

6. Praktyczne aspekty zastosowania metody komorowej w pomiarach ekshalacji gazów z gleby do atmosfery

Arkadiusz Niewiadomski¹, Wojciech Tołoczko¹

Streszczenie

Pomiar respiracji glebowej jest interesującym problemem badawczym współczesnej nauki. Mnogość metod i technik pomiarowych sprawia, że w zależności od miejsca prowadzenia badań i licznych czynników wpływających na wielkość emisji gazów z gleby do atmosfery, badacze napotykają na szereg trudności. W niniejszej pracy zestawiono najpopularniejsze sposoby prowadzenia pomiarów z wykorzystaniem metod komorowych. Zaprezentowano założenia metodyczne pomiaru wielkości wydzielania CO₂ z gleby przy użyciu metody chemicznej oraz technik NDIR. Dokonano także krótkiej charakterystyki komór pomiarowych z uwzględnieniem ich rodzajów. Autorzy, bazując na znacznej liczbie pozycji literaturowych, przedstawili główne techniczne i środowiskowe czynniki wpływające na poprawność prowadzonych badań wraz z propozycją rozwiązań najczęściej spotykanych problemów technicznych.

Słowa kluczowe: respiracja gleb, metodyka pomiarów, techniki komorowe, wilgotność gleby, użytkowanie gruntów

6.1. Wprowadzenie

Wymiana węgla między wierzchnią warstwą gleby a atmosferą jest jednym z kluczowych elementów globalnego bilansu węgla w ekosystemach (Raich i Schlesinger, 1992; Kasimir-Klemedtsson i in., 1997; Martin in., 2004; Kutzbach i in., 2007). Mimo wieloletnich badań w tym zakresie metodyka pomiarów ciągle jest usprawniana. Wynika to przede wszystkim ze złożoności procesu wymiany gazowej zachodzącej na styku dwóch różnych ośrodków, jakimi są gleba i atmosfera. Precyzyjny pomiar wielkości tego procesu uznawany jest za jedno z najtrudniejszych współczesnych wyzwań nauki (Rayment i Jarvis, 1997). W znacznej mierze widać to po liczbie publikacji dotyczących rozmiarów ekshalacji lub respiracji glebowej, zwłaszcza w odniesieniu do dwutlenku węgla, czyli tlenku węgla IV (Koizumi i in., 1991; Nakadai i in., 1993; Jensen i in., 1996; Fang i Moncrieff, 1998a; King i Harrison, 2002; Migné i in., 2002; Rastogi i in., 2002; Rochette i Hutchinson, 2005; Hao i Jiang, 2014), a coraz częściej także innych gazów jak: metan – CH₄, podtlenek azotu – N₂O czy niektóre związki siarki (Nykänen i in., 1995; Kasimir-Klemedtsson i in., 1997; Smith i in., 2003; Maljanen i in., 2004; Li, 2007; Maljanen i in., 2007; Masunaga i in., 2007). W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat rozwinęło się szereg metod służących pomiarowi wydzielania gazów z gleby (Rayment i Jarvis, 1997; Rochette i in., 1997). Jednymi

¹ Pracownia Gleboznawstwa i Geoekologii, Katedra Geografii Fizycznej, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki, 90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88, e-mail: glebozn@uni.lodz.pl

z najpopularniejszych i przy okazji najdokładniejszych technik są tzw. metody komorowe (Lapitan i in., 1999; Kusa i in., 2008). Każda metoda pomiarowa mimo posiadanych zalet obarczona jest jednak szeregiem wad i ograniczeń, których uwzględnienie w rozważaniach naukowych ma szczególne znaczenie dla wiarygodności uzyskanych rezultatów. Tak też jest w przypadku metod komorowych, których wiarygodność, precyzja i ograniczenia stały się przedmiotem licznych publikacji naukowych (Fang i Moncrieff, 1996; Rayment, 2000; Welles i in., 2001; Davidson i in., 2002; Schneider i in., 2009). Obecnie największym problemem jest możliwość prowadzenia tzw. pomiarów ciągłych, czyli obrazujących zmienność stężenia, np. CO₂ w długim okresie czasu (liczonym w miesiącach, a nawet latach). Metody mikrometeorologiczne, takie jak metoda kowariancji wirów, wydają się w tym względzie o wiele wygodniejsze do zastosowania, choć także nie są pozbawione ograniczeń (Baldocchi i in., 1986; Pawlak i in., 2012). Duża liczba badań z zakresu pomiarów strumieni gazów cieplarnianych i chęć wyeliminowania błędów były wielokrotnie przedmiotem badań porównawczych w zakresie stosowanych metod i technik pomiarowych (Jensen i in., 1996; Bekku i in., 1997; Norman i in., 1997; Rochette i in., 1997; Lapitan i in., 1999; Janssens i in., 2000; King i Harrison 2002; Yim i in., 2002; Savage, Davidson, 2003; Freijer i Bouten 2004; Pumpanen i in., 2004; Rochette i Hutchinson, 2005; Kusa i in., 2008; Pereira de Mello-Iwo i Salcedo, 2012).

Celem niniejszej pracy było zaprezentowanie empirycznego podejścia do metod komorowych wraz z charakterystyką prowadzenia pomiarów terenowych i kalkulacją wyników. Aspekty te opisano z uwzględnieniem najczęściej spotykanych, praktycznych problemów związanych z wpływem czynników stymulujących bądź ograniczających wymianę gazową pomiędzy glebą i atmosferą oraz wpływających na prawidłowość pomiarów.

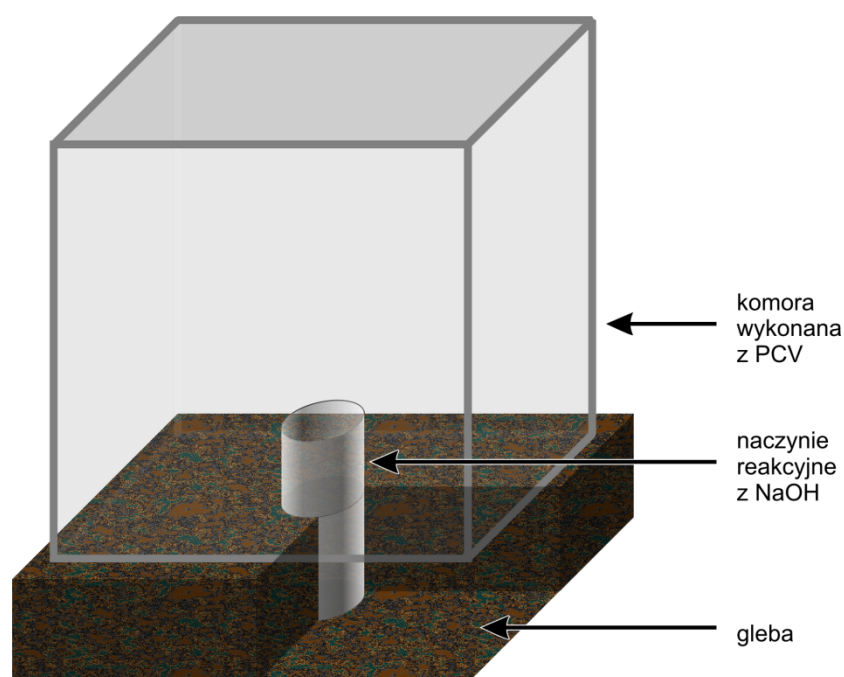
6.2. Przegląd technik i sposobów prowadzenia pomiarów

Komorowe metody pomiaru strumieni wymiany gazowej pomiędzy glebą i atmosferą bazują na kilku podstawowych założeniach. Pierwszym, jest stwierdzenie zależności zachodzących pomiędzy obecnymi w glebie mikroorganizmami odpowiedzialnymi za rozkład obumarłej materii organicznej, często określane mianem respiracji glebowej mającej kluczowe znaczenie w obiegu węgla w środowisku przyrodniczym ekosystemów lądowych (Rochette i in., 1991; Rochette i in., 1997; Tüfekçioğlu i Küçük, 2004; Rochette i Hutchinson, 2005; Keith i Wong, 2006; Tang i in., 2006; Sakata i in., 2007; Hao i Jiang, 2014). Składają się na nie:

- organizmy autotroficzne (głównie rośliny) będące konsumentami nieorganicznych produktów rozkładu, które w biochemicznym procesie fotosyntezy przekształcają je w związki organiczne przy udziale światła,
- organizmy heterotroficzne (większość bakterii i grzybów) odpowiedzialnych za butwienie (oksydację) i towarzyszące temu procesowi wydzielanie związków nieorganicznych, takich jak CO₂, NO₂, SO₂ oraz procesy gnilne, którym towarzyszy wydzielanie związków organicznych, głównie CH₄, ale także NH₃ i H₂S.

Zainteresowanie zagadnieniem wymiany gazowej między wierzchnią warstwą gleby i atmosferą było przedmiotem badań już w latach 30. dwudziestego wieku. Badania nad

wielkością wydzielania CO_2 z zastosowaniem samodzielnie skonstruowanego aparatu prowadził m.in. Lundegårdh (1927). Bardzo popularną metodą było wykorzystanie do absorpcji uwalnianego z gleby CO_2 mianowanych roztworów zasadowych (np. KOH lub NaOH) i stwierdzenie ilościowego ich ubytku w reakcji z tymże gazem (Edwards, 1982; Tołoczko i Niewiadomski, 2010) (rys. 1). Metoda ta była wykorzystywana już w pierwszej połowie XX wieku (Lundegårdh, 1927). Jest to przykład pierwszej metody komorowej

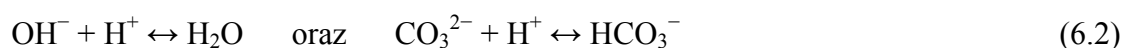


Rys. 1. Schemat pomiaru wydzielania CO_2 z gleby za pomocą chemicznej metody komorowej. Źródło: Tołoczko i Niewiadomski, 2010, s. 153 (zmienione).

bazującej na reakcji chemicznej służącej pomiarowi stężenia CO_2 w powietrzu bezpośrednio nad glebą. Jeśli reagentem jest 0,1 molowy roztwór wodorotlenku sodu (0,1 M NaOH), to uwalniany z gleby CO_2 reaguje z nim wg równania:



W celu określenia ilości wydzielonego CO_2 wystarczy oznaczyć nadmiar NaOH, który nie wziął udziału w reakcji. Można tego dokonać na kilka sposobów, jednym z najpopularniejszych jest metoda Wardera (Minczewski i Marczenko, 1985). Polega ona na wykonaniu dwóch miareczkowań próbek 0,1 molowym roztworem kwasu solnego (0,1 M HCl) wobec wskaźników, kolejno: fenoloftaleiny i oranżu metylowego. W pierwszej kolejności podczas miareczkowania wobec fenoloftaleiny zobojętniane są aniony OH^- wynikające z nadmiaru NaOH, oraz aniony CO_3^{2-} w wyniku dysocjacji Na_2CO_3 do wodorowęglanów:



Po odbarwieniu fenoloftaleiny (przy $\text{pH} = 8,3$), w roztworze pozostają (obok anionów Cl^-) już tylko aniony HCO_3^- . Następnie do tej samej próbki dodaje się oranżu metylowego i miareczkuje tym samym odczynnikiem w celu zobojętnienia powstałego w reakcji wodorowęglanu sodu NaHCO_3 wg równania:



a dokładniej:



W trakcie drugiego miareczkowania obserwuje się stopniową zmianę zabarwienia roztworu z jasnożółtego (słomkowego) na jasnopomarańczowy (łososiowy) (Tołoczko i Niewiadomski, 2010).

Za główną jej zaletę uznawana jest łatwość jej przeprowadzenia oraz możliwość prowadzenia równoczesnych pomiarów w wielu miejscach (Bekku i in., 1997), za to po stronie wad można wskazać cały szereg czynników mających wpływ na wielkość wydzielania CO_2 z gleby, które często są pomijane lub lekceważone, jak np. konieczność wymuszenia dyfuzji gazów w komorze ustawionej bezpośrednio na gruncie celem zapobieżenia ich stratyfikacji wynikającej z różnic w masach molowych (co przekłada się na gęstość) wydzielających się gazów, czy kwestia oddziaływania czynników meteorologicznych.

Metoda ta z powodzeniem wykorzystywana jest także współcześnie dostarczając wiarygodnych wyników (Yim i in., 2002; Tüfekçioğlu i Küçük, 2004; Rogalski i in., 2005; Keith i Wong, 2006; Wyczółkowski i in., 2006; Krysiak i in., 2010; Papińska i in., 2010; Tołoczko i Niewiadomski, 2010; Pereira de Mello-Ivo i Salcedo, 2012), choć nie wszyscy badacze są zgodni z tym założeniem wykazując, iż wartości ekshalacji CO_2 uzyskane za jej pomocą są zaniżone (Norman i in., 1997) lub zawyżone (Nakadai i in., 1993).

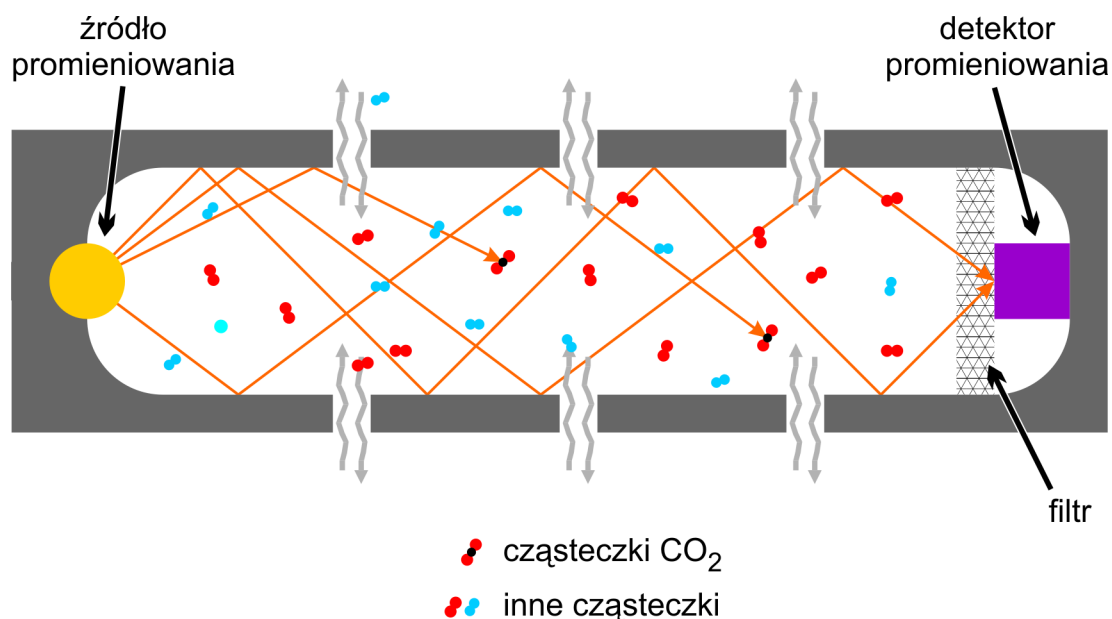
Ważną rolę z punktu widzenia precyzji pomiarów odegrały zautomatyzowane mierniki stężeń gazów – IRGA (Infra-Red Gas Analyzer). Pomiar stężenia np. CO_2 odbywa się za pomocą absorpcji przez gaz promieniowania podczerwonego o określonej długości fali równej $4,26 \mu\text{m}$ (rys. 2) zgodnie z prawem Lamberta-Beera (Nieradka i Mocny, 2002).

Zastosowanie pierwszych technik NDIR w pomiarach wielkości wydzielania CO_2 z gleby miało miejsce blisko 50 lat temu (Rainers, 1968; Schwartz i Bazzaz, 1973). Dziś technika wykorzystująca mierniki wielogazowe do pomiaru stężeń jest rozpowszechniona w wielu dziedzinach gospodarki (np. bezpieczeństwie pracy w kopalniach i zakładach przemysłowych) oraz nauki (meteorologia, gleboznawstwo, ochrona środowiska, geofizyka).

W skład standardowego zestawu pomiarowego służącego określeniu wielkości wydzielania gazów z gleby (rys. 3) wchodzi:

1. Komora pomiarowa – w formie otwartego z jednej strony walca lub równoległoscianu, ewentualnie półkolistej kopuły o określonej objętości, zazwyczaj wyposażonej w wiatrak służący wzbudzaniu dyfuzji cząsteczek gazów. Większość stosowanych komór wykonana jest z tworzyw sztucznych, takich jak szkło akrylowe popularnie nazywane pleksiglasem (Rayment i Jarvis, 1997; Rochette i in., 1997; Jones i in., 2000; Migné i in., 2002; Tołoczko i Niewiadomski, 2015). Spotykane są również zestawy

pomiarowe wyposażone w komory wykonane ze stali (Tang i in., 2006; Kusa i in., 2008) oraz polichlorku winylu (Davidson i in., 2000; Liang i in., 2003; Al-Kaisi i Yin, 2005). Badacze Parkin i Venterea (2010) sugerują, że komora powinna być wykonana z materiałów niereaktywnych, do których, obok wymienionych, zaliczyli także aluminium, polipropylen i polietylen. Dodać należy, iż w zależności od prowadzonych badań, najbardziej zmiennym parametrem jest objętość komór. Wielkość ta jest różna w zależności od zestawu i zmienia się od 0,003 m³ w przypadku prowadzenia badań krótkookresowych (Wroński 2014) do blisko 20 m³ stosowanych w badaniach trzyletnich (Johnson i in., 2001).



Rys. 2. Schemat pomiaru stężenia CO₂ z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego.

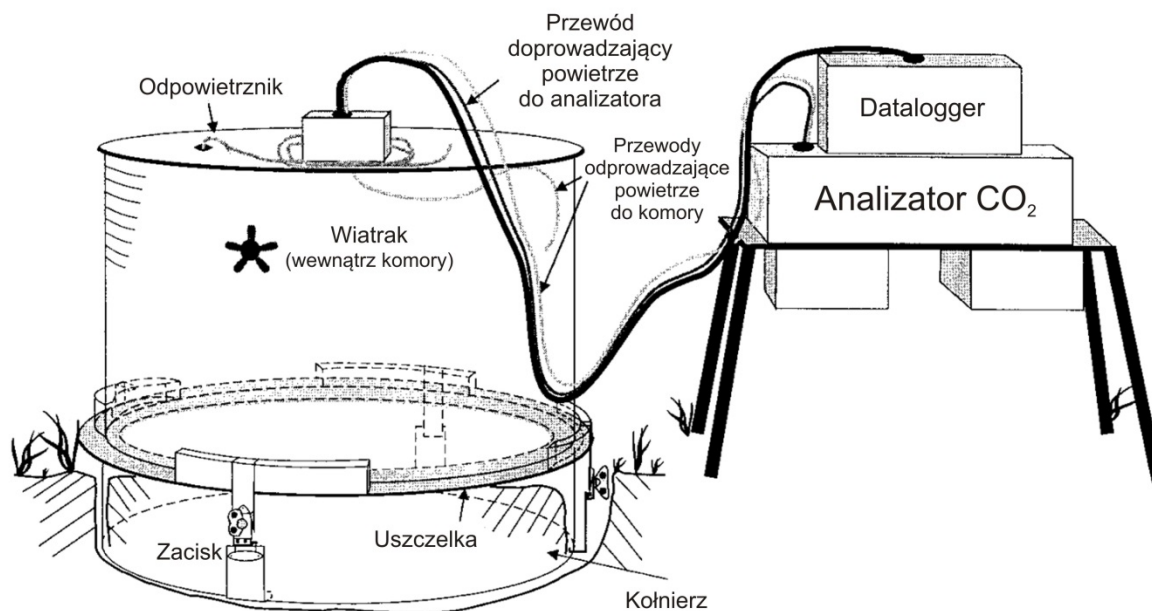
Źródło: Opracowanie na podstawie: Nieradka i Mocny, 2002, s. 123.

2. Stalowa bądź pleksiglasowa rama będąca podstawą komory pomiarowej. Rama taka zazwyczaj wyposażona jest w tzw. kołnierz o zmiennej wysokości, zazwyczaj 3–10 cm, który wbija się w glebę celem odcięcia wybranego fragmentu powierzchni i ograniczeniu ucieczki gazów poza obręb komory. Niektóre zestawy pomiarowe posiadają komory zespolone z kołnierzami umożliwiające instalację całego zestawu jako jednego modułu (Rochette i in., 1997), inne zaś wymagają zainstalowania w pierwszej kolejności ramy z kołnierzem, a na niej dopiero komory pomiarowej przy użyciu uszczelnienia, którym najczęściej jest woda (Tołoczko

i Niewiadomski, 2015) lub tworzywo sztuczne (Rayment i Jarvis, 1997; Rochette i in., 1997).

3. Miernik stężenia badanego gazu (najczęściej CO₂, choć coraz częściej prowadzone są pomiary z użyciem mierników wielogazowych pozwalających na równoczesną rejestrację kilku parametrów). Znakomita większość mierników używanych obecnie to urządzenia zautomatyzowane wykonujące próbkowanie z dużą częstotliwością np. 10 pomiarów na sekundę (Pawlak i in., 2012) bądź rzadziej. Wśród najpopularniejszych urządzeń pomiarowych wskazywanych w założeniach metodycznych podawane są bardzo różne

modele mierników amerykańskiej firmy LI-COR specjalizującej się w produkcji sprzętu służącego pomiarom strumieni gazów. Sam analizator gazowy jest zazwyczaj sprzężony z dataloggerem służącym gromadzeniu zebranych danych. Zestaw pomiarowy często uzupełniany jest o termometr, zwłaszcza jeśli miernik stężenia nie jest wyposażony w czujnik pomiaru temperatury.



Rys. 3. Schemat zestawu pomiarowego z dynamiczną komorą zamkniętą i przenośnym analizatorem dwutlenku węgla. Źródło: Rochette i in., 1997, s. 196 (zmienione).

Nieradka i Mocny (2002) zauważają, że standardowe rozwiązanie stosowane w konstrukcji mierników bazujących na technice NDIR ma dwie wady kompletnie pomijane w badaniach środowiskowych. Pierwszą jest kwestia niestabilności detektora lub źródła promieniowania interpretowana jako zmiana sygnału pomiarowego, co nosi nazwę dryftu. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie pomiaru referencyjnego w oparciu o zastosowanie dodatkowej komory z gazem nie absorbującym promieniowania, ewentualnie umieszczenie dodatkowego filtra po stronie źródła promieniowania. Drugim, ważnym problemem technicznym w ocenie autorów, mogą być wahania napięcia zasilającego źródło promieniowania podczerwonego.

W kwestii używanych komór pomiarowych wyróżnia się 2 podstawowe ich rodzaje: komory zamknięte oraz otwarte. Cechą charakterystyczną komory zamkniętej jest brak wymiany gazowej podczas pomiaru. Wśród zamkniętych komór wyróżnia się dwie odmiany – komory statyczne i dynamiczne. Statyczna komora zamknięta to taka, w której zamyka się określoną objętość gazu nad glebą przez ściśle określony czas, najczęściej od kilku do kilkudziesięciu minut. W tym czasie można zmierzyć stężenie, gdy w trakcie trwania pomiaru określi się jego przyrost lub wskazać tylko wartość początkową i końcową, co po przeliczeniu na jednostkę powierzchni i czasu da nam uśrednioną wielkość wydzielania. Niektórzy badacze (por. Takahashi i Liang, 2007; Kusa i in., 2008) po zakończeniu pomiaru przechwytyują poprzez odessanie próbki powietrza, a szczegółowe analizy dokonują

w warunkach laboratoryjnych przy wykorzystaniu techniki pomiaru w promieniowaniu podczerwonym lub chromatografii gazowej. Dynamiczna komora zamknięta cechuje się tym, że analizator znajduje się poza obrębem komory, zaś powietrze w niej zawarte jest zasysane przez rurkę i doprowadzane do analizatora, a następnie zwracane do komory. W związku z tym, że stężenie gazu w funkcji czasu rośnie, niektórzy uznają komory zamknięte za wadliwe przy określaniu wartości strumieni gazów (Rayment, 2000). Możliwe jest bowiem zaistnienie takich warunków, kiedy CO₂ jest intensywniej pochłaniany przez roślinność bądź rozpuszczany w wodzie glebowej, szczególnie w przypadku histosoli, aniżeli uwalniany z gleby w wyniku mineralizacji i respiracji będących efektem aktywności biologicznej gleb. Drugim mankamentem jest wzrost ciśnienia w komorze ograniczający możliwość ciągłego dopływu gazów do komory. Z tego powodu komory zamknięte rzadko wykorzystywane są do pomiarów długookresowych, chyba że pozwalają na to ich duże rozmiary.

Otwarta komora pomiarowa posiada 2 otwory – wlotowy i wylotowy, dzięki którym powietrze może swobodnie dostawać się do i wydostawać z komory (bez powodowania wzrostu ciśnienia w komorze). Cechą tej techniki jest wykonywanie dwóch pomiarów, często równoczesnych – na „wejściu”, kiedy wykonywany jest pomiar referencyjny i „wyjściu” po nasyceniu powietrza gazami wydostającymi się z gleby. Takie komory umożliwiają prowadzenie nawet pomiarów wieloletnich i doskonale nadają się do pomiaru strumieni CO₂.

Dyfuzja gazów w komorze pomiarowej odbywa się samorzutnie zgodnie z pierwszym prawem Ficka mówiącym, że strumień dyfuzji jest proporcjonalny do gradientu stężenia (Pigoń i Ruziewicz, 2007). Zakładając, że mieszanina gazów uwięzionych w komorze przy rozpoczęciu pomiaru posiada cechy powietrza atmosferycznego możliwe jest jej nasycenie innymi składnikami.

Praktyczne znaczenie mogą mieć już kwestie konstrukcyjne zestawu pomiarowego. Dowiedziono bowiem, iż wielkość komory, bez względu na stosowaną technikę, może mieć znaczenie dla powtarzalności wyników. Komory zajmujące większą powierzchnię na gruncie i posiadające większą pojemność wykazują mniejszą zmienność między powtórzeniami pomiarów (Welles i in., 2001; Savage i Davidson, 2003). Welles i in. (2001) zwracają uwagę, że już samo nałożenie komory na powierzchnię gruntu jest poważną ingerencją wpływającą na temperaturę gleby i różnicę w wilgotności powietrza pomiędzy komorą i atmosferą. Może to mieć wpływ na uzyskiwane wyniki, zwłaszcza jeśli czas prowadzonych badań jest długi. W tej kwestii długość pomiaru jest również znamionnym czynnikiem. W zależności od stosowanej metody standardowe pomiary trwają zazwyczaj od kilku do kilkudziesięciu minut (Parkin i Venterea, 2010), przy czym im krótszy czas pomiaru, tym większa jego wrażliwość. Może to mieć znaczenie w przypadku badań długookresowych. Do tej pory nie dokonano porównania wielkości ekshalacji gazów w badaniach serii krótkookresowych do równoległego pomiaru długookresowego. Eksperyment taki mógłby wskazać istotność czasu pomiaru jako determinanty badanego procesu. Dodać należy, że długość pomiaru uwarunkowana jest dodatkowo parametrami konstrukcyjnymi komory, która może pomieścić określoną ilość gazów.

Istotnym czynnikiem wpływającym na kwestię techniczną pomiarów jest założenie, że powietrze w komorze jest jednorodnie wymieszane, a jego skład homogeniczny dla całej objętości. Zastosowanie wiatraka jest w tym względzie dobrym rozwiązaniem, jednakże w przypadku, kiedy powierzchnia gleby jest bujnie porośnięta roślinnością dużo zależy

będzie od umiejscowienia i wydajności wiatraka. Parkin i Venterea (2010) sugerują ponadto, iż wiatrak może powodować perturbacje ciśnienia w komorze.

Samo badanie wielkości ekshalacji bądź strumieni gazów za pomocą opisywanej metody bazuje na równaniu stanu gazu doskonałego zwanego równaniem Clapeyrona i przyjmującego postać:

$$pV = nRT, \quad (6.5)$$

gdzie:

p – ciśnienie atmosferyczne [Pa]

V – objętość gazu [m^3]

n – liczba moli gazu [mol]

R – uniwersalna stała gazowa $R = N_A \cdot k_B = 8,314 \text{ [J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}]$

gdzie: N_A – liczba Avogadro

k_B – stała Boltzmana,

T – temperatura bezwzględna w [K] = $T \text{ [}^\circ\text{C]} + 273$

Aby określić ilość cząsteczek gazu zawartego w badanej objętości wystarczy równanie to przekształcić do postaci:

$$n = \frac{pV}{RT}. \quad (6.6)$$

Konieczne jest zatem każdorazowe uwzględnienie 2 parametrów determinujących objętość gazów: temperatury oraz ciśnienia atmosferycznego. W badaniach ekshalacji wygodnie jest wskazać ilość wydzielonego gazu w przeliczeniu na jednostkę powierzchni w określonym czasie np. w $[\text{g}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$. Wyjściowym problemem jest kwestia pomiaru stężenia, którego wyniki uzyskiwane przy wykorzystaniu analizatorów podawane są w ppm określających udział cząstek określonej substancji (gazu) w milionie cząstek mieszaniny. Dlatego konieczne jest przeliczenie uwzględniające parametry komory i zmienność warunków atmosferycznych oraz obliczenie różnicy pomiędzy wartościami stężeń końcowego i początkowego (ΔS) wskazanymi przez przyrząd pomiarowy dla danego przedziału czasowego. Można to zapisać jako:

$$E = \Delta S \cdot \frac{F \cdot M_{gas}}{X \cdot K} = \Delta S \cdot \frac{n_C \cdot 10^{-6} \cdot M_{gas}}{X \cdot K}, \quad (6.7)$$

$$[E] = \left[ppm \cdot \frac{\text{mol} \cdot \text{ppm}^{-1} \cdot \text{g}(\text{CO}_2) \text{mol}^{-1}}{h \cdot \text{m}^2} \right] = \left[\frac{\text{g}(\text{CO}_2)}{h \cdot \text{m}^2} \right] = [\text{g}(\text{CO})_2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}],$$

gdzie:

E – ekshalacja w $[\text{mg}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}]$,

ΔS – wzrost stężenia jako różnica wskazań z miernika [ppm] – dla pomiarów gazu (np. CO_2) to różnica między wskazaniem miernika w komorze pomiarowej w 13 minucie i w 1 minucie np.: $\Delta S = 680 \text{ [ppm]} - 520 \text{ [ppm]} = 160 \text{ [ppm]}$,

F – ilość moli gazu odpowiadająca 1 ppm, czyli: $F = n_C \times 10^{-6}$ [mol ppm⁻¹],
 M_{gas} – masa molowa badanego gazu w [g mol⁻¹],
 X – przelicznik długości czasu pomiaru z minut pomiarowych na pełną godzinę [h],
 K – powierzchnia komory w [m²],
 n_C – ilość moli gazu (powietrza) w komorze pomiarowej [mol].

Istnieje bardzo wiele sposobów na określenie wielkości strumienia wydzielania danego gazu z gleby. Analizując przebiegi przyrostu stężenia, najprostszym sposobem jest wykorzystanie równania regresji liniowej. Można jednak tego dokonać tylko wtedy, jeśli przyrost jest stały i spełnia warunki funkcji. W przypadku, kiedy gradient przyrostu stężenia gazu w komorze jest zmienny, co może być efektem poziomego ruchu gazów w wierzchniej warstwie gleby, wzrostu rozpuszczalności gazu w związku ze spadkiem temperatury bądź nieszczelnością komory, konieczne jest odejście od funkcji linearnej na korzyść krzywoliniowej (Kutzbach i in., 2007). Hutchinson i Moser (1981) zaproponowali w tym względzie następujące równanie:

$$f_0 = (C_1 - C_0)^2 / [t_1(2C_1 - C_2 - C_0)] \cdot \ln[(C_1 - C_0)/(C_2 - C_1)] \quad (6.8)$$

gdzie:

f_0 – wartość strumienia w danym momencie czasowym [m³ h⁻¹],
 C_0, C_1, C_2 – stężenia badanego gazu w kolejnych momentach czasowych [ppm],
 t_1 – czas interwału pomiędzy pomiarami [h].

Aby określić uśrednioną wartość strumienia dla określonej jednostki powierzchni, np. 1 m², konieczne jest przemnożenie wartości wyniku przez objętość komory [m³], a następnie przedzielenie przez jej powierzchnię [m²]. Metoda ta została dodatkowo rozwinięta do postaci równania kwadratowego przez zespół S.W. Wagnera (Parkin i Venterea, 2010). Bardzo ciekawe ujęcie metodyczne przedstawił także L. Kutzbach z zespołem (2007) proponując wykorzystanie do określenia wartości strumienia CO₂ nieliniowej funkcji wykładniczej, bazującej na przekształconym równaniu Clapeyrona o postaci:

$$F_{gleba}(t) = D \cdot \frac{[C_d - C(t)]}{d} \cdot \frac{pV}{RTA} \quad (6.9)$$

gdzie:

$F_{gleba}(t)$ – wartość strumienia w funkcji czasu,
 D – dyfuzyjność CO₂ w glebie [m² s⁻¹],
 C_d – stężenie CO₂ na nieznaną głębokości gruntu – d , na której jest ono stałe i niezależne od umiejscowienia komory [ppm],
 $C(t)$ – stężenie CO₂ w komorze pomiarowej [ppm],
 $\frac{pV}{RT}$ – ilość cząsteczek gazu,
 A – powierzchnia komory [m²].

Poza już wskazanymi, istnieje wiele innych sposobów kalkulacji wyników, jednak w znakomitej większości publikacji naukowych informacje te są pomijane, ewentualnie podane w formie cytacji autora proponowanego rozwiązania.

Współcześnie panującymi trendami w badaniach ekshalacji gazów z gleby jest możliwość prowadzenia ciągłych pomiarów długookresowych – rocznych lub dłuższych (Ambus i Robertson, 1999; Scott i in., 2003; Turcu i in., 2005; Koskinen i in., 2014) oraz prowadzenie równoległych pomiarów profilowych (Fang i Moncrieff, 1998b). Coraz bardziej zaawansowany sprzęt, liczne ulepszenia oraz automatyzacja wielu procesów odpowiedzialnych za kalibrację, okresowe przewietrzanie komory stwarzają nowe możliwości i wyzwania współczesnej nauce (Rayment i Jarvis, 1997; Liang i in., 2003; Widén i Lindroth, 2003).

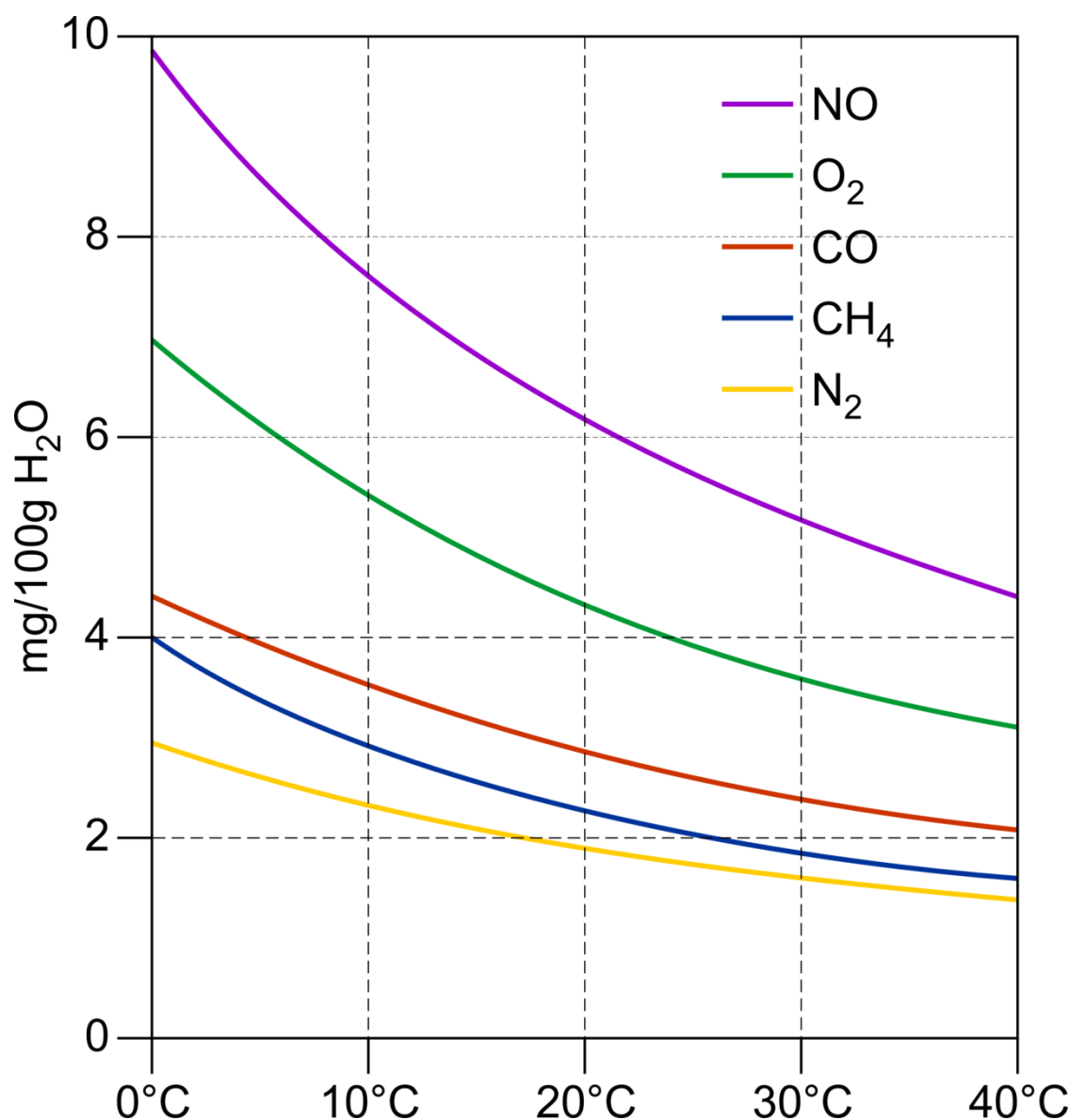
6.3. Wpływ czynników środowiskowych na wielkość ekshalacji gazów

Podstawowym czynnikiem wpływającym na jakość prowadzonych badań jest lokalizacja stanowiska pomiarowego. Aspekt ten nie jest zbyt często uwzględniany w metodyce poza wskazaniem miejsca (teren zalesiony, pole uprawne), ewentualnie krótką charakterystyką roślinności. Precyzyjny wybór lokalizacji zwiększa szansę reprezentatywności badań w odniesieniu do większych obszarów. Przykładowo, wszelkiego rodzaju zagłębienia terenu mogą być miejscami okresowej stagnacji gazów, np. w godzinach nocnych przy braku poziomego ruchu powietrza, przez co pomiar wykonany w takim miejscu będzie obciążony błędem. Podobnie interpretacja danych pochodzących z powierzchni nawet nieznacznie nachylonych nie będzie w pełni adekwatna z uwagi na możliwość występowania ruchów masowych w skali mikro i towarzyszącym tym procesom wymywaniu związków próchnicznych.

Istotnym czynnikiem jest także stopień pokrycia terenu roślinnością i typ siedliskowy. K. Thomas z zespołem (1996) podaje, że eksudacja węgla organicznego z korzeni roślin na obszarach torfowiskowych stymuluje proces metanogenezy, przez co sama roślinność przyczynia się do zwiększenia produkcji CH_4 . Wśród roślin naczyniowych bardzo istotną rolę w obiegu metanu odgrywają m.in.: pałka szerokolistna, welnianka wąskolistna, tarczeń wirgiński, trzęślica modra, turzyca gwiazdkowata czy grązel żółty, mające zdolność transportowania CH_4 w porowatych łodygach zarówno z gleby ku powierzchni jak i zatłaczania go z powrotem (Thomas i in., 1996; Smith i in., 2003). Dowiedziono zatem, że rodzaj roślinności ma duże znaczenie dla określenia wielkości wydzielania gazów z gleby, co potwierdzają także inni badacze (por. Hatano i Lipiec, 2004).

W licznych badaniach respiracji niezbyt często pojawiają się precyzyjne informacje dotyczące samej gleby – określenia jej typu, składu granulometrycznego i właściwości fizykochemicznych. Większość współcześnie prowadzonych eksperymentów zakłada jednak pomiar temperatury, ciśnienia i wilgotności. Smith i in. (2003) wskazują zawartość wody glebowej jako jeden z podstawowych czynników wpływających na wielkość wydzielania gazów wynikającą z zajmowania przez wodę porów glebowych, którymi w okresach suchych następowałaby swobodna ekshalacja. Ponder (2005) podaje, że zmiany wilgotności gleby przy temperaturze poniżej $+5^\circ\text{C}$ mają niewielkie znaczenia dla wielkości respiracji, mimo ewidentnego wzrostu rozpuszczalności gazów. Efekt ten wzrasta w przypadku, gdy

temperatura oscyluje w zakresie 10–20°C. Duża ilość wilgoci zmienia charakter rozkładu obumarłej materii organicznej z butwienia na gnicie, przez co różni się skład chemiczny gazów wydobywających się z gleby. Potwierdzają to badania A. Lomander z zespołem (1998). Z kolei Borken i in. (2003) dowiedli, że proces osuszania gleb niesie ze sobą charakterystyczne „impulsy gazowe”. Na podstawie badań poziomów ściółki gleb leśnych zauważono silny związek pomiędzy wilgotnością i wielkością wydzielania gazów z gleby. W okresach intensywnego wysuszania gleb stwierdzano skokowe wzrosty ekshalacji CO₂ odpowiadające odblokowaniu porów glebowych przez zanik wilgoci.



Rys. 4. Zmienność rozpuszczalności gazów w funkcji temperatury.

Źródło: Opracowanie na podstawie: Averill, Eldredge, 2012, s. 1580.

Wielu badaczy zwraca szczególną uwagę na kwestię zależności wydzielania gazów z gleby od temperatury (Thomas i in., 1996; Davidson i in., 1998; Lomander i in., 1998; Fang i Moncrieff, 2001; Parkin i Kaspar, 2003; Tang i in., 2006). Podstawowym założeniem

wpływu tego czynnika jest cykl wegetacyjny roślin i aktywność mikrobiologiczna edafonu glebowego. Badania potwierdzają, że im temperatura gleby jest niższa, tym aktywność oddechowa mniejsza (Lloyd i Taylor, 1994; Fang i Moncrieff, 2001; Parkin i Venterea, 2010). Drugim wątkiem w kwestii wpływu temperatury na wielkość emisji gazów z gleb jest wspomniana kwestia rozpuszczalności gazów. Smith i in. (2003) wskazują, że w przypadku dużej rozpuszczalności gazów w wodzie (rys. 4), której gęstość wzrasta w miarę spadku temperatury, gazy mogą zostać uwięzione pod powierzchnią. Dopiero wzrost temperatury może spowodować ich nagłą ucieczkę do atmosfery.

W tym miejscu warto dodać, że komora pomiarowa ograniczająca napływ świeżego powietrza, może wywoływać swoisty „efekt szklarniowy”. Nagrzewająca się powierzchnia komory będzie powodować wymuszony wzrost temperatury w jej wnętrzu. Parkin i Venterea (2010) wnioskuje, że w tym celu do badań najlepiej wykorzystywać komory wykonane z pleksiglasu, a wszystkie wykonane z materiałów nieprzezroczystych należy malować na biało ewentualnie polecają zastosowanie osłony odbijającej światło np. z folii aluminiowej.

Warto zwrócić także uwagę na kwestię kompaktacji gleb wynikającą z prowadzonych zabiegów pielęgnacyjnych czy agrotechnicznych. Coroczne zabiegi, takie jak orka czy bronowanie, odgrywają znaczącą rolę w procesie uwalniania gazów ustabilizowanych na głębokości kilkunastu–kilkudziesięciu centymetrów pod powierzchnią terenu (Hatano i Lipiec, 2004). Ubijanie gleby przez ciężki sprzęt rolniczy zmniejsza jej porowatość, dlatego dobrym rozwiązaniem jest prowadzenie badań gęstości objętościowej gleb. W przypadku obszarów leśnych duże znaczenie ma usuwanie resztek roślinnych przy prowadzeniu ścinki drzew.

Jak zauważa F. Ponder (2005), usuwanie ściółki w ramach leśnych prac przygotowawczych do nasadzeń ma ogromne znaczenie dla wielkości ekshalacji. Dzieje się tak z uwagi na największą koncentrację mikroorganizmów w glebie do głębokości 5 cm pod powierzchnią terenu.

Kolejnym czynnikiem budzącym kontrowersje wśród badaczy respiracji glebowej jest ciśnienie. W przypadku komór zamkniętych przy pomiarach długookresowych ciśnienie mieszaniny gazów w komorze wzrasta bez względu na zmiany ciśnienia atmosferycznego poza obrębem komory. Zjawisko to jest niekorzystne, gdyż wzrastające ciśnienie powoduje presję w stosunku do gazów, których ekshalacja z gleby może być ograniczana. W literaturze proponowane są dwa rozwiązania tego problemu. Pierwszym jest instalacja otworu wentylacyjnego w komorze, natomiast drugim skrócenie czasu pomiaru celem uniknięcia wspomnianego efektu (Parkin i Venterea, 2010). W przypadku komór otwartych zauważono, że sposób zasilania komory w powietrze wykazuje różnice ciśnienia. W zależności od tego czy powietrze jest odsysane z komory aby wykonać pomiar stężenia, czy też przepływa za pomocą 2 otworów – wlotowego i wylotowego, na których zainstalowane są sondy pomiarowe, pojawia się istotna różnica wartości strumienia CO₂. Zależność tę opisał J.M. Welles z zespołem (2001), prowadząc obserwację różnic potencjału ciśnienia powietrza glebowego i atmosferycznego.

6.4. Podsumowanie i wnioski

Każda z przedstawionych metod ma skrywane wady i eksponowane zalety, ale to od programu badawczego – od czasu przez jaki mają być prowadzone badania, od lokalizacji badań, od wielkości środków finansowych którymi dysponuje zespół badaczy – zależy decyzja o wyborze metody. Nie bez znaczenia są również wcześniejsze doświadczenia badaczy. W zdecydowanej większości pozostają oni na długie lata przy raz wybranej metodzie. Bardzo niewiele decyduje się na eksperymenty z kilkoma metodami, a ich wnioski byłyby bardzo cenne, bo mając szersze doświadczenie badawcze mogliby porównać wygodę i łatwość instalacji w terenie czy efektywność dokonywanych pomiarów. W świetle przeprowadzonych badań porównawczych i stopnia poznania i dopracowania techniki badawczej metody komorowe należą do wiarygodnych i efektywnych metod pomiaru wielkości wydzielania gazów z gleby.

Wydaje się, że prowadzenie badań tylko jedną metodą na danym stanowisku nie daje maksymalnej pewności o prawdziwości uzyskanych wyników szczególnie, że nikt już ich nie będzie mógł powtórzyć. Uruchomienie równoległych badań dwoma technikami pomiarowymi jest dobrym potwierdzeniem uzyskiwanych wyników. Jednak z drugiej strony wielość metod i różnorodność badań prowadzonych obecnie na całym świecie – dając podobny obraz obserwowanych zjawisk – potwierdza postępujące zmiany na całej planecie.

Autorzy dziękują Panu mgr. Tomaszowi Minkiewiczowi z Pracowni Technik Komputerowych i Graficznych UŁ za pomoc przy opracowaniach graficznych. Praca wykonana w ramach projektu “Bilans absorpcji i emisji gazów cieplarnianych (metanu, dwutlenku węgla i pary wodnej) na obszarach bagiennych (studium Biebrzańskiego Parku Narodowego)” sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST10/07550. Autorzy dziękują Dyrekcji Biebrzańskiego Parku Narodowego za umożliwienie prowadzenia badań na terenie Parku.

Literatura

- Al-Kaisi, M.M., Yin, X., 2005, Tillage and Crop Residue Effects on Soil Carbon and Carbon Dioxide Emission in Corn-Soybean Rotations, *Journal of Environmental Quality*, 34, 437–445.
- Ambus, P., Robertson, G. P., 1999, Automated near-continuous measurement of carbon dioxide and nitrous oxide fluxes from soil. *Soil Science Society of America Journal*, 79: 5–13.
- Averill, B.A., Eldredge, P., 2012, Principles of General Chemistry, online, <<http://2012books.lardbucket.org/pdfs/principles-of-general-chemistry-v1.0.pdf>>, 1–3033.
- Baldocchi, D.D., Verma, S.B., Matt, D.R., Anderson, D.E., 1986, Eddy correlation measurements of carbon dioxide efflux from the floor of a deciduous forest, *Journal of Applied Ecology*, 23, 967–975.
- Bekku, Y., Koizumi, H., Oikawa, T., Iwaki, H., 1997, Examination of four methods for measuring soil respiration, *Applied Soil Ecology*, 5(3), 247–254.
- Borken, W., Davidson, E.A., Savage, K., Gaudinski, J., Trumbore, S.E., 2003, Drying and Wetting Effects on Carbon Dioxide Release from Organic Horizons, *Soil Science Society of America Journal*, 67, 1888–1896.
- Davidson, E.A., Belk, E., Boone, R.D., 1998, Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, *Global Change Biology*, 4, 217–227.

- Davidson, E.A., Savage, K., Verchot, L.V., Navarro, R., 2002, Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration, *Agricultural and Forest Meteorology*, 113(1–4), 21–37.
- Davidson, E.A., Verchot, L.V., Cattânio, J.H., Ackerman, I.L., Carvalho, J.E.M., 2000, Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia, *Biogeochemistry*, 48, 53–69.
- Edwards, N.T., 1982, The use of soda-lime for measuring respiration rates in terrestrial systems, *Pedobiologia*, 23(5), 321–330.
- Fang, C., Moncrieff, J.B., 1996, An improved dynamic chamber technique for measuring CO₂ efflux from the surface of soil, *Functional Ecology*, 10(2), 297–305.
- Fang, C., Moncrieff, J.B., 1998a, An open-top chamber for measuring soil respiration and the influence of pressure on CO₂ efflux measurement, *Functional Ecology*, 12, 319–325.
- Fang, C., Moncrieff, J.B., 1998b, Simple and fast technique to measure CO₂ profiles in soil, *Soil Biology and Biochemistry*, 30(14), 2107–2112.
- Fang, C., Moncrieff, J.B., 2001, The dependence of soil CO₂ efflux on temperature, *Soil Biology and Biochemistry*, 33(2), 155–165.
- Freijer, J.I., Bouten, W., 2004, A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: Experiments and simulation, *Plant and Soil*, 135(1), 133–142.
- Hao, Q., Jiang, C., 2014, Contribution of root respiration to soil respiration in a rape (*Brassica campestris* L.) field in Southwest China, *Plant-Soil-Environment*, 60(1), 8–14.
- Hatano, R., Lipiec, J., 2004, Effects of land use and cultural practices of greenhouse gas fluxes in soil, *Acta Agrophysica*, 109(6), 1–51.
- Hutchinson, G.L., Mosier, A.R., 1981, Improved soil cover method for field measurement of nitrous oxide fluxes, *Soil Science Society of America Journal*, 45, 311–316.
- Janssens, I.A., Kowalski, A.S., Longdoz, B., Ceulemans, R., 2000, Assessing forest soil CO₂ efflux: an in situ comparison of four techniques, *Tree Physiology*, 20(1), 23–32.
- Jensen, L.S., Mueller, T., Tate, K.R., Ross, D.J., Magid, J., Nielsen, N.E., 1996, Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: A comparison of two chamber methods, *Soil Biology and Biochemistry*, 28(10–11), 1297–1306.
- Jones, T.H., Bezemer, T.M., Körner, C., Lawton, J. H., Thompson, L. J., 2000, Comparing studies of artificial and natural ecosystems responses to CO₂ enrichment, *Biotronics*, 29, 1–7.
- Johnson, D.W., Hungate, B.A., Dijkstra, P., Hymus, G., Drake, B., 2001, Effects of Elevated Carbon Dioxide on Soils in a Florida Scrub Oak Ecosystem, *Journal of Environmental Quality*, 30, 501–507.
- Kasimir-Klemedtsson, A., Klemedtsson, L., Berglund, K., Martikainen, P., Silvola, J., Oenema, O., 1997, Greenhouse gas emissions from farmed organic soils: a review, *Soil Use and Management*, 13(4), 245–250.
- Keith, H., Wong, S.C., 2006, Measurement of soil CO₂ efflux using soda lime absorption: both quantitative and reliable, *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 1121–1131.
- King, J.A., Harrison, R., 2002, Measuring soil respiration in the field: an automated closed chamber system compared with portable IRGA and alkali absorption methods, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(3–4), 403–423.
- Koizumi, H., Nakadai, T., Usami, Y., Satoh, M., Shiyomi, M., Oikawa, T., 1991, Effect of carbon dioxide concentration on microbial respiration in soil, *Ecological Research*, 6, 227–232.
- Koskinen, M., Minkinen, K., Ojanen, P., Kämäräinen, M., Laurila, T., Lohila, A., 2014, Measurements of CO₂ exchange with an automated chamber system throughout the year: challenges in measuring night-time respiration on porous peat soil. *Biogeosciences*, 11, 347–363.

- Krysiak, S., Tołoczko, W., Niewiadomski, A., 2010, Respiracja CO₂ w glebach ekosystemów polowych wytworzonych ze skał macierzystych różnego pochodzenia, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 42, 144–150.
- Kusa, K., Sawamoto, T., Hu, R., Hatano, R., 2008, Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO₂ and N₂O fluxes in two upland field soils, *Soil Science and Plant Nutrition*, 54, 777–785.
- Kutzbach, L., Schneider, J., Sachs, T., Giebels, M., Nykanen, H., Shurpali, N.J., Martikainen, P.J., Alm, J., Wilmking, M., 2007, CO₂ flux determination by closed-chamber methods can be seriously biased by inappropriate application of linear regression, *Biogeosciences*, 4, 1005–1025.
- Lapitan, R.L., Wanninkhof, R., Mosier, A.R., 1999, Methods for stable gas flux determination in aquatic and terrestrial systems, w: A.D. Bouwman (red.), *Approaches to scaling a trace gas fluxes in ecosystems*. Elsevier Science, Amsterdam, 31–66.
- Li, C., 2007, Quantifying greenhouse gas emissions from soils: Scientific basis and modeling approach, *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 344–352.
- Liang, N., Inoue, G., Fujinuma, Y., 2003, A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil CO₂ efflux, *Tree Physiology*, 23, 825–832.
- Lloyd, A., Taylor, J.A., 1994, On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, 8, 315–323.
- Lomander, A., Kätterer, T., Andrén, O., 1998, Carbon dioxide evolution from top- and subsoil as affected by moisture and constant and fluctuating temperature, *Soil Biology and Biochemistry*, 30(14), 2017–2022.
- Lundegårdh, H., 1927, Carbon dioxide evolution of soil and crop growth, *Soil Science*, 23(6), 417–453.
- Maljanen, M., Hytönen, J., Mäkiranta, P., Alm, J., Minkkinen, K., Laine, J., Martikainen, P.J., 2007, Greenhouse gas emissions from cultivated and abandoned organic croplands in Finland, *Boreal Environment Research*, 12, 133–140.
- Maljanen, M., Komulainen, V. M., Hytönen, J., Martikainen, P.J., Laine, J., 2004, Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics, *Soil Biology and Biochemistry*, 36(11), 1801–1808.
- Martin, J.G., Bolstad, P.V., Norman, J.M., 2004, A carbon dioxide flux generator for testing infrared gas analyzer – based soil respiration systems, *Soil Science Society of America Journal*, 68, 514–518.
- Masunaga, T., Sato, K., Senga, Y., Seike, Y., Inaishi, T., Kudo, H., Wakatsuki, T., 2007, Characteristics of CO₂, CH₄ and N₂O emissions from a multi-soil-layering system during wastewater treatment, *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 173–180.
- Migné, A., Davoult, D., Spilmont, N., Menu, D., Boucher, G., Gattuso, J.-P., Rybarczyk, H., 2002, A closed-chamber CO₂-flux method for estimating intertidal primary production and respiration under emersed conditions, *Marine Biology*, 140, 865–869.
- Nakadai, T., Koizumi, H., Usami, Y., Satoh, M., Oikawa, T., 1993, Examination of the method for measuring soil respiration in cultivated land: Effect of carbon dioxide concentration on soil respiration, *Ecological Research*, 8, 65–71.
- Nieradka, G., Mocny, W., 2002, Pomiar stężenia dwutlenku węgla przy wykorzystaniu absorpcji promieniowania czerwonego techniką NDIR, w: *Ekologia w elektronice – materiały II Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej*, Warszawa, 121–128.
- Norman, J.M., Kucharik, C.J., Gower, S.T., Baldocchi, D.D., Crill, P.M., Rayment, K., Savage, K., Striegl, R.G., 1997, A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes, *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), 28771–28777.

- Nykänen, H., Alm, J., Lang, K., Silvola, J., Martikainen, P.J., 1995, Emissions of CH₄, N₂O and CO₂ from a virgin fen and a fen drained for grassland in Finland, *Journal of Biogeography*, 22, 351–357.
- Papińska, E., Michalska-Hejduk, D., Niewiadomski, A., Tołoczko, W., 2010, Wydzielanie CO₂ z gleb leśnych i łąkowych w Bolimowskim Parku Krajobrazowym, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 42, 136–143.
- Parkin, T.B., Venterea, R.T., 2010, Sampling Protocols. Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements, w: R.F. Follett (red.), *Sampling Protocols*, 1–39.
- Pawlak, W., Fortuniak, W., Siedllec, M., Kłysik, K., 2012, Wybrane problemy metodyczne pomiaru turbulencyjnej wymiany dwutlenku węgla na terenie podmokłym – Biebrzański Park Narodowy 2010, *Przegląd Geofizyczny*, 57(2), 101–111.
- Pereira de Mello-Ivo, W.M., Salcedo, I.H., 2012, Soil CO₂ Flux: A method comparison of closed static chambers in a sugarcane field, *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 421–426.
- Pigoń, K., Ruziewicz, Z., 2007, *Chemia fizyczna. Tom I: Podstawy fenomenologiczne*. PWN, Warszawa, 437–438.
- Ponder, F., 2005, Effect of soil compaction and biomass removal on soil CO₂ efflux in a Missouri forest. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36, 1301–1311.
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J.C., Grünzweig, J.M., Reth, S., Subke, J., Savage, K., Kutsch, W., Østreng, G., Ziegler, W., Anthonim, P., Lindroth, A., Hari, P., 2004, Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux, *Agricultural and Forest Meteorology*, 123, 159–176.
- Raich, J. W., Schlesinger, W.H., 1992, The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate, *Tellus*, 44B, 81–90.
- Rainers, W.A., 1968, Carbon dioxide evolution from the floor of three Minnesota forests. *Ecology*, 49(3), 471–483.
- Rastogi, M., Singh, S., Pathak, H., 2002, Emission of carbon dioxide from soil, *Current Science*, 82(5), 510–517.
- Rayment, M.B., 2000, Closed chamber systems underestimate soil CO₂ efflux, *European Journal of Soil Science*, 51(1), 107–110.
- Rayment, M.B., Jarvis, P.G., 1997, An improved open chamber system for measuring soil CO₂ effluxes in the field, *Journal of Geophysical Research*, 102(D24), 28779–28784.
- 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., Ellert, B., Gregorich, E.G., Desjardins, R.L., Pattey, E., Lessard, R., Johnson, B.G., 1997, Description of a dynamic closed chamber for measuring soil respiration and its comparison with other techniques, *Canadian Journal of Soil Science*, 77, 195–203.
- Rochette, P., Hutchinson, G.L., 2005, Measurement of Soil Respiration in situ: Chamber Techniques. USDA-ARS/UNL Faculty, 1379(12), 247–286.
- Rogalski, L., Bęś, A., Warmiński, K., 2005, Emisja dwutlenku węgla określana w zależności od rekultywowanego utworu glebowego, *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 505, 361–367.
- Sakata, T., Ishizuka, S., Takahashi, M., 2007, Separation of soil respiration into CO₂ emission sources using ¹³C natural abundance in a deciduous broad-leaved forest in Japan, *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, 328–336.
- Savage, K.E., Davidson, E.A., 2003, A comparison of manual and automated systems for soil CO₂ flux measurements: trade-offs between spatial and temporal resolution, *Journal of Experimental Botany*, 54(384), 891–899.

- Schneider, M., Kutzbach, L., Schulz, S., Wilmking, M., 2009, Overestimation of CO₂ respiration fluxes by the closed chamber method in low-turbulence nighttime conditions, *Journal of Geophysical Research*, 114, G03005.
- Schwartz, D.M., Bazzaz, F.A., 1973, In situ measurements of carbon dioxide gradients in a soil-plant atmosphere system, *Oecologia*, 12(2), 161–167.
- Scott, A., Crichton, I., Ball, B. C., 1999, Long-term monitoring of soil gas fluxes with closed chambers using automated and manual systems, *Journal of Environmental Quality*, 28, 1637–1643.
- Smith, K.A., Ball, T., Conen, F., Dobbie, K.E., Massheder, J., Rey, A., 2003, Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes, *European Journal of Soil Science*, 54, 779–791.
- Takahashi, Y., Liang, N., 2007, Development of chamber-based sampling technique for determination of carbon stable isotope ratio of soil respired CO₂ and evaluation of influence of CO₂ enrichment in chamber headspace, *Geochemical Journal*, 41, 493–500.
- Tang, X.L., Zhou, G.Y., Liu, S.G., Zhang, D.Q., Liu, S.Z., Li, J., Zhou, C.Y., 2006, Dependence of soil respiration on soil temperature and soil moisture in successional forests in Southern China, *Journal of Integrative Plant Biology*, 48(6), 654–663.
- Thomas, K.L., Benstead, J., Davies, K.L., Lloyd, D., 1996, Role of wetland plants in the diurnal control of CH₄ and CO₂ fluxes in peat, *Soil Biology and Biochemistry*, 28, 11–23.
- Tołoczko, W., Niewiadomski, A., 2010, Łatwy sposób oznaczania ilości CO₂ uwalnianego z gleby, *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych*, 42, 151–157.
- Tołoczko, W., Niewiadomski, A., 2015, Measurements of selected greenhouse gases exhalation by using the closed-chamber technique and calculation of hour expiration with regard to CO₂ emissions, *Folia Geographica Physica*, 14, 69–74.
- Tüfekçioğlu, A., Küçük, M., 2004, Soil Respiration in Young and Old Oriental Spruce Stands and in Adjacent Grasslands in Artvin, Turkey, *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 28, 429–434.
- Turcu, V.E., Jones, S.B., Or, D., 2005, Continuous Soil Carbon Dioxide and Oxygen Measurements and Estimation of Gradient-Based Gaseous Flux, *Vadose Zone Journal*, 4, 1161–1169.
- Welles, J.M., Demetriades-Shah, T.H., McDermitt, D.K., 2001, Considerations for measuring ground CO₂ effluxes with chambers, *Chemical Geology*, 177(1-2), 3–13.
- Widén, B., Lindroth, A., 2003, A calibration system for soil carbon dioxide-efflux measurement chamber: description and application. *Soil Science Society of America Journal*, 67, 327–334.
- Wroński, K., 2014, Wydzielanie dwutlenku węgla z gleb leśnych i łąkowych w regionie łódzkim oraz wpływ człowieka na ten proces. w: R. Machowski, M.A. Rzętała (red.), *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko*, T. 15, 98–107.
- Wyczółkowski, A.J., Wyczółkowska, M., Dąbek-Szreniawska, M., 2006, Biologiczna aktywność gleb pod roślinami w wybranym płodozmianie, *Acta Agrophysica*, 8(1), 275–284.
- Yim, M. H., Joo, S.J., Nakane, K., 2002, Comparison of field methods for measuring soil respiration: a static alkali absorption method and two dynamic closed chamber methods, *Forest Ecology and Management*, 170(1-3), 189–197.

Practical aspects of the chamber techniques used in the measurements of exhalation of gases from soil into the atmosphere

Abstract

The measurement of soil respiration is an interesting research problem of modern science. A multitude of methods and measurement techniques makes it depending on research location and numerous factors which affecting gas emissions from soil to the atmosphere. This paper summarizes the most popular ways of measurements using different chamber methods. The methodological assumptions of CO₂ measurements using chemical methods and NDIR techniques were presented. A brief characterization of measuring chambers with regard to their kinds was submitted. The authors, basing on a large amount of literature, presented the main technical and environmental factors affecting the correctness of the research together with proposals for solutions of the most common technical problems.

Key words: soil respiration, measurement methods, chamber techniques, soil moisture, land use