzy analizatorem i powietrzem (Olejnik i in., 2011).

Przeñośny system pomiaru wymiany gazowej CO₂ z gleby SRS-1000

System SRS-1000 jest półautomatycznym przyrządem do polowych pomiarów zmian stężenia CO₂ z powierzchni gleby. Zasada działania tego systemu jest podobna do metod komór zamkniętych z przepływem powietrza. Wewnątrz komory roboczej o pojemności 1 litra zainstalowany jest miniatury analizator gazu w podczerwieni IRGA, który reaguje na zmiany stężenia CO₂ podczas wymiany gazowej przy powierzchni gleby. Powietrze wprawiane jest w ruch turbulentny za pomocą wentylatora i poddawane analizie. System posiada również możliwość pomiaru temperatury gleby. Zapisy mierzonych parametrów uzyskuje się manualnie w określonych odstępach czasu. Zaletą tego systemu



Ryc. 2. System SRS-1000 do pomiaru strumienia CO₂ pomiędzy glebą a atmosferą
Fig. 2. System SRS-1000 for measuring CO₂ from the soil.

jest jego duża uniwersalność, ponieważ ma możliwość wymiany komory do badania wymiany gazowej gleby na inne do badań fizjologicznych nadziemnych części roślin (ADC BioScientific – manual 2003, 2010).

Na rycinie 2 został zaprezentowany przenośny system SRS-1000 do pomiaru wymiany gazowej CO₂ z gleby. Szczelnie osadzony w glebie metalowy kołnierz jest ciasno połączony z komorą roboczą, w której zachodzi proces oddychania. System pobiera powietrze referencyjne do konsoli LCi z wysokości 3 metrów nad powierzchnią ziemi, a następnie włącza je do swojego układu.

Metoda kowariancji wirów (ang.: *eddy covariance*)

Metoda kowariancji wirów jest bardzo dokładną, zaawansowaną metodą pomiarową, która znalazła zastosowanie szczególnie w badaniach prowadzonych przez długi okres czasu. Została ona opracowana do pomiaru strumienia dwutlenku węgla pomiędzy ekosystemami lądowymi a atmosferą w warunkach turbulentnego przepływu strumienia gazów. Metoda kowariancji wirów jest szczególnie rozpowszechniona przy pomiarach przepływu strumienia CO₂ między ekosystemami leśnymi a atmosferą. W skład aparatury pomiarowej wchodzi analizator gazowy do pomiaru zmienności stężenia CO₂ w powietrzu, anemometr soniczny mierzący pionową prędkość wiatru oraz cyfrowy czytnik do rejestracji danych. Za pomocą tej metody

można określić różnice w dobowej, miesięcznej lub kilku-miesięcznej zmienności wymiany dwutlenku węgla. Wartość turbulentnego strumienia dwutlenku węgla określana jest na podstawie parametrów zamieszczonych we wzorze (Pawlak W., 2014):

$$FCO_2 = \overline{w' \cdot pCO_2'}$$

gdzie: FCO₂ – strumień dwutlenku węgla,
w' – fluktuacje przypadkowych wahań pionowej prędkości wiatru,
pCO₂' – stężenie dwutlenku węgla w powietrzu.

Zasada działania systemu kowariancji wirów polega na wyliczeniu wielkości strumienia netto pomiędzy powierzchnią czynną a atmosferą. Wynik pomiaru jest zbilansowaną wartością strumienia mierzonych przy powierzchni gleby oraz na otwartej przestrzeni powyżej analizowanego ekosystemu. Jeżeli wielkość strumienia ma wartość dodatnią, wówczas można stwierdzić, że badany obiekt jest emitentem dwutlenku węgla, natomiast w przypadku zaistnienia ujemnej wielkości strumienia określany jest jako pochłaniacz (Pawlak, 2014; Turbiak, 2012). Pomiary strumienia CO₂ przy użyciu techniki kowariancji wirów są często wykonywane na specjalnie skonstruowanych wieżach pomiarowych, wyniesionych powyżej badanego ekosystemu, otrzymując wartość NEE (ang.: *NEE – Net Ecosystem Exchange*). Wartość NEE określa się jako strumień CO₂ netto wymieniany pomiędzy ekosystemem lądowym a atmosferą. W przypadku modelowania wartości NEE można rozbić na strumienie GPP oraz R_{eco}

$$NEE = GPP - R_{eco}$$

gdzie: GPP – produkcja pierwotna brutto,
R_{eco} – oddychanie ekosystemu.

Zatem modelowanie strumienia CO₂ wymienianego przez dany ekosystem można zdefiniować jako całkowitą ilość węgla, jaka zostaje przyswojona w trakcie wegetacji podczas procesu fotosyntezy GPP (ang.: *GPP – Gross Primary Production*), która jest pomniejszona o strumień oddychania ekosystemu (ang.: *R_{eco} – Respiration ecosystem*). Strumień R_{eco} jest kształtowany na podstawie procesu wydzielania CO₂ w trakcie oddychania organizmów heterotroficznych oraz autotroficznych.

$$R_{eco} = R_H + R_A$$

gdzie: R_H – oddychanie organizmów heterotroficznych,
R_A – oddychanie organizmów autotroficznych.

Dosyć poważnym mankamentem spotykanym w praktycznym zastosowaniu metody kowariancji wirów, który w znacznym stopniu uniemożliwia precyzyjne oszacowanie strumienia CO₂, jest występowanie braków danych lub ich dużej rozbieżności. Braki danych mogą być skutkiem

przerw w wykonywaniu pomiarów, jednakże mogą wywodzić się również z przyczyn niezależnych, takich jak niewielka turbulencja mas powietrza lub jej brak, czy też niepożądany kierunek wiatru. Dane niespójne wywodzą się często ze zróżnicowanych procedur obliczeniowych, do których zalicza się dobór długości przedziału uśredniania danych czy też ocenę stacjonarności szeregu. W praktyce przyjęło się uśredniać przedziały danych w zakresach od 15 do 60 minut. Warto również zwrócić uwagę na dane o nierzeczywistych wartościach, które należy usuwać, gdyż mogą one negatywnie wpływać na miarodajność wyniku pomiaru (Pawlak i in., 2012). Doskonałym uzupełnieniem pomiarów prowadzonych metodą kowariancji wirów jest zastosowanie metod komorowych w trakcie prowadzenia obserwacji. Można wówczas obserwować zmiany koncentracji CO₂ w zamkniętej porcji powietrza nad powierzchnią czynną (Sakowska i in., 2012).

METODY BILANSOWANIA WYMIANY CO₂

Proces oddychania glebowego z wykorzystaniem dostępnych metod pomiarowych jest trudny do dokładnego zbilansowania. Z uwagi na ten fakt zostało opracowanych wiele modeli matematycznych, których ideą jest oszacowanie emisji dwutlenku węgla z uwzględnieniem parametrów środowiskowych. Zróżnicowany czas pomiarów lub duża zmienność powierzchni w każdej z dostępnych metod badawczych powodują trudności w porównaniu i analizie oddychania glebowego w stosunku do przestrzennych i czasowych różnic środowiskowych (Norman i in., 1997; Zhou i in., 2008). Ogólnie bilans węgla w ekosystemie można określić jako sumę całkowitej wymiany ekosystemu netto mierzonej w warunkach dopływu energii słonecznej NEE oraz ogólnej aktywności respiracyjnej ekosystemu w obecności roślin w porze nocnej (ang.: *TER – Total Ecosystem Respiration*). Ogólna aktywność respiracyjna TER oznaczana jest na podstawie sumy emisji i absorpcji CO₂ w ekosystemie, uwzględniającej glebę i nadziemne części roślin (Turbiak, Miatkowski, 2011).

$$B = NEE + TER$$

gdzie: B – bilans węgla w ekosystemie,
NEE – przyrosty i straty węgla w ekosystemie,
TER – aktywność respiracyjna w ekosystemie w warunkach braku światła.

Dokładne określenie strumienia emisji lub absorpcji dwutlenku węgla w danym ekosystemie wymaga prowadzenia ciągłych obserwacji. Alternatywą dla tego typu badań może być również monitoring strumienia netto dwutlenku węgla, który jest sumą wynikającą z emisji oraz absorpcji (Olejnik i in., 2011). Emisję dwutlenku węgla z powierzchni gleby do atmosfery można określić jako kompilację dwóch głównych procesów:

- Produkcja CO₂ – zachodząca w wyniku oddychania przez systemy korzeniowe roślin i bakterie glebowe
- Przenikanie glebowe – w wyniku którego dwutlenek węgla przechodzi z gleby do atmosfery, a cząsteczki tlenu przenikają w kierunku przeciwnym.

Proces emisji CO₂ (produkcji oraz transportowania) w glebie jest silnie powiązany z wieloma czynnikami środowiskowymi, które mają istotny wpływ na jego skalę. Do najważniejszych czynników środowiskowych zaliczyć można wilgotność, temperaturę gleby, porowatość oraz zawartość materii organicznej (Fang, Boncrieff, 1999). Wyższe temperatury powietrza mogą powodować intensyfikację oddychania glebowego. W konsekwencji tego węgiel, który zostaje zmagazynowany w glebie, powoduje wzrost emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Jednak należy pamiętać, że oddychanie glebowe w funkcji temperatury nie zawsze przynosi zamierzony wzrost ze względu na działanie ograniczające pozostałych czynników środowiskowych. W związku z tym opracowany został model Century i model Rothamsted, które analizują proces rozkładu glebowej materii organicznej w funkcji temperatury (Chen i in., 2010). Bardzo często w modelach matematycznych uwzględnia się współczynnik temperaturowy Q₁₀, określający szybkość reakcji enzymatycznych spowodowanych wzrostem temperatury o 10⁰C. Wykorzystywany jest on do oszacowania wzrostu oddychania glebowego, czyli ilości wyemitowanego CO₂ w zależności od zmiany temperatury. Funkcja służąca do oceny respiracji, pozwalająca bezpośrednio określić parametr Q₁₀ jest wyrażana jako (Wythers i in., 2013):

$$R_d - R_{d_{ref}} Q_{10}^{[(T - T_{ref})/10]}$$

gdzie: R_d – respiracja CO₂ w zaciemnieniu,
R_{d_{ref}} – właściwa respiracja CO₂, jaka zachodzi w danej temperaturze (°C) odniesienia,
Q₁₀ – wartość respiracji w danej temperaturze do respiracji w temperaturze 10⁰C niższej,
T – temperatura rzeczywista,
T_{ref} – temperatura odniesienia.

Spośród wielu metod modelujących strumienie CO₂ istnieje również sposób bilansu tego procesu za pomocą opracowanych i dostępnych powszechnie kalkulatorów emisji gazów cieplarnianych. Jednym z nich jest kalkulator Biograce, który został opracowany przez międzynarodowe konsorcjum i umożliwia eksperckie obliczenie emisji z rolnictwa oraz ograniczeń występujących podczas emisji w pełnym cyklu życia biopaliwa (Faber i in., 2011). Biograce jest całkowicie zgodny z metodologią Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 roku. Według Dyrektywy 2009/28/WE do obliczania całkowitej emisji gazów cieplarnianych (E), która powstała w wyniku produkcji i stosowania paliw

transportowych, biopaliw i biopłynów, został opracowany następujący sposób bilansowania wyrażony w gramach przeliczeniowych CO₂ przypadających na jednostkę energii uzyskanej z paliwa (Dyrektywa 2009/28/WE):

$$E = e_{ec} + e_1 + e_p + e_{td} + e_u - e_{sca} - e_{ccs} - e_{ccr} - e_{ee} \text{ [gCO}_{2eq} \cdot \text{MJ}^{-1}]$$

gdzie: E – całkowita emisja spowodowana produkcją i stosowaniem paliwa,

e_{ec} – emisja podczas wydobycia lub uprawy surowców,

e_1 – emisja w ujęciu rocznym spowodowana zmianami ilości pierwiastka węgla w związku ze zmianą sposobu użytkowania gruntów związaną z produkcją paliwa,

e_p – emisja spowodowana procesami technologicznymi,

e_{td} – emisja spowodowana transportem i dystrybucją,

e_u – emisja spowodowana stosowaniem paliwa,

e_{sca} – ograniczenie emisji spowodowane akumulacją pierwiastka węgla w glebie dzięki lepszej gospodarce rolnej,

e_{ccs} – ograniczenie emisji spowodowane wychwytywaniem dwutlenku węgla i jego sekwestracji w głębokich strukturach geologicznych,

e_{ccr} – ograniczenie emisji spowodowane wychwytywaniem dwutlenku węgla i jego zastępowaniem,

e_{ee} – ograniczenie emisji dzięki zwiększonej produkcji energii elektrycznej w wyniku kogeneracji.

Ponadto zgodnie z metodologią zawartą w Dyrektywie 2009/28/WE oszacowanie emisji odbywa się przy jednoznacznym uwzględnieniu rodzaju gleb, wielkości plonu oraz typu klimatu.

Tabela 2: Porównanie metod do pomiaru strumieni CO₂

Table 2: Comparison CO₂ emission methods.

Metoda pomiarowa Measuring method	Wady Disadvantages	Zalety Advantages
Metoda komór zamkniętych bez przepływu powietrza Closed chamber method	<ul style="list-style-type: none"> występowanie różnic pomiarowych wynikających z braku dostatecznych informacji na temat optymalnej budowy komory oraz wrażliwości na różnice temperatur, ciśnienia oraz wilgotności w środowisku wewnątrz komory oraz poza nią; 	<ul style="list-style-type: none"> pomiary są dobrym uzupełnieniem metody kowariancji wirów; good complement eddy covariance method stosunkowo niski koszt wykonania komory; low cost of production chamber możliwość analizy poszczególnych składników ekosystemu; possibilities of analyzing individual components of ecosystem
Metoda komór zamkniętych z przepływem powietrza Dynamic closed chamber method	<ul style="list-style-type: none"> w przypadku braku analizatora gazowego wewnątrz komory, konieczność zastosowania kosztownej aparatury laboratoryjnej (chromatograf gazowy); 	
Metoda komór otwartych z przepływem powietrza Open-flow method	<ul style="list-style-type: none"> if there is no gas analyzer inside the chamber an expensive gas chromatograph is required 	
Automatyczne systemy pomiarowe typu ACE; SRS-1000 Automatic CO ₂ Exchange System; SRS-1000 system	<ul style="list-style-type: none"> wysokie koszty aparatury; high systems cost zasilanie akumulatorowe o określonej żywotności; battery power at a certain vitality 	<ul style="list-style-type: none"> przenośne systemy polowe; portable field systems możliwość automatycznych pomiarów w określonych interwałach czasowych (ACE); possibilities of time intervals in automatic measurements
Metoda kowariancji wirów Eddy covariance method	<ul style="list-style-type: none"> oszacowanie wartości strumienia CO₂ jest ograniczone ze względu na brak rozdzielania źródeł emisji i pochłaniania w danym ekosystemie. Analizowany ekosystem przyjmuje się jako jedną całość; limited CO₂ flux estimating due to the lack of separation emission sources and sinks in ecosystem. Analyzing ecosystem is taken as a single entity. zalecana jest płaska forma terenu o jednorodnej strukturze; flat form of the area with a homogeneous structure recommended 	<ul style="list-style-type: none"> precyzyjny pomiar strumienia CO₂ netto na terenach zurbanizowanych; precision net CO₂ flux measurements in urban area możliwość określania dobowej, miesięcznej lub kilkumiesięcznej zmienności strumienia CO₂; ability to assess daily, monthly or few monthly CO₂ flux variability

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Sakowska i in., 2012; Rochette, Hutchinson, 2005
Source: based on Sakowska et al., 2012; Rochette, Hutchinson, 2005

PODSUMOWANIE

Obecnie istnieje wiele dostępnych metod służących do pomiaru strumieni CO₂. Każda z nich posiada inną specyfikę pomiarową i charakteryzuje się szeregiem zalet oraz wad. W tabeli 2 przedstawiono charakterystykę metod pomiarowych do oceny strumieni CO₂, które zostały zamieszczone w publikacji.

Aktualnie pomiary prowadzi się najczęściej przy użyciu zautomatyzowanych stacji komorowych czy też przy użyciu metod kowariancji wirów. Wykorzystanie manualnych systemów komorowych do pomiaru strumieni CO₂ jest rozwiązaniem czasochłonnym, wymagającym dużego zaangażowania ze strony operatora w porównaniu do bardziej niezawodnych, zautomatyzowanych systemów komorowych czy też metody kowariancji wirów. Pomiary strumieni CO₂ metodą kowariancji wirów często wymagają korekcji danych bądź ich uzupełnienia. W przypadku braku zjawiska fluktuacji powietrza, na których bazuje metoda kowariancji wirów, istnieje możliwość prowadzenia jednoczesnych obserwacji strumieni CO₂ przy zastosowaniu zautomatyzowanych systemów komorowych w celu uzupełnienia brakujących danych. Oznaczanie ilościowe i modelowanie procesu oddychania glebowego w różnych warunkach środowiskowych jest istotne ze względu na obserwację procesów zachodzących na skutek ciągłej zmienności klimatu. Przyjęcie hipotezy, że ekosystem ziemski stanowi jednolity system, prowadzić będzie w przyszłości do prognozowania oddychania glebowego za pomocą modelowania. Czynniki środowiskowe, takie jak wilgotność i temperatura gleby, zawartość tlenu w powietrzu glebowym czy zawartość biomasy należy zaliczyć do bezpośrednich wskaźników, które mają wpływ na oddychanie glebowe oraz wielkość strumieni dwutlenku węgla.

PIŚMIENNICTWO

- ADC BioScientific Ltd. 2003. Soil respiration hood V2, For use with Integrated Analyzers type LCi and LCpro – Instruction manual, July 2004.
- ADC BioScientific Ltd. 2010. Charles House, Great Amwell, Herts, SG12 9TA, Automated Soil CO₂ Exchange Station - Instruction manual.
- ADC BioScientific Ltd. Charles House, Great Amwell, Herts, SG12 9TA, LCi Portable Photosynthesis System – Instruction manual, January 2008.
- Alm J., Talanov A., Saarnio S., Silvola J., Ikkonen E., Aaltonen H., Nykänen H., Martikainen P.J., 1997.** Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen. Finland, *Oecologia*, 110: 423-431.
- Bekku Y., Koizumi H., Oikawa T., Iwaki H., 1997.** Examination of four methods for measuring soil respiration. *Applied Soil Ecology*, 5: 247-254.
- Chen X., Post W.M., Norby R.J., Classen, A.T., 2010.** Modeling soil respiration and variations in source components using a multi-factor global climate change experiment. *Climatic Change* DOI 10.1007/s10584-010-9942-2.
- Chojnicki B.H., Urbaniak M., Leśny J., Juszcak R., Olejnik J., 2008.** Nowoczesne metody pomiaru masy i energii pomiędzy podłożem a atmosferą. *Przegląd Naukowy Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 39: 91-97.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
- Faber A., Jarosz Z., Borek R., Borzęcka-Walker M., Syp A., Pudelko R., 2011.** Poziom emisji gazów cieplarnianych (CO₂, N₂O i CH₄) dla upraw pszenicy, pszenżyta, kukurydzy i żyta przeznaczonych do produkcji bioetanolu oraz upraw rzepaku przeznaczonych do produkcji biodiesla. Ekspertyza wykonana na zlecenie Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi, www.bip.minrol.gov.pl/Opracowania.-ekspertyzy.-publikacje/EKSPERTYZA-Poziom-emisji-gazow-cieplarnianych-CO2, (30.12.2014).
- Falge E., Baldocchi D., Tenhunen J., Aubinet M., Bakwin P., Berbigier P., Bernhofer C., Burba G., Clement R., Davis K.J. 2002.** Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113: 53-74.
- Fang C., Boncrieff J.B., 1999.** A model for soil CO₂ production and transport 1: Model development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 225-236.
- Garret H.E., Cox G.S., 1973.** Carbon dioxide evolution from the floor of an oak-hickory forest. *Soil Science Society of America Journal*, 37(4): 641-644.
- Heinemeyer A., McNamara N.P., 2011.** Comparing the closed static versus the closed dynamic chamber flux methodology: Implications for soil respiration studies. *Plant and Soil*, 346: 145-151.
- Norman M.J., Kucharik C.J., Gower S.T., Baldocchi D.D., Crill P.M., Rayment M., Savage K., Striegl R.G., 1997.** A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 28: 771-777.
- Olejnik J. Urbaniak M., Juszcak R., Chojnicki B., Strzełiński P., Moczko J., Roszkiewicz J., Danielewska A., Baran M., 2011.** Oszacowanie strumieni netto dwutlenku węgla wymienianymi pomiędzy ekosystemem leśnym a atmosferą. Raport z projektu badawczego zleconego przez DGLP za okres styczeń 2008 – grudzień 2011, www.start.lasy.gov.pl/c/document_library/get_file?p_l_id=2978425&folderId=17071346&name=DLFE-103993.pdf, (30.12.2014).
- Pająk L., Bujanowski W., 2013.** Porównanie cen energii cieplnej pochodzącej z instalacji geotermalnych z cenami konwencjonalnych źródeł energii na podstawie taryf rozliczeniowych w 2013 roku. *Technika Poszukiwań Geologicznych, Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, 1/2013: 35-43.
- Pawlak W., Fortuniak K., Siedlecki M., Kłysik K., 2012.** Wybrane problemy metodyczne pomiaru turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla na terenie podmokłym – Biebrzański Park Narodowy 2010. *Przegląd Geofizyczny*, zeszyt 2, rocznik LVII: 101-111.
- Pawlak W., 2014.** Wymiana turbulencyjna dwutlenku węgla między atmosferą a terenem zurbanizowanym, rolniczym i podmokłym – różnice w rocznej i dobowej zmienności. *Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*, 64: 131-139.
- Rochette P., Desjardins R.L., Pattey E., 1991.** Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields. *Canadian Journal of Soil Science*, 71(2): 189-196.

- Rochette P., Gregorich E.G., Desjardins R.L., 1992.** Comparison of static and dynamic closed chambers for measurement of soil respiration under field conditions. *Canadian Journal of Soil Science* 72(4): 605-609.
- Rochette, P., Hutchinson G.L., 2005.** Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. Publications from USDA-ARS / UNL Faculty. Paper 1379.
- Sakowska K., Juszczak R., Uździcka B., Olejnik J., 2012.** Zmienność dobową strumieni CO₂ wymienianych między atmosferą a różnymi uprawami rolniczymi. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, IV-VI: 221-224.
- Stańczyk K., Bieniecki M., 2007.** Możliwości redukcji CO₂ i jej wpływ na efektywność i koszty wytwarzania energii z węgla. *Górnictwo i Geoinżynieria zeszyt 2*: 575-586.
- Turbiak J., 2012.** Bilans węgla w ekosystemie łąkowym na średnio zmurzałej glebie torfowo-murszowej. *Woda – Środowisko – Obszary Wiejskie*, X-XII: 281-294.
- Turbiak J., Miatkowski Z., 2011.** Wpływ warunków wodnych i intensywności użytkowania na bilans węgla w glebach pobagiennych, *Nauka Przyroda Technologie*, tom 5, zeszyt 5: 1-9.
- Witkamp M., Frank M.L., 1969.** Evolution of CO₂ from litter, humus and subsoil of a pine stand. *Pedobiologia* 9: 358-365,
- Włodarczyk T., Brzezińska M., Borkowska A., Kotowska U., Nosalewicz M., Szarlip P., Pazur M., 2007.** Wydzielanie dwutlenku węgla z pól uprawianych metodą tradycyjną i uproszczoną. Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie, *Acta Agrophysica*, 150: 29-41.
www.ec.europa.eu/clima/sites/campaign/pdf/gases_pl.pdf (28.10.2015)
www.fluxdata.org (14.10.2015)
www.globalcarbonatlas.org/?q=en/emissions (28.10.2015)
www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/ (7.10.2015)
www.kobize.pl/materialy/download/2013/WO_i_WE_do_stosowania_w_SHE_2014.pdf (7.10.2014)
- Dz.U. 1996 r. Nr 53 poz. 238. Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu, sporządzona w Nowym Jorku dnia 9 maja 1992 r.
www.planetaziemia.pan.pl/GRAF_aktual-2009/11_Stanowisko_KNG.pdf (7.10.2014).
- Wythers K.R., Reich P.B., Bradford J.B., 2013.** Incorporating temperature-sensitive Q₁₀ and foliar respiration acclimation algorithms modifies modeled ecosystem responses to global change. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118: 1-14.
- Zhou G. S., Jia B. R., Han G. X., Zhou L., 2008.** Toward a general evaluation model for soil respiration (GEMSR). *Science in China Series C-Life Sciences*, 51(3): 254-262.

A. Górnik

THE CO₂ BALANCE POSSIBILITIES USING MEASUREMENT EQUIPMENT

Summary

Review of carbon dioxide measuring methods and possibilities of its balance was the main point of this essay. The paper describes the following types: alkali absorption method, closed chamber method, dynamic closed chamber method, open flow method, automatic CO₂ exchange system, soil CO₂ exchange system SRS-1000 and eddy covariance method. High measurement variability among different methods prompted the discussion of how to increase the accuracy of carbon dioxide emission rates. Broad spectrum of activity and high versatility of automated flux systems gives possibilities for their use in balancing CO₂ in different ecosystems.

key words: CO₂ emission, measure methods, measurement equipment, CO₂ balance.