

Zmienność przestrzenna emisji CO₂ z gleb leśnych i łąkowych w zachodniej części Wzniesień Łódzkich

Spatial variability of CO₂ fluxes from meadow and forest soils in western part of Wzniesienia Łódzkie (Łódź Hills)

Krzysztof Tadeusz Wroński

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Geografii Fizycznej, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

Tel. +48 504 357430, e-mail: krzysztofwr@tlen.pl

Abstract. For this study, the rate of soil respiration was estimated based on monthly measurements of 20 research points representing different types of plant communities. Meadows were found to have the highest rates of soil respiration, whereas rates measured in forests were lower. However, the seasonality of leaf and pine needle decomposition caused large variation in the CO₂ fluxes from forest soils. Furthermore, the carbon content at both, the soil surface and 5 cm below ground, affected spatial differentiation of soil respiration in summer and autumn, while the carbon content at 5 cm below ground also affects the spatial variability of annual CO₂ fluxes from the soil. Amazingly, however, results of research indicate that the carbon content throughout the whole humus layer does not impact soil respiration. It was also observed that changes in relief affected rates of soil respiration due to differences in sunlight exposure and the history of land use, which can markedly reduce the impact of the carbon content at 5 cm below ground on soil respiration.

Keywords: soil respiration, carbon dioxide, spatial variability, tree stands, felling areas, relief

1. Wstęp

Poznano już stosunkowo dobrze czynniki wpływające na zmienność czasową respiracji gleby (Borken et al. 1999; Rochette et al. 1999; Kutsch et al. 2001; Tang et al. 2003, 2005; Savage, Davidson 2003; Tufekcioglu, Kucuk 2004; Zhaofu et al. 2005), natomiast wiedza na temat zmienności przestrzennej tego zjawiska wymaga uzupełnienia. Na podstawie szeregu badań, dotyczących pojedynczych zagadnień, można sformułować jednak pewne zależności. Najwyższa emisja CO₂ z gleby występuje na terenach łąk i innych siedlisk z roślinnością trawiastą (Reich, Tufekcioglu 2000; Lohila et al. 2003; Reth et al. 2003; Frank et al. 2006; Papińska et al. 2010), niższa jest obserwowana na terenach leśnych (Reich, Tufekcioglu 2000; Papińska et al. 2010) i polach uprawnych (Lohila et al. 2003; Reth et al. 2003; Frank et al. 2006), a najniższa zwykle na terenach pozostawionych odłogiem (Reth et al. 2003; Trümper, Klik 2008). Odstępstwa od powyższego uszeregowania mogą występować ze względu na wiek drzewostanu (Tufekcioglu, Kucuk 2004), rodzaj uprawy (Frank et al. 2006), czy wilgotność siedliska (Papińska et al. 2010).

Brakuje jednak dokładniejszych badań dotyczących korelacji między rodzajem drzewostanu a wielkością emisji CO₂ z gleby.

Oprócz rodzaju roślinności i sposobu użytkowania na przestrzenną zmienność wielkości emisji CO₂ może wpływać zawartość węgla w glebie. Szereg badań wskazuje na istnienie takiego związku (La Scala et al. 2000, Tufekcioglu et al. 2001, Franzluebbers et al. 2002, Harguchi et al. 2002), ale istnieją również prace zawierające odmienne wnioski (Francez et al. 2000; Reichstein et al. 2003), wskazujące na brak istotnej korelacji między respiracją a zawartością węgla organicznego w glebie. Rodeghiero i Cescatti (2005) wysunęli przypuszczenie, że różne rezultaty badań mogą wynikać z tego, że najczęściej badana jest zależność dotycząca stężenia węgla w wierzchniej warstwie gleby wyrażonego w jednostce masy na jednostkę objętości, a nie ilości węgla wyrażonej w jednostce masy na jednostkę powierzchni.

Badając przestrzenną zmienność respiracji z gleb leśnych rozpatrywano również wpływ człowieka na ten proces. Do tychczas najwięcej badań nawiązywało do wpływu wycieków

Wpłynęło: 21.12.2016 r., zrecenzowano: 6.06.2017 r., zaakceptowano: 12.06.2017 r.

(Ohashi et al. 1999, Concilio 2005, Tang 2005), natomiast rzadko zajmowano się następstwami zmian w drzewostanie oraz zmianami w rzeźbie terenu (Wroński 2014).

Celem niniejszej pracy jest scharakteryzowanie zmienności przestrzennej emisji CO₂ z gleb leśnych i łąkowych na obszarze Wzniesień Łódzkich w zależności od najbardziej typowych czynników mogących wpływać na ten proces:

- rodzaju roślinności występującej na tym terenie,
- zawartości węgla organicznego w glebie,
- ingerencji człowieka w drzewostan,
- ingerencji człowieka w rzeźbę terenu na terenie lasu.

2. Metodyka

Wielkość respiracji gleby mierzono za pomocą metody komory zamkniętej. Specjalnie skonstruowaną, metalową ramę wbijano w glebę na głębokość ok. 3 cm, po czym na metalowym stelażu kładziono miernik stężenia dwutlenku węgla AirTECH-vento firmy Gazex, wykorzystujący metodę NDIR (Non-Dispersive Infrared). Po włożeniu do komory miernika, na stalowej ramie był kładziony klosz z pleksiglasu. W celu uszczelnienia komory, rowek w stalowej ramie, w który wprowadzano klosz, wypełniano wodą. W ten sposób izolowano niewielką przestrzeń nad glebą, o wymiarach 23×23×6 cm, od czynników zewnętrznych na 10-minutowy odcinek czasu. Dokonywano odczytów stężenia dwutlenku węgla 5 min. oraz 10 min. od zamknięcia komory. Dokładność pomiarów miernika wynosi ±3% wskazań, a czas odpowiedzi ok. 2 minut. Różnicę stężeń liczoną między oboma pomiarami, po uwzględnieniu wielkości komory przeliczano na wielkość wydzielonego w analizowanym czasie dwutlenku węgla.

Miernik wskazuje stosunek liczby cząstek CO₂ do liczby cząstek całego powietrza (a więc ułamek molowy) wyrażony w ppm, a zatem:

$$X = \frac{n_{CO_2}}{n_{pow}} \cdot 1000\ 000 \quad (1)$$

gdzie:

X – wskazania miernika [ppm]

n_{CO_2} – liczba moli CO₂

n_{pow} – liczba moli powietrza

Wartość respiracji wyraża się wzorem:

$$R = \frac{\Delta M_{CO_2}}{P \cdot t} \quad (2)$$

gdzie:

R – respiracja gleby

ΔM_{CO_2} – różnica między masą CO₂ w chwili końcowej i w chwili początkowej pomiaru [g]

P – powierzchnia ograniczona stalową ramą [m²]

t – czas pomiaru [h]

Skorzystano ze wzoru określającego stężenie masowo-objętościowe:

$$C_{mas} = \frac{M_{CO_2}}{V_{pow}} \quad (3)$$

gdzie:

C_{mas} – stężenie masowo-objętościowe wydzielonego CO₂ [g m⁻³]

M_{CO_2} – masa CO₂ [g]

V_{pow} – objętość powietrza w komorze (objętość komory pomniejszona o objętość miernika) [m³]

Po przekształceniu otrzymano:

$$\Delta M_{CO_2} = \Delta C_{mas} \cdot V_{pow} \quad (4)$$

gdzie:

ΔC_{mas} – różnica między stężeniem masowo-objętościowym CO₂ w chwili końcowej (10 minut od zamknięcia komory) i w chwili początkowej (5 minut od zamknięcia komory) pomiaru [g m⁻³]

Po uwzględnieniu równania (2) otrzymano:

$$R = \frac{\Delta C_{mas} \cdot V_{pow}}{P \cdot t} \quad (5)$$

W celu określenia zmiennych w powyższym wzorze należało określić różnicę stężeń masowo-objętościowych wydzielonego CO₂. Ponieważ:

$$M_{mol} = \frac{M_{CO_2}}{n_{CO_2}} \quad (6)$$

gdzie:

M_{mol} – masa molowa CO₂ [$\frac{g}{mol}$]

oraz (po uwzględnieniu różnic w jednostkach objętości molarnej i objętości):

$$V_{mol} = \frac{V_{pow}}{1000 \cdot n_{pow}} \quad (7)$$

gdzie:

V_{mol} – objętość molowa powietrza [$\frac{dm^3}{mol}$],

uwzględniając (3) wyprowadzone zostało wyrażenie:

$$C_{mas} = \frac{M_{mol} \cdot n_{CO_2}}{1000 \cdot V_{mol} \cdot n_{pow}} \quad (8)$$

Uwzględniając (8) oraz równanie Clapeyrona:

$$p \cdot V_{pow} = n_{pow} \cdot R_g \cdot T \quad (9)$$

gdzie:

p – ciśnienie [Pa]

R_g – stała gazowa [$\frac{J \cdot mol}{K}$]

T – temperatura [K]

otrzymano:

$$\frac{1000 p V_{mol}}{T} = R_g \quad (10)$$

a dla powietrza w warunkach normalnych (tj. przy ciśnieniu 101325 Pa i temperaturze 273 K):

$$\frac{1000 \cdot 101325 \cdot V_{mol\ norm}}{273} = R_g \quad (11)$$

gdzie:

$V_{mol\ norm}$ – objętość molowa powietrza w warunkach normalnych [$\frac{dm^3}{mol}$]

Na podstawie równań (10) i (11) sformułowano wzór:

$$\frac{p V_{mol}}{T} = \frac{1000 \cdot 0003250 V_{mol norm}}{273} \quad (12)$$

a po przekształceniu:

$$V_{mol} = \frac{1000 \cdot 0003250 T \cdot V_{mol norm}}{p \cdot 273} \quad (13)$$

Przekształcono formułę (8) uwzględniając równanie (12) i otrzymano wyrażenie:

$$C_{mas} = \frac{M_{mol}}{V_{mol norm}} \cdot \frac{n_{CO_2}}{n_{pow}} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{1}{1000000} \cdot \frac{p}{101325} \quad (14)$$

Ciśnienie atmosferyczne zwykle nie jest niższe, niż 990 hPa (99000 Pa) oraz nie jest wyższe, niż 1040 hPa (104000 Pa), zatem pominięcie tego czynnika nie wpłynie znacząco na wartości stężenia masowego. Otrzymujemy zatem wzór:

$$C_{mas} = \frac{M_{mol}}{V_{mol norm}} \cdot \frac{n_{CO_2}}{n_{pow}} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{1}{1000000} \quad (15)$$

Uwzględniając (1) wyprowadzono wyrażenie:

$$C_{mas} = \frac{M_{mol}}{V_{mol norm}} \cdot \frac{273}{T} \cdot \Delta X \quad (16)$$

gdzie:

ΔX – różnica między wskazaniem miernika w chwili początkowej i w chwili końcowej pomiaru

Wykorzystując wzór (2) otrzymano formułę:

$$R = \frac{M_{mol}}{V_{mol norm}} \cdot \frac{273 \cdot \Delta X \cdot V_{pow}}{T \cdot P \cdot t} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} [R] &= \left[\frac{\frac{g}{mol} \cdot K \cdot ppm \cdot m^3}{\frac{dm^3}{mol} \cdot K \cdot m^2 \cdot h} \right] = \left[\frac{\frac{g}{mol} \cdot K \cdot \frac{1}{1000000} \cdot m^3}{\frac{dm^3}{mol} \cdot K \cdot m^2 \cdot h} \right] = \\ &= \left[\frac{g}{dm^3} \cdot \frac{1}{1000000} \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \right] = \left[\frac{m_g}{m^3} \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot h} \right] = \left[\frac{m_g}{m^2 \cdot h} \right] \quad (18) \end{aligned}$$

Po uwzględnieniu objętości użytej komory oraz miernika, respirację szacuje się na podstawie równania:

$$\begin{aligned} R &= \frac{44,0095}{22,4164} \cdot \frac{27341X \cdot (0,23 \cdot 0,2330,06 - 0,000154)}{T \cdot 0,23 \cdot 0,23 \cdot 0,0833} = \\ &= 367,2075 \frac{\Delta X}{T} \quad (19) \end{aligned}$$

Pomiary wykonywano w odstępach comiesięcznych w 20 punktach badawczych zlokalizowanych na 6 polach badawczych, wybranych w oparciu o dobór najbardziej typowych siedlisk dla zachodniej części Wzniesień Łódzkich: grąd środkowoeuropejski z grabem pospolitym (*Carpinus betulus*) i dębem szypułkowym (*Quercus robur*) (w punktach badawczych: „Wiączyń 2” 51°46'14"N, 19°39'00"E i „Wiączyń 4” 51°46'22"N, 19°39'05"E); kwaśna dąbrowa z dębem szy-

pułkowym („Wiączyń 1” 51°46'10"N, 19°38'58"E, „Justynów 1” 51°43'18"N, 19°41'03"E, „Justynów 2” 51°43'12"N, 19°41'11"E, „Rokiciny 2” 51°41'01"N, 19°47'14"E); kwaśna buczyna z bukiem zwyczajnym (*Fagus sylvatica*) („Rokiciny 4” 51°41'03"N, 19°47'01"E); bór jodłowy, tzw. „czarny las” z jodłą pospolitą (*Abies alba*) („Rokiciny 3” 51°41'03"N, 19°46'53"E) i łęg olszowy z olszą czarną (*Alnus glutinosa*) („Zielona Góra 2” 51°42'10"N, 19°40'52"E).

W okolicach Łodzi powszechne są również, nasadzone kilkadziesiąt lat temu, niewielkie fragmenty lasu z sosną zwyczajną (*Pinus sylvestris*) na siedliskach roślinności potencjalnej świetlistej dąbrowy („Olechów 1” 51°44'41"N, 19°34'54"E) oraz lasu z brzozą brodawkowatą (*Betula pendula*), w którym roślinność potencjalną stanowi grąd („Olechów 4” 51°44'12"N, 19°34'57"E) (Matuszkiewicz 1995). Na jednym stanowisku zlokalizowano punkt badawczy na obszarze porolnym, gdzie w drodze naturalnej sukcesji mającej miejsce około 15 lat temu zaczęła wkraczać sosna zwyczajna oraz brzoza brodawkowata („Olechów 2” 51°44'43"N, 19°34'53"E). Obszary rębni gniazdowych reprezentują stanowiska: „Wiączyń 3” (51°46'18"N, 19°39'02"E) (po wyрубie grądu) i Rokiciny 1” (51°40'58"N, 19°47'22"E) (po wyрубie dąbrowy).

W celu zbadania, jaki jest poziom respiracji gleby w lasach w porównaniu z obszarami porośniętymi roślinnością trawiastą, przeprowadzono badania również na terenie łąki okresowo zalewanej („Zielona Góra 1” 51°42'07"N, 19°40'52"E), dawnej niszy źródłiskowej („Feliksin 3” 51°43'55"N, 19°36'32"E) i na terenie, na którym w wyniku naturalnej sukcesji wkroczyła roślinność trawiasta na dawne pole uprawne („Olechów 3” 51°44'01"N, 19°35'00"E).

Wpływ zmian rzeźby terenu na respirację analizowano w polu badawczym „Feliksin”. Punkt „Feliksin 1” (51°43'56"N, 19°36'33"E) znajduje się na szczycie sztucznie usypanego wału, które powstało podczas rozbudowy łódzkiego węzła kolejowego w czasie II wojny światowej. Punkt „Feliksin 2” (51°43'56"N, 19°36'32"E) został zlokalizowany u podnóża wzgórza, a punkt „Feliksin 3” (51°43'55"N, 19°36'32"E) znajdował się w dawnej niszy źródłiskowej. Uformowane wały zahamowało jednak odpływ powierzchniowy, skutkiem czego panuje tam stałe wysokie nasycenie gruntu wodą. W punkcie „Feliksin 4” (51°43'55"N, 19°36'31"E) nie nastąpiła ingerencja człowieka w rzeźbę terenu. Czas rozbudowy łódzkiego węzła kolejowego należy też utożsamiać z początkiem formowania się lasu na tym terenie.

Badania (poza terenami po wyрубach oraz stanowisk ze zmienioną rzeźbą w polu „Feliksin” i lasów nasadzonych w polu „Olechów”) były prowadzone na obszarach, gdzie od co najmniej XIX w. nieprzerwanie występowały formacje leśne (jako fragment dawnej Puszczy Łódzkiej). W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę gleb na stanowiskach badawczych.

W każdym z 20 punktów badawczych wykonywano pomiary na dwóch rodzajach stanowisk: ze ściółką oraz bez ściółki, aby sprawdzić, w jaki sposób ściółka wpływa na wielkość emisji CO₂ z gleby. Na stanowiskach bez ściół-

ki była ona usuwana z powierzchni gleby ok. 25 minut przed pomiarem oraz z powrotem odkładana po jego zakończeniu. Analogicznie na glebach z roślinnością trawiastą usuwano na czas pomiaru warstwę darni. Na każdym stanowisku pomiary prowadzono przez cały okres badań na tym samym kwadracie gruntu o bokach 23×23cm. Aby analizy były reprezentatywne dla danego siedliska, poszczególne miejsca wbijania komory wybierano w taki sposób, aby nie były one położone zbyt blisko drzew, ani zbyt oddalone od nich, co może być główną przyczyną zmienności przestrzennej respiracji gleby w mikroskali (Stoyan et al. 2000). Co do zasady wybierano miejsca bez roślinności niskiej. Na stanowiskach łąkowych konieczne było jednak usunięcie roślinności.

Badania terenowe trwały od grudnia 2009 r. do listopada 2011 r., a pomiary wykonywano w odstępach miesięcznych. Aby zmienność czasowa respiracji w ciągu doby nie wpływała na wyniki dotyczące zmienności przestrzennej, analizy należało wykonać w stosunkowo krótkim czasie w określonej porze dnia, dlatego na każdym stanowisku wykonywano je jednokrotnie pomiędzy godziną 9.00 a 12.00 czasu słonecznego. Badania wykonywane w tym czasie są zbliżone do średnich dobowych wartości oddychania gleby (Lohila et al. 2003; Savage, Davidson 2003). Ze względu na czasochłonność analiz (oprócz 10 minut na pomiar, należało odczekać ok. 15 minut pomiędzy pomiarami na wyrównanie stężenia CO₂ pomiędzy powietrzem atmosferycznym nad glebą i wewnątrz miernika), wykonywane były, o ile to możliwe, w 5 kolejnych dniach. Dlatego aby móc porównywać dane z różnych stanowisk, obliczono roczny poziom respiracji gleby przy pomocy modelu, który jako dane wejściowe wykorzystuje średnią temperaturę z 3 dni oraz średnią wysokość opadów z 17 dni. Model ten był wcześniej zweryfikowany przez autora dla znacznie liczniejszej serii danych (Wroński 2015):

$$R = a + e^{b+cT+dW+fW^2}$$

gdzie:

R – teoretyczna respiracja gleby w danym dniu,

T – średnia dobową temperaturę z 3 dni,

W – średnia wysokość opadów z 17 dni,

a, b, c, d, f – współczynniki empiryczne.

Zawartość węgla organicznego przy powierzchni oraz na głębokości 5 cm p.p.t. oraz w całej próchnicy określono metodą Tiurina, a dla gleb organicznych – metodą strat prażenia. Związek między oddychaniem gleby a zawartością węgla obliczono przy pomocy współczynnika korelacji liniowej Pearsona.

3. Wyniki

Wpływ roślinności na oddychanie gleby

Zaobserwowano wyższą emisję CO₂ z gleby na terenach łąkowych (ryc. 1, tab. 2). Ta prawidłowość jest widoczna szczególnie latem (ryc. 2). Zimą respiracja gleby mogła

być nawet mniejsza, niż w lasach, dlatego w bilansie dla całego roku różnice między tymi typami ekosystemów są mniejsze, ale odrębność łąk jest nadal widoczna. Szczególnie wysoką respirację zanotowano w punkcie pomiarowym „Zielona Góra 1”, na terenie okresowo zalewanej łąki.

Pod względem wielkości respiracji ekosystemy leśne można w przybliżeniu uszeregować przyjmując dla stanowisk bez ściółki kolejność: buczyna < bór sosnowy < dąbrowa < grąd na utworze pylastym < las łąkowy < las brzoźowy < bór jodłowy < grąd na utworze gliniastym; a dla stanowisk ze ściółką: bór sosnowy < dąbrowa ≈ bór jodłowy ≈ buczyna ≈ las brzoźowy ≈ grąd na utworze pylastym < las łąkowy < grąd na utworze gliniastym. Różnice między różnymi typami siedlisk na stanowiskach ze ściółką są jednak na ogół nieznaczne.

Należy jednak zaznaczyć, że powyższe zależności dotyczą wartości uśrednionych dla całego roku. Te relacje w poszczególnych miesiącach mogą być odmienne. Charakterystyczne jest to, że bardzo zbliżone wyniki uzyskano dla stanowisk reprezentujących dąbrowy, niezależnie od właściwości fizycznych i chemicznych gleb, natomiast oba stanowiska grądowe istotnie różnią się między sobą pod względem wielkości respiracji. Na niższą wielkość wydzielania CO₂ w punkcie „Wiączyń 2” (z glebą pylastą) wobec respiracji na stanowisku „Wiączyń 4” (z glebą gliniastą) wpłynęła zapewne mniejsza ilość szerokich makro porów (tab. 1) i tym samym ograniczenie możliwości przepływu CO₂ przez glebę.

Wpływ zawartości węgla na wielkość oddychania gleby

Zawartość węgla organicznego w stanowiskach badawczych przedstawiono na rycinie 1, natomiast współczynniki korelacji między respiracją gleby a zawartością węgla – w tabeli 3.

Istotną korelację między oddychaniem gleby a zawartością węgla przy powierzchni (tj. 0–1 cm p.p.t.) stwierdzono dla serii przestrzennych respiracji gleby jedynie w czterech jesiennych miesiącach: we wrześniu 2010 r. oraz wrześniu, październiku i listopadzie 2011 r. Wykazana została również znacząca zależność z zawartością węgla na głębokości 5 cm p.p.t. w miesiącach: sierpniu, październiku, listopadzie 2010 r. oraz w czerwcu 2011 r. Zatem wpływ tego parametru zaznacza się również latem. Silniejszy jest też jego związek z roczną wartością respiracji gleby. Natomiast zaskakujący jest fakt, że ilość węgla w całym poziomie próchnicznym nie wpływa na zróżnicowane przestrzenne wielkości oddychania gleby w żadnym z tych okresów.

Zbadano również powiązanie między wymienionymi czynnikami dla samych stanowisk leśnych i borowych nieprzekształconych przez człowieka (t.j. z wyłączeniem zrębów i obszarów, w których nastąpiła ingerencja w rzeźbę terenu oraz tych stanowisk, na których występują drzewostany niezgodne z siedliskiem roślinności potencjalnej). Wpływ zawartości węgla przy powierzchni na zróżnicowanie prze-

Tabela 1. Charakterystyka gleb na stanowiskach badawczych
 Table 1. Characteristics of soils in research points

| Stanowisko Site | Typ gleby Soil type | Zawartość frakcji [%] Soil separates percent | | | Grupa granulometryczna Soil texture | Porowatość Porosity [%] | Zawartość szerokich makro-porów The content of wide macro- -pores (>50 µm) [%] | Zawartość wąskich makro-porów The content of narrow macro- -pores (10–50 µm) [%] | Zawartość mezo-porów The content of mezo-pores (0,2–10 µm) [%] | Zawartość mikro-porów The content of micro-pores (<0,2 µm) [%] |
|--------------------|--|--|-------------|------------|--|-------------------------------|---|---|--|--|
| | | Piasek Sand | Pył Silt | Il Clay | | | | | | |
| Wiączyń 1 | gruntowo-glejowa gley soil | 70 | 29 | 1 | gp | 69,7 | 4,1 | 17,0 | 26,0 | 22,6 |
| Wiączyń 2 | gruntowo-glejowa gley soil | 42 | 57 | 1 | pyg | 65,1 | 5,2 | 14,6 | 40,0 | 5,3 |
| Wiączyń 3 | gruntowo-glejowa gley soil | 48 | 48 | 4 | gp | 61,5 | 3,8 | 11,3 | 34,7 | 11,7 |
| Wiączyń 4 | brunatna brown soil | 54 | 44 | 2 | gp | 64,4 | 15,4 | 16,8 | 27,9 | 4,3 |
| Ziel. Góra 1 | mulowa stagnosols | 90 | 3 | 7 | ps | 82,8 | 34,2 | 12,5 | 31,3 | 4,8 |
| Ziel. Góra 2 | torfowo-mulowa peat-marshysoil | 59 | 32 | 9 | gl | 80,5 | 7,6 | 12,1 | 22,4 | 38,4 |
| Justynów 1 | rdzawa / rusty soil | 89 | 10 | 1 | ps | 63,1 | 17,3 | 16,8 | 17,8 | 11,2 |
| Justynów 2 | rdzawa / rusty soil | 77 | 22 | 1 | pg | 57,1 | 9,9 | 18,6 | 23,4 | 5,2 |
| Rokiciny 1 | gruntowo-glejowa gley soil | 71 | 24 | 5 | gp | 60,1 | 21,2 | 10,3 | 25,5 | 3,1 |
| Rokiciny 2 | bielicowa podzols | 74 | 24 | 2 | pg | 65,8 | 16,0 | 13,9 | 33,2 | 2,7 |
| Rokiciny 3 | glejbielica gley-podzols | 77 | 18 | 5 | pg | 88,3 | 39,9 | 17,2 | 12,1 | 19,2 |
| Rokiciny 4 | gruntowo-glejowa gley soil | 82 | 16 | 2 | pg | 71,5 | 33,1 | 15,5 | 19,2 | 3,7 |
| Olechów 1 | rdzawa / rusty soil | 83 | 16 | 1 | pg | 58,8 | 19,1 | 13,8 | 19,9 | 6,1 |
| Olechów 2 | rdzawa / rusty soil | 89 | 10 | 2 | ps | 46,2 | 7,4 | 9,7 | 26,4 | 2,7 |
| Olechów 3 | gruntowo-glejowa gley soil | 82 | 17 | 1 | pg | 49,9 | 12,0 | 10,3 | 21,8 | 5,9 |
| Olechów 4 | rdzawa / rusty soil | 91 | 8 | 1 | pl | 61,8 | 15,0 | 16,5 | 25,0 | 5,3 |
| Feliksín 1 | rdzawa / rusty soil | 92 | 7 | 1 | pl | 49,9 | 17,3 | 11,2 | 16,0 | 5,4 |
| Feliksín 2 | gruntowo-glejowa gley soil | 77 | 21 | 2 | pg | 50,7 | 10,2 | 11,3 | 23,6 | 5,6 |
| Feliksín 3 | mulowa stagnosols | 63 | 29 | 8 | gl | 63,0 | 26,0 | 7,3 | 25,4 | 4,3 |
| Feliksín 4 | gruntowo-glejowa gley soil | 74 | 23 | 4 | gp | 42,6 | 3,5 | 6,5 | 25,3 | 7,3 |

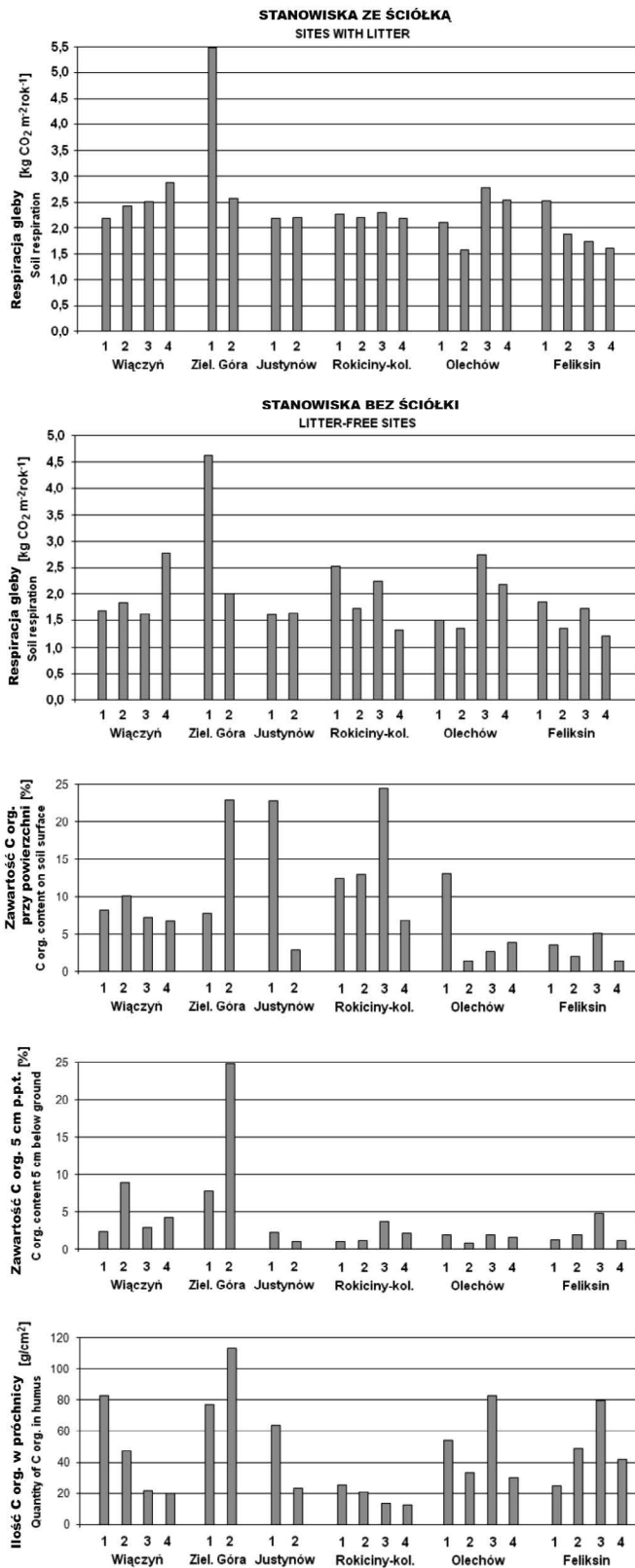
pl – piasek luźny, ps – piasek słabo gliniasty, pg – piasek gliniasty, gp – glina piaszczysta, gl – glina lekka, pyg – pył gliniasty; pl, ps – sand, pg, gp, gl – sandyloam, pyg – siltloam

Tabela 2. Wielkość rocznej emisji CO₂ z gleby na stanowiskach badawczych (w kg CO₂ m⁻² rok⁻¹)
 Table 2. Annual CO₂ emission from soil in research points (w kg CO₂ m⁻²year⁻¹)

| Siedlisko Habitat | Stanowisko Research point | Roczna respiracja gleby Annual soil respiration | | Średnia wartość rocznej respiracji gleby przy danym typie roślinności The average soil respiration for type of plants | |
|--|------------------------------|--|---|--|---|
| | | stanowiska bez ściółki research point litter-free | stanowiska ze ściółką research point with litter | stanowiska bez ściółki research point litter-free | stanowiska ze ściółką research point with litter |
| Buczyna kwaśna Acidophilous beech forest | Rokiciny 4 | 1,32 | 2,18 | 1,32 | 2,18 |
| Dąbrowa kwaśna Acidophilous oak wood | Wiączyń 1 | 1,69 | 2,19 | 1,67 | 2,19 |
| | Justynów 1 | 1,61 | 2,19 | | |
| | Justynów 2 | 1,65 | 2,21 | | |
| | Rokiciny 2 | 1,73 | 2,19 | | |
| Grąd środkowoeuropejski Medio-European hornbeam-oak forest | Wiączyń 2 | 1,84 | 2,42 | 2,31 | 2,65 |
| | Wiączyń 4 | 2,78 | 2,88 | | |
| Wyżyny bór jodłowy Colline fir forest | Rokiciny 3 | 2,24 | 2,30 | 2,24 | 2,30 |
| Lęg olszowy Alluvial forest with alder | Zielona Góra 2 | 2,01 | 2,57 | 2,01 | 2,57 |
| Bór sosnowy suchy Dry pine forest | Olechów 1 | 1,51 | 2,11 | 1,51 | 2,11 |
| Las sosnowo-brzozowy Pine and birch forest | Olechów 2 | 1,35 | 1,57 | 1,35 | 1,57 |
| Las brzozowy Birch forest | Olechów 4 | 2,19 | 2,54 | 2,19 | 2,54 |
| Łąki i tereny z roślinnością trawiastą Meadows and areas with herbaceous plants | Feliksín 3 | 1,74 | 1,74 | 3,04 | 3,33 |
| | Olechów 3 | 2,74 | 2,77 | | |
| | Zielona Góra 1 | 4,63 | 5,49 | | |
| Teren po wyrębie grądu Felling area after hornbeam-oak forest | Wiączyń 3 | 1,62 | 2,50 | 2,08 | 2,38 |
| Teren po wyrębie dąbrowy Felling area after oak forest | Rokiciny 1 | 2,53 | 2,26 | | |
| Drzewostan z klonem zw., klonem jaworem i wiązem Maple-sycamore maple-elm forest | Feliksín 1 | 1,85 | 2,52 | 1,47 | 2,00 |
| | Feliksín 2 | 1,36 | 1,87 | | |
| | Feliksín 4 | 1,20 | 1,60 | | |

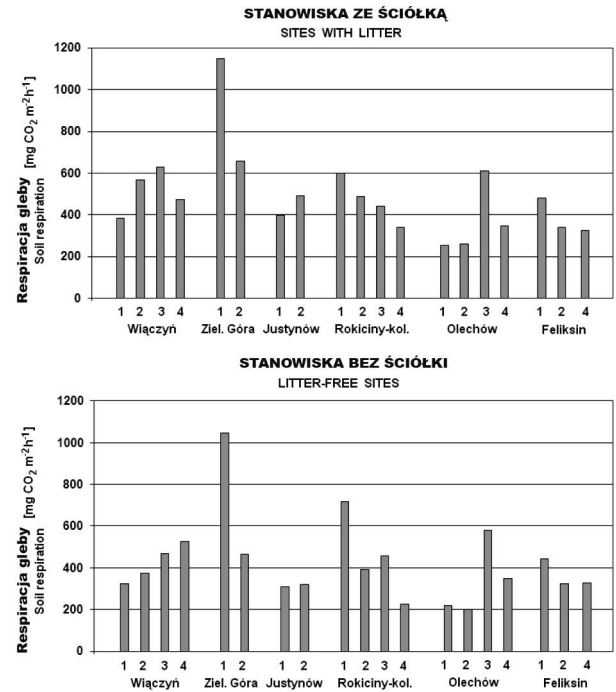
strzenne oddychania gleby w obrębie tych stanowisk jest prawie niezauważalny, natomiast silnie zaznacza się wpływ zawartości węgla 5 cm p.p.t. (tab. 4). Współczynnik korelacji z respiracją gleby na stanowiskach bez ściółki wynosi 0,82, a na stanowiskach ze ściółką: 0,75. Oprócz miesiący letnich

i jesiennych, zaznaczył się on również wiosną 2010 r., chociaż podobnej zależności nie zauważono w kolejnym roku. Zastanawiająca jest silna ujemna zależność, jaka wystąpiła w marcu 2010 r., mogąca być wynikiem niejednakowego topnienia śniegu na różnych stanowiskach w tym miesiącu.



Rycina 1. Roczna respiracja gleby na stanowiskach badawczych, zawartość węgla organicznego przy powierzchni, 5 cm p.p.t. oraz ilość węgla organicznego w próchnicy

Figure 1. Annual soil respiration on research points, organic carbon content on research points on soil surface, 5 cm below ground and quantity of organic carbon in humus



Rycina 2. Wielkość emisji CO₂ z gleby na początku lipca 2010 r.
Figure 2. CO₂ emissions from soils in the beginning of July 2010

Wpływ ingerencji człowieka w drzewostan na respirację gleby

Podczas badań zaobserwowano relatywnie niską emisję CO₂ z gleby na terenie nasadzonego drzewostanu sosnowego („Olechów 1”), natomiast wysoką na terenie lasu brzoźowego („Olechów 4”). Te wartości nie odbiegają jednak znacząco od poziomu respiracji na stanowiskach w dąbrowach oraz grądach, stanowiących roślinność potencjalną na tych terenach. Bardzo niskie wartości występują na terenie porolnym, gdzie w wyniku naturalnej sukcesji wkroczyła sosna oraz brzoza („Olechów 2”).

Wpływ ingerencji w rzeźbę terenu na oddychanie gleby

Badania wykazały możliwy wpływ przemian rzeźby terenu na respirację gleby. Na terenie pola badawczego „Feliksin”, zanotowano wyższe wartości na stanowiskach, na których nastąpiła ingerencja w rzeźbę terenu („Feliksin 1” i „2”), niż na stanowisku nie zmienionym („Feliksin 4”). Najwyższa respiracja występuje na szczycie sztucznie usypanego wzgórza („Feliksin 1”).

4. Dyskusja

Wpływ roślinności na oddychanie gleby

Przeprowadzone badania potwierdzają zaobserwowaną wielokrotnie wcześniej wyższą respirację gleby na łąkach niż w lasach (Reich, Tufekcioglu 2000; Papińska et al. 2010). Reich i Tufekcioglu (2000) oceniali, że łąki mają o ok. 20%

Tabela 3. Wartości współczynników korelacji liniowej między respiracją gleby a zawartością węgla w glebie dla wszystkich stanowisk badawczych

Table 3. Linear correlation coefficients between soil respiration and organic carbon content in soil for all research points

| Rok Year | Miesiąc Month | Zawartość C org. przy pow.(0–1 cm p.p.t) Organic C content on soil surface (0–1 cm below ground) [%] | | Zawartość C org. 5 cm p.p.t. Organic C content 5 cm below ground [%] | | Ilość C org. w próchnicy Quantity of organic C in humus [g/cm ²] | |
|---|------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter |
| 2009 | XII | 0,28 | 0,27 | 0,29 | 0,43 | -0,25 | -0,12 |
| 2010 | I | 0,34 | 0,39 | 0,04 | -0,06 | -0,14 | -0,16 |
| | II | -0,33 | -0,42 | -0,14 | -0,11 | -0,20 | -0,37 |
| | III | -0,01 | 0,16 | -0,17 | -0,26 | -0,15 | -0,05 |
| | IV | 0,18 | 0,17 | 0,33 | 0,43 | -0,03 | 0,06 |
| | V | -0,06 | -0,20 | 0,33 | 0,37 | 0,18 | 0,02 |
| | VI | 0,06 | 0,34 | 0,21 | 0,11 | -0,10 | 0,13 |
| | VII | 0,03 | 0,08 | 0,32 | 0,28 | 0,06 | 0,14 |
| | VIII | 0,26 | 0,39 | 0,36 | 0,57 | -0,03 | -0,09 |
| | IX | 0,52 | 0,41 | 0,04 | 0,01 | 0,12 | 0,04 |
| | X | 0,14 | 0,27 | 0,53 | 0,32 | 0,16 | 0,06 |
| | XI | 0,25 | 0,28 | 0,53 | 0,48 | 0,06 | 0,45 |
| | XII | 0,10 | 0,29 | 0,31 | 0,27 | -0,22 | 0,07 |
| 2011 | I | 0,45 | 0,20 | 0,29 | 0,38 | 0,29 | 0,07 |
| | II | 0,12 | 0,02 | 0,38 | 0,44 | 0,03 | -0,18 |
| | III | 0,03 | -0,12 | 0,01 | -0,02 | 0,37 | 0,45 |
| | IV | 0,28 | 0,27 | 0,15 | 0,20 | -0,40 | -0,42 |
| | V | 0,23 | 0,07 | 0,07 | 0,11 | -0,11 | 0,40 |
| | VI | 0,22 | 0,13 | 0,57 | 0,50 | 0,35 | -0,01 |
| | VII | -0,06 | -0,04 | -0,01 | -0,04 | 0,08 | 0,38 |
| | VIII | 0,09 | 0,00 | 0,18 | 0,12 | -0,18 | -0,32 |
| | IX | 0,52 | 0,41 | 0,30 | 0,28 | 0,07 | 0,08 |
| | X | 0,73 | 0,50 | 0,43 | 0,03 | 0,17 | 0,09 |
| | XI | 0,52 | 0,45 | 0,34 | 0,33 | -0,02 | 0,34 |
| Respiracja roczna Annual respiration | | 0,18 | 0,19 | 0,41 | 0,52 | 0,04 | 0,13 |

Wartości istotne statystycznie (przy poziomie istotności $\alpha=0,05$) zaznaczono pogrubioną czcionką
 Statistically significant values (at significance level $\alpha=0,05$) are indicated in bold

Tabela 4. Wartości współczynników korelacji liniowej między respiracją gleby a zawartością węgla w glebie dla stanowisk leśnych i borowych nieprzekształconych przez człowieka (t.j. bez zrębów, obszarów, w których nastąpiła ingerencja w rzeźbę terenu oraz tych stanowisk, na których występują drzewostany niezgodne z siedliskiem roślinności potencjalnej)

Table 4. Linear correlation coefficients between soil respiration and organic carbon content in soil for forest sites unchanged by human (i.e. without felling areas, without areas in which relief has changed and without stands in which there was planting trees on habitats wrong for them)

| Rok Year | Miesiąc Month | Zawartość C org. przy pow. Organic C content on soil surface. [%] | | Zawartość C org. 5 cm p.p.t. Organic C content 5 cm below ground [%] | | Ilość C org. w próchnicy Quantity of organic C in humus [g/cm ²] | |
|---|------------------|---|---------------------------|--|---------------------------|--|---------------------------|
| | | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter | bez ściółki litter-free | ze ściółką with litter |
| 2009 | XII | -0,02 | -0,21 | 0,81 | 0,76 | -0,26 | -0,06 |
| 2010 | I | -0,08 | -0,07 | -0,38 | -0,64 | -0,48 | -0,35 |
| | II | -0,36 | -0,48 | -0,17 | 0,05 | -0,42 | -0,43 |
| | III | -0,02 | -0,28 | -0,68 | -0,88 | -0,01 | -0,04 |
| | IV | 0,18 | 0,32 | 0,74 | 0,73 | -0,42 | -0,18 |
| | V | 0,03 | -0,23 | 0,83 | 0,75 | -0,31 | -0,28 |
| | VI | -0,04 | 0,37 | 0,53 | 0,46 | -0,35 | 0,15 |
| | VII | 0,04 | -0,03 | 0,74 | 0,35 | 0,04 | 0,31 |
| | VIII | 0,28 | 0,37 | 0,81 | 0,54 | -0,33 | -0,23 |
| | IX | 0,44 | 0,40 | 0,32 | -0,02 | 0,31 | 0,31 |
| | X | 0,02 | -0,08 | 0,81 | 0,72 | -0,05 | 0,00 |
| | XI | 0,05 | -0,12 | 0,88 | 0,30 | 0,15 | 0,60 |
| | XII | -0,28 | 0,13 | 0,52 | 0,04 | -0,54 | -0,20 |
| 2011 | I | 0,25 | -0,40 | -0,02 | 0,05 | 0,23 | -0,16 |
| | II | -0,22 | -0,47 | 0,36 | 0,32 | 0,28 | -0,02 |
| | III | 0,15 | 0,06 | -0,03 | -0,04 | 0,49 | 0,58 |
| | IV | 0,23 | 0,26 | 0,44 | 0,27 | -0,60 | -0,51 |
| | V | 0,61 | 0,27 | 0,64 | 0,46 | 0,04 | 0,48 |
| | VI | 0,30 | 0,21 | 0,78 | 0,69 | 0,12 | -0,38 |
| | VII | 0,25 | 0,25 | 0,72 | 0,06 | 0,12 | 0,43 |
| | VIII | 0,11 | 0,05 | 0,43 | 0,71 | -0,47 | -0,28 |
| | IX | 0,48 | 0,36 | 0,28 | -0,06 | -0,02 | 0,13 |
| | X | 0,69 | 0,40 | 0,42 | 0,00 | 0,03 | 0,17 |
| | XI | 0,20 | 0,05 | 0,71 | 0,29 | 0,00 | 0,32 |
| Respiracja roczna Annual respiration | | 0,15 | -0,01 | 0,82 | 0,75 | -0,10 | 0,08 |

Wartości istotne statystycznie (przy poziomie istotności $\alpha=0,05$) zaznaczono pogrubioną czcionką

Statistically significant values (at significance level $\alpha=0.05$) are indicated in bold

wyższe tempo oddychania niż lasy. Również na terenie Załęczańskiego Parku Krajobrazowego respiracja z gleby bez ściółki z łąki wynosiła o 20% więcej niż w pobliskim lesie łęgowym, a z gleby za ściółką – o 3% więcej (Papińska et al. 2010). W zachodniej części Wzniesień Łódzkich na wszystkich stanowiskach łąkowych zauważono wyższą respirację niż w sąsiednich punktach pomiarowych usytuowanych w lasach. Jednak różnice między lasami a łąkami są większe. Na stanowiskach ze ściółką respiracja na terenach łąk jest o 8–14% wyższa niż w lasach, natomiast na stanowiskach bez ściółki o 25–45%.

Szczególnie wysoką respirację zanotowano na terenie okresowo zalewanej łąki łęgowej (w punkcie pomiarowym „Zielona Góra 1”). Prawdopodobnie otrzymane wartości są jednak zawyżone, gdyż bilans roczny obliczono wyłącznie na podstawie wartości z okresów, kiedy poziom wód gruntowych znajdował się poniżej powierzchni terenu. Badania Chimnera i Coopera (2003) oraz Turbiaka i Miatkowskiego (2010) wskazują, że oddychanie gleby może być nawet dwukrotnie mniejsze w sytuacji, gdy występuje nadmierne nasycenie gruntu wodą.

Na duże tempo respiracji na terenach łąk może wpływać duża ilość biomasy wyprodukowanej przez roślinność trawiastą, która następnie trafia do gleby, gdzie ulega rozkładowi. Dodatkowo do wyższego wydzielania CO₂ przyczynia się duża ilość korzeni oraz wyższe temperatury na odkrytym terenie (Tufekcioglu, Kucuk 2004). Znaczące wydzielanie zaobserwowano także na stanowisku, w którym występuje roślinność trawiasta mimo nieznacznej zawartości węgla w glebie („Olechów 3”). Taki stan rzeczy mogą jednak wyjaśniać wyniki badań Reichsteina et al. (2003), według których na oddychanie gleby bardziej wpływa produktywność ekosystemu, niż zapas węgla w glebie.

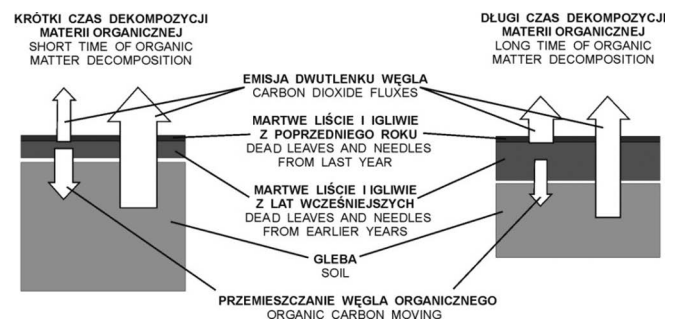
Otrzymane wyniki świadczą również o możliwym wpływie rodzaju drzewostanu na wielkość emisji CO₂ z gleby. Drzewa, poprzez dostarczanie do gleby materiału organicznego w postaci martwych liści i igieł, kształtują warunki glebowe. Powstaje jednak pytanie, w jaki sposób różnice w gatunkach drzew wpływają na zróżnicowanie przestrzenne oddychania gleby. Wcześniejsze badania, sugerowały, że wydzielanie CO₂ jest wyższe w lasach liściastych, niż w iglastych (Longdoz et al. 2000). Otrzymane wyniki nie do końca to potwierdzają. Zaobserwowano wprawdzie niską respirację w borze sosnowym, ale jeszcze niższa występuje przy drzewostanie bukowym (dla stanowisk bez ściółki). Z kolei tempo oddychania gleby w borze jodłowym jest wyższe niż w większości stanowisk z drzewami liściastymi. Przeprowadzone badania mogą wskazywać na znaczną rolę tempa dekompozycji materii organicznej w kształtowaniu różnic w wielkości wydzielania CO₂ z gleby pomiędzy różnymi ekosystemami. 95-procentowy czas rozkładu liści buka (znany z literatury) trwa 37,45 lat, igliwia sosny – 14,29 lat, liści dębu – 4,76 lat, natomiast liści grabu – 2,83 lat (Weiner 2006). Jest zatem widoczne, że właśnie ten czynnik mógł wpłynąć na niewielką respirację gleby bez ściółki w lesie bukowym, większą w lesie sosnowym i dąbrowie oraz bardzo wysoką w grądzie.

Współczynnik korelacji między średnim czasem rozkładu liści i igliwia w wymienionych siedliskach oraz średnią respiracją gleby na stanowiskach bez ściółki jest ujemny i wynosi -0,74, chociaż, ze względu na małą liczebność zmiennych, nie stwierdzono istotności statystycznej tego wyniku). Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że tempo dekompozycji nawet na niewielkich obszarach jest bardzo zróżnicowane (Niewinna 2010), dlatego potencjalny związek między respiracją gleby a tempem dekompozycji powinien zostać przeanalizowany w przyszłych badaniach

Jak to pokazują wyniki, wielkość respiracji z gleby ze ściółką jest jednak bardziej ujednolicona, niż z gleby bez ściółki. Słabiej zaznacza się zatem wpływ rodzaju siedliska na wielkość respiracji gleby. Można to tłumaczyć zapewne tym, że na terenach porośniętych lasem o powolnym tempie rozkładu liści (np. w lesie bukowym) lub igliwia gleba jest powoli wzbogacana w węgiel organiczny i więcej materii organicznej znajduje się tam w samej ściółce. Respiracja z gleby ze ściółką jest tam zatem znacznie większa, niż z gleby pozbawionej ściółki. Natomiast na terenie lasów o szybkim tempie rozkładu liści i igliwia (np. w grądzie), CO₂ jest szybciej uwalniany właśnie z tych liści i igieł, ale również ulegają one szybszemu rozdrobnieniu i gleba jest bardziej wzbogacana w węgiel. Większa ilość węgla w glebie powoduje zatem, że różnice między respiracją z gleby ze ściółką i z gleby bez ściółki są tam mniejsze, niż na stanowiskach o powolnym czasie rozkładu materii organicznej. Ilustruje to schematyczna rycina 3. Większe ujednolicenie respiracji gleby na stanowiskach ze ściółką jest efektem tego, że uwzględnia ona uwalnianie węgla zawartego zarówno w ściółce, jak i w samej glebie.

Przyjmując przedstawiony powyżej schemat za właściwy, powinny występować łącznie następujące zależności:

- ujemna korelacja między respiracją gleby (w stanowiskach bez ściółki) a czasem dekompozycji materii organicznej;



Rycina 3. Schematyczny rysunek obrazujący strumienie węgla przy krótkim i długim czasie dekompozycji materii organicznej. Wielkość prostokątów oznacza ilość węgla. Szerokość strzałek oznacza wielkość emisji CO₂ oraz wielkość przemieszczania węgla organicznego.

Figure 3. Schematic figure illustrating carbon streams in the short time and the long time of organic matter decomposition. The size of rectangles is the quantity of carbon. The width of arrows means the level of CO₂ emissions and organic carbon moving.

- duże ujednoczenie respiracji gleby w stanowiskach ze ściółką;
- dodatnia korelacja między respiracją gleby (w stanowiskach bez ściółki) a zawartością węgla w glebie (zwłaszcza na pewnej głębokości);
- ujemna korelacja między czasem dekompozycji materii organicznej a zawartością węgla w glebie.

O występowaniu pierwszych dwóch z wymienionych zależności już wspomniano. Siła korelacji pomiędzy zawartością węgla 5 cm p.p.t. w nieprzekształconych siedliskach a respiracją odniesioną do całego roku jest bardzo wysoka i wynosi 0,82 (tab. 4). O prawdziwości schematu może świadczyć również ujemna zależność między średnim czasem rozkładu liści i igliwia (Weiner 2006) oraz zawartością węgla 5 cm p.p.t. (-0,44). Wskazane byłoby jednak zweryfikowanie tego modelu w osobnych badaniach.

Wpływ zawartości węgla na wielkość oddychania gleby

Szereg badań wskazuje na związek między oddychaniem gleby a zawartością węgla w glebie. Tufekcioglu et al. (2001) stwierdzili silną korelację między tymi wielkościami (0,75) na terenach rolnych w stanie Iowa, a Franzluebbbers et al. (2002) dla obszarów prerii w stanie Kansas w USA (0,84). Zbliżone wartości korelacji (0,70) uzyskali Harguchi et al. (2002), prowadząc badania na torfowiskach w środkowej Japonii. Gough i Seiler (2004) stwierdzili istotną, choć niewielką korelację (0,16) między zawartością węgla a respiracją gleby na terenie lasu sosnowego w Południowej Karolinie w USA. Wielkość emisji CO₂ z gleb laterytowych w okolicach Sao Paulo w Brazylii koreluje na poziomie 0,30–0,47 z zawartością węgla w glebie (La Scala et al. 2000). Rodeghiero i Cescatti (2005) zaobserwowali dodatnią korelację liniową między zawartością węgla w warstwie 0–30 cm p.p.t. a średnią roczną respiracją gleby i korelację wykładniczą z respiracją gleby odniesioną do temperatury 10°C. Znacznie mniej badań wskazuje na brak wpływu zawartości węgla w glebie na emisję CO₂ (Francez et al. 2000, Reichstein et al. 2003).

Dlatego zaskakującym rezultatem badań jest to, że istotnej korelacji z zawartością węgla nie zaobserwowano w całym roku, a jedynie w kilku miesiącach. Można wyróżnić dwa okresy, kiedy wpływ zawartości węgla na respirację zaznacza się silniej: jesień oraz lato. Różną czułość respiracji od zawartości materii organicznej zauważyli już Moncrieff i Fang (1999) dla sosnowej plantacji na Florydzie. Największą reakcję na 5-procentowy wzrost ilości materii organicznej zaobserwowali oni latem, co tłumaczyli umiarkowaną wilgotnością gleby oraz wysoką temperaturą. W środkowej Polsce silniej zaznacza się jednak związek między tymi zmiennymi jesienią. Może mieć to związek z opadem liści i igliwia w tym okresie i rozpoczęciem procesu ich rozkładu.

Przeprowadzone badania wskazują również na to, że różnice przestrzenne oddychania gleby (w odniesieniu zarówno do wartości rocznych, jak i w poszczególnych miesiącach) lepiej odzwierciedla zawartość węgla 5 cm p.p.t. niż zawar-

tość węgla przy samej powierzchni, o czym świadczą wyniki dla nieprzekształconych stanowisk leśnych. Z pozoru może dziwić fakt słabej korelacji między emisją CO₂ z gleby a zawartością węgla przy samej powierzchni dla tych stanowisk, ale należy wziąć pod uwagę, że proces oddychania gleby obejmuje również CO₂ uwalniany z głębszych poziomów gleby, a rozłożenie w przestrzeni zawartości węgla przy powierzchni może być odmienne niż w przypadku pozostałych głębokości w glebie. Jednak ingerencja człowieka w rzeźbę terenu, drzewostan lub glebę poprzez wcześniejszą uprawę rolną, może zaburzać silną korelację z zawartością węgla 5 cm p.p.t. (o czym świadczy porównanie tabel 4 i 3). Mocniej zaznacza się wówczas wpływ innych czynników. Dokładniejsza analiza wpływu człowieka na proces oddychania gleby zostanie przedstawiona w następnych podrozdziałach.

Zaskakującym rezultatem badań jest fakt, że ilość węgla w całym poziomie próchnicznym jest bardzo słabo skorelowana z respiracją gleby. Zdaniem Rodeghiero i Cascattiego (2005) błędem jest badanie zależności między respiracją a udziałem procentowym węgla na danej głębokości, a nie ilością węgla wyrażoną w jednostce masy na jednostkę powierzchni. Jednak na analizowanym w tej pracy obszarze nie wykryto istotnego powiązania między zawartością węgla w całym poziomie próchnicznym a oddychaniem gleby.

Wpływ ingerencji człowieka w drzewostan na respirację gleby

Bardzo częstą sytuacją w polskich lasach jest sadzenie drzew na niewłaściwych dla nich siedliskach. Przeprowadzone badania świadczą o tym, że na tych obszarach, tak samo, jak w przypadku lasów, w których nie nastąpiła ingerencja człowieka w drzewostan, na intensywność respiracji gleby wpływa tempo dekompozycji liści i igliwia. Wyższą respirację zaobserwowano w lesie brzoźowym, niż sosnowym, gdzie półroczna wielkość dekompozycji wynosi odpowiednio 29–34% i 21–25% (Horodecki et al. 2015). Tych różnic nie można wytłumaczyć ani różnicami we właściwościach fizycznych gleby, które są na obu stanowiskach bardzo zbliżone (tab. 1), ani różnicami w zawartości węgla (ryc. 1).

Ilość czynników wpływających na wielkość emisji CO₂ z gleby na obszarach, w których zmieniono drzewostan jest jednak większa. Najważniejszym z nich jest historia użytkowania, chociaż jej wpływ zaznacza się z różnym nasileniem, w zależności od czasu, w którym nastąpiła ostatnia zmiana użytkowania. Najczęściej niewielkie monokulturowe lasy porastają obszary dawnych pól uprawnych. Intensywna gospodarka rolna zubaża glebę w szereg pierwiastków, w tym w węgiel, co skutkuje oczywiście niewielką emisją CO₂. Szereg badań wskazuje na bardzo niską respirację na ugorach (Frank et al. 2006; Trümper, Klik 2008). Zaobserwowano to również w punkcie badawczym „Olechów 2”, gdzie na skutek naturalnej sukcesji wkroczył drzewostan sosnowo-brzoźowy. Przeprowadzone badania świadczą, że po około 15 latach od wkroczenia lasu respiracja gleby jest nadal bar-

dzo niska. Na terenach starszych lasów pochodzących z nasadzeń (na stanowisku „Olechów 1” z nasadzeniami sosny oraz „Olechów 4” z nasadzeniami brzozy) wpływ zubożenia gleby w węgiel jest już jednak słabo widoczny. Respiracja gleby w tych punktach badawczych jest zbliżona do respiracji występującej w dąbrowach i łąkach, które stanowią odpowiednio naturalne siedliska dla tych obszarów.

Wpływ wyrębów na proces oddychania gleby w prezentowanych polach badawczych był już przez autora analizowany (Wroński 2014). Jak wskazuje szereg wcześniejszych badań (Concilio 2005), na obszarach młodych zrębów, na skutek zabiegów uprawowych w postaci wykonania bruzd przy sadzeniu nowych drzew (Rykowski 1999), wzrostu temperatury na otwartym terenie (Houghton, Hackler 1999; Schlesinger, Andrews 2000; Hirsh et al. 2004) oraz zwiększenia dostępności składników odżywczych (Tang et al. 2005), następuje zwiększone uwalnianie węgla. Przykładowo, na obszarze młodego rębku po usunięciu dąbrowy („Rokiciny 1”), oddychanie gleby było o 46% wyższe, niż na terenie z drzewostanem („Rokiciny 2”). W miarę, jak ilość węgla w glebie ulega zmniejszeniu, następuje jednak ograniczenie respiracji. Dlatego na obszarach starych zrębów emisja CO₂ z gleby jest mniejsza, niż na terenach otaczających.

Wpływ ingerencji w rzeźbę terenu na oddychanie gleby

Autor analizował już wpływ zmian rzeźby na proces respiracji gleby w polu badawczym „Feliksin” (Wroński 2014), ale dysponował wówczas znacznie krótszą serią danych oraz oszacował wielkość rocznej emisji CO₂ z gleby na podstawie innego, mniej dokładnego modelu. Nie dysponował również niektórymi pomiarami chemicznych właściwości gleby. Dlatego poniższa interpretacja została zmieniona wobec tej podanej we wspomnianym artykule.

Przeprowadzone badania świadczą o tym, że ingerencja w rzeźbę terenu może istotnie wpływać na respirację gleby. Emisja CO₂ na szczycie sztucznie usypanego wzgórza („Feliksin 1”) jest wyraźnie wyższa, niż na stanowisku nie zmienionym („Feliksin 4”). Podobny efekt, choć słabszy, jest widoczny u podnóża tego wzgórza („Feliksin 2”). Przyczyny nie należy wiązać z większą ilością materii organicznej na wzgórzu, gdyż tej materii jest mniej w całym profilu glebowym, na tamtym stanowisku. Przyczyną jest raczej lepsze nasłonecznienie oraz korzystniejsze warunki do wzrostu koron drzew, a więc i większa ilość liści, które są źródłem materii organicznej w glebie po ich opadnięciu jesienią. O słuszności takiego wyjaśnienia świadczy rozkład węgla organicznego w profilu glebowym. Chociaż na głębokości 5 cm p.p.t. ilość węgla na szczycie wzgórza jest najmniejsza, niższa jest u podnóża wzgórza, a najwyższa jest na terenie niezmienionym, to sytuacja jest odwrócona w odniesieniu do ilości węgla przy samej powierzchni. Wzgórze zostało usypane z materiału znacznie lżejszego niż ten, który występował naturalnie na tym terenie i zawierającego znacznie mniej węgla organicznego. Zwiększenie ilości węgla przy samej powierzchni pochodzi zatem z rozpoczętej około 70

lat temu akumulacji tego pierwiastka w glebie. Duży rozrost koron drzew na szczycie wzgórza zapewnił dużą dawkę węgla dostarczanego do inicjalnej gleby, która zaczęła się tworzyć na wzgórzu.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły najwyższą respirację gleby na stanowiskach łąkowych. W obrębie lasów można zauważyć występowanie pewnego schematu: w ekosystemach z szybkim tempem dekompozycji materii organicznej występuje większe dostarczanie węgla do gleby i obserwowana jest większa emisja CO₂ z gleby bez ściółki (w stanowiskach ze ściółką oddychanie gleby jest bardziej ujednolicone). Spośród wskaźników uwzględniających ilość węgla w glebie najsilniejszy związek z respiracją wykazuje jednak zawartość węgla organicznego 5 cm p.p.t., a nie całkowita ilość węgla w próchnicy. Analizy wykazały również, że wpływ zawartości węgla 5 cm p.p.t. zaznacza się w ciągu roku ze zmiennym natężeniem i najsilniejszy jest latem oraz jesienią. Człowiek może jednak modyfikować powyżej zarysowany ogólny schemat. Historia użytkowania terenu może się zaznaczyć poprzez zmniejszenie zawartości węgla w glebie i tym samym osłabienie siły zależności między oddychaniem gleby a zawartością węgla 5 cm p.p.t. Silniejsze będzie wówczas oddziaływanie tempa dekompozycji liści i igliwia drzew nasadzonych na terenach porolnych. Ingerencja w rzeźbę terenu może być determinantą respiracji gleby poprzez zmianę intensywności nasłonecznienia. Na wielkość oddychania gleby na terenach po wyrębach wpływa natomiast wiek zrębku.

Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

Podziękowania i źródła finansowania

Badania zostały sfinansowane przez Autora. Autor dziękuje Katedrze Geografii Fizycznej Uniwersytetu Łódzkiego za bezpłatne udostępnienie miernika stężenia CO₂.

Prezentowany artykuł przedstawia część wyników nieopublikowanej pracy doktorskiej: Wroński K. 2013. Wpływ warunków środowiskowych na emisję CO₂ z gleb leśnych i łąkowych na obszarze środkowej Polski, Uniwersytet Łódzki, 143s.

Literatura

- Borken W., Xu Y.-J., Brumme R., Lamersdorf N. 1999. A climate change scenario for carbon dioxide and dissolved organic carbon fluxes from a temperate forest soil: drought and rewetting effects. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1848–1855. DOI 10.2136/sssaj1999.6361848x.
- Chimner R.A., Cooper D.J. 2003. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry* 35: 345–351. DOI 10.1016/S0038-0717(02)00284-5.

- Concilio A. 2005. Interannual variability in soil respiration and response to experimental burning and thinning in an old growth mixed-conifer forest. The University of Toledo, 69 s.
- D'Angelo E.M., Reddy K.R. 1999. Regulators of heterotrophic microbial potentials in wetland soils. *Soil Biology and Biochemistry* 31: 815–830.
- Francez A.-J., Gogo S., Josselin N. 2000. Distribution of potential CO₂ and CH₄ productions, denitrification and microbial biomass C and N in the profile of a restored peatland in Brittany (France). *European Journal of Soil Biology* 36: 161–168.
- Frank A.B., Liebig M.A., Tanaka D.L. 2006. Management effects on soil CO₂ efflux in northern semiarid grassland and cropland. *Soil and Tillage Research* 89: 78–85. DOI 10.1016/j.still.2005.06.009.
- Franzluebbers K., Franzluebbers A.J., Jawson M.D. 2002. Environmental controls on soil and whole-ecosystem respiration from a tallgrass prairie. *Soil Science Society of America Journal* 66: 254–262.
- Gough C.M., Seiler J.R. 2004. The influence of environmental, soil carbon, root and stand characteristics on soil CO₂ efflux in loblolly pine (*Pinustaeda* L.) plantations located on the South Carolina Coastal Plain. *Forest Ecology and Management* 191: 353–363. DOI 10.1016/j.foreco.2004.01.011.
- Haraguchi A., Kojima H., Hasegawa C., Takahashi Y., Iyobe T. 2002. Decomposition of organic matter in peat soil in a minerotrophic mire. *European Journal of Soil Biology* 38: 89–95. DOI 10.1016/S1164-5563(01)01112-8.
- Hirsch A.I., Little W.S., Houghton R.A., Scott N.A., White J.D. 2004. The net carbon flux due to deforestation and forest regrowth in the Brazilian Amazon: analysis using a process-based model. *Global Change Biology* 10: 908–924. DOI 10.1111/j.1529-8817.2003.00765.x.
- Horodecki P., Nowiński M., Rawlik K., Jagodziński A.M. 2015. Rozkład liści drzew w początkowych etapach dekompozycji w drzewostanach sosnowych i brzoźowych rosnących na rekultywowanym zwałowisku pokopanym i terenach leśnych. *Studia i Materiały CEPL w Rogowie* R. 17, 42(1): 262–278.
- Houghton R.A., Hackler J.L. 1999. Emissions of carbon from forestry and land-use change in tropical Asia. *Global Change Biology* 5: 481–492. DOI 10.1046/j.1365-2486.1999.00244.x.
- Kutsch W.L., Staack A., Wötzel J., Middelhoff U., Kappen L. 2001. Field measurements of root respiration and total soil respiration in an alder forest. *New Phytologist* 150: 157–168. DOI 10.1046/j.1469-8137.2001.00071.x.
- La Scala N., Marques J., Pereira G.T. Corá J.E. 2000. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1469–1473.
- Lohila A., Aurela M., Regina K., Laurila T. 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil* 251: 303–317. DOI 10.1023/A:1023004205844.
- Longdoz B., Yernaux M., Aubinet M. 2000. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbance, spatial variability and seasonal evolution. *Global Change Biology* 6: 907–917. DOI 10.1046/j.1365-2486.2000.00369.x.
- Matuszkiewicz J.M. 1995. Potencjalna roślinność naturalna Polski. Mapa przeglądowa 1:300 000. Arkusz 8: Wzniesienia Południowomazowieckie i Wyżyna Środkowomazowiecka. Polska Akademia Nauk. Warszawa
- Moncrieff J.B., Fang C. 1999. A model for soil CO₂ production and transport 2: Application to a Florida *Pinu selliotte* plantation. *Agricultural and Forest Meteorology* 95: 237–256. DOI 10.1016/S0168-1923(99)00035-0.
- Niewinna M. 2010. Wielkość opadu i tempo rozkładu ściółki w wybranych drzewostanach Bieszczadów. *Roczniki Bieszczadzkie* 18: 59–73.
- Ohashi M., Gyokusen K., Saito A. 1999. Measurement of carbon dioxide evolution from a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) forest floor using an open-flow chamber method. *Forest Ecology and Management* 123: 105–114. DOI 10.1016/S0378-1127(99)00020-1.
- 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. ISSN 1230-7831-08-7.
- Raich J.W., Tufekcioglu A. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry* 48: 71–90. DOI 10.1023/A:1006112000616.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Cheng Y., Grunzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta F., Oechel W., Ourcival J.-M., Pereira J.S., Peressotti A., Ponti F., Qi Y., Rambal S., Rayment M., Romanya J., Rossi F., Tedeschi V., Tirone G., Xu M., Yakir D. 2003. Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4): 1104. DOI 10.1029/2003GB002035.
- Reth S., Göckede M., Falge E. 2003. Temperature and soil water controls on CO₂ efflux from agricultural. *Geophysical Research Abstracts* 5: 01061.
- Rochette P., Angers D.A., Chantigny M.H., Bertrand N., Cote D. 2004. Carbon dioxide and nitrous oxide emissions following fall and spring applications of pig slurry to an agricultural soil. *Soil Science Society of America Journal* 68: 1410–1420. DOI 10.2136/sssaj2004.1410.
- Rodeghiero M., Cescatti A. 2005. Main determinants of forest soil respiration along an elevation/temperature gradient in the Italian Alps. *Global Change Biology* 11: 1024–1041. DOI 10.1111/j.1365-2486.2005.00963.x.
- Rykowski K. 1999. Rola ekosystemów leśnych oraz drewna w kontrolowaniu absorpcji i emisji węgla, w Zmiany i zmienność klimatu Polski. Ich wpływ na gospodarkę, ekosystemy i człowieka. Ogólnopolska konferencja naukowa, Łódź, 4–6 listopada 1999: 225–244.
- 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. DOI 10.1093/jxb/erg121.
- Schlesinger W.H., Andrews J.A. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48: 7–20. DOI 10.1023/A:1006247623877.
- Stoyan H., De-Polli H., Böhm S., Robertson G.P., Paul E.A. 2000. Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant and Soil* 222: 203–214.
- Tang J., Baldocchi D.D., Qi Y., Xu L. 2003. Assessing soil CO₂ efflux using continuous measurements of CO₂ profiles in soils with small solid-state sensors. *Agricultural and Forest Meteorology* 118: 207–220. DOI 10.1016/S0168-1923(03)00112-6.
- Tang J., Qi Y., Xu M., Misson L., Goldstein A.H. 2005. Forest thinning and soil respiration in a ponderosa pine plantation in the Sierra Nevada. *Tree Physiology* 25: 57–66. DOI 10.1093/treephys/25.1.57.

- Trümper G., A. Klik A. 2008. Effects of soil tillage on carbon dioxide emissions from agricultural soils. *Geophysical Research Abstracts* t. 10., EGU2008-A-03494.
- Tufekcioglu A., Kucuk A. 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.
- Tufekcioglu A., Raich J.W., Isenhardt T.M., Schultz R.C. 2001. Soil respiration within riparian buffers and adjacent crop fields. *Plant and Soil* 229(1): 117–124. DOI 10.1023/A:1004818422908.
- Turbiak J., Miatkowski Z. 2010. Emisja CO₂ z gleb pobagiennych w zależności od warunków wodnych siedlisk. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach 10(1): 201–210.
- Weiner J. 2006. *Życie i ewolucja biosfery*, Wyd. PWN, Warszawa. 610 s. ISBN 83-01-14174-3.
- Wroński K.T. 2014. Wydzielanie dwutlenku węgla z gleb leśnych i łąkowych w regionie łódzkim oraz wpływ człowieka na ten proces. *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko* 15: 98–107.
- Wroński K.T. 2015. The dependence of soil CO₂ fluxes on atmospheric conditions during sub-periods of soil respiration. *Leśne Prace Badawcze* 76(2): 129–143. DOI 10.1515/frp-2015-00013.
- Zhaofu L., Xianguo L., Qing Y. 2005. Soil-surface CO₂ fluxes in a *Deyeuxia angustifolia* wetland in Sanjiang Plain, China. *Wetlands Ecology and Management* 13: 35–41. DOI 10.1007/s11273-003-5041-8.