

Zależność emisji CO₂ z gleby od warunków atmosferycznych w podokresach zmienności respiracji gleby

The dependence of soil CO₂ fluxes on atmospheric conditions during sub-periods of soil respiration

Krzysztof T. Wroński

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

Tel. + 48 504357430, e-mail: krzysztofwr@tlen.pl

Abstract. Soil respiration was measured on rusty soil in a dry forest near Łódź. A two-year series of soil respiration was divided into characteristic sub-periods and relationships between CO₂ emission from the soil as well as selected aspects of climatic conditions were examined. The temperature dependence of CO₂ fluxes from the soil is linear from March to June and exponential during the period from June to March. Dividing the year into a phase of growth and a phase of decline and modeling soil respiration for each of these sub-periods separately does not significantly improve the accuracy of the model. The studies have also shown that soil respiration responds with a delay of three days to changes in temperature and relative moisture, but with a 17-day delay to changes in precipitation.

Keywords: soil respiration, carbon dioxide, temperature, hysteresis

1. Wstęp

Przy modelowaniu procesu respiracji gleby (oddychania gleby, emisji CO₂ z gleby) niemal powszechnie przyjmuje się, że zależność wielkości wydzielania CO₂ z gleby od temperatury (gleby i powietrza) najlepiej opisuje równanie wykładnicze (Borken et al. 1999; Rochette et al. 1999; Kutsch et al. 2001; Tang et al. 2003, 2005; Zhaofu et al. 2005). Modele respiracji gleby uwzględniają, oprócz temperatury, również warunki wilgotnościowe (wilgotność gleby lub wysokość opadów) (Savage, Davidson 2003; Tufekcioglu; Kucuk 2004; Tang et al. 2005). Formuły na obliczanie wielkości emisji CO₂ z gleby różnią się u różnych autorów, ale te dwie cechy powtarzają się przy niemal wszystkich modelach. Jeżeli dotyczą one skali całego roku, daje to bardzo dobre rezultaty. Czasem są uwzględniane dodatkowo również inne czynniki, jak: zawartość węgla (Kutsch et al. 2001; Rodeghiero, Cascatti 2005), wskaźnik maksymalnej powierzchni liści (Doran et al. 1990; Reichstein et al. 2003), pH (Reth et al. 2004), sposób użytkowania gruntu (Ardo, Olsson 2003) itp.

Tymczasem dokładniejsze analizy zmian wielkości emisji CO₂ z gleby przy różnych warunkach pokazują, że jedna formuła na opisanie oddychania gleby w krótszych przedziałach czasowych jest niewystarczająca. Przykładowo Updegraff i in. (1998) uzyskali (w doświadczeniu laboratoryjnym)

różne równania regresji między respiracją a temperaturą przy identycznych zmianach tego elementu klimatu w zależności od tego, czy najpierw generowano jej wzrost (od 6°C do 30°C), a później spadek (od 30°C do 6°C), czy odwrotnie. Z kolei Moore (1989) zauważył, że również w przypadku analizy wpływu głębokości zalegania wód gruntowych na respirację gleby należy uwzględnić historię zmian tej determinanty, gdyż poziom emisji CO₂ jest inny przy takiej samej głębokości wód gruntowych w zależności od tego, czy grunt był nasycony wodą i następuje jego wysychanie, czy wilgotność gleby się zwiększa.

Innym zjawiskiem wartym zbadania jest określenie, czy respiracja gleby odpowiada natychmiastowo na zmiany oddychania gleby. Czynniki wpływające na wielkość populacji mikroorganizmów glebowych, w głównej mierze odpowiedzialnych za emisję CO₂ z gleby, tzn. temperatura i wilgotność gleby są uwzględniane w modelach oddychania gleby, ale wielkość tej populacji może ulegać zmianom z pewnym opóźnieniem wobec zmian tych parametrów. Dotychczas tym zagadnieniem zajmowali się: Wroński (2013, 2014) w skali całego roku oraz Wroński i Okupny (2012) w okresie wzrostu respiracji wiosną.

Celem pracy było zbadanie:

1) jaki kształt przyjmuje zależność oddychania gleby od temperatury (liniowy czy wykładniczy) w poszczególnych fazach zmian respiracji gleby w ciągu roku,

2) czy respiracja gleby „odpowiada” natychmiastowo na zmiany temperatury powietrza, wilgotności względnej atmosfery i wysokości opadów czy z opóźnieniem,

3) czy podzielenie całego okresu zmian respiracji gleby na podokresy i modelowanie oddychania gleby w tych podokresach może zwiększyć jakość wygenerowanych serii wartości teoretycznych respiracji.

2. Metodyka

Pomiary wielkości emisji CO₂ z gleby były dokonywane metodą komory zamkniętej. Komora miała powierzchnię 23×23 cm i wysokość 6 cm. Dolną część tej komory stanowiła stalowa rama wbijana w glebę, górną zaś – klosz z pleksiglasu. Wewnątrz znajdował się miernik stężenia CO₂ AirTECH vento firmy Gazex, wykorzystujący metodę NDIR, przy pomocy którego dokonywano pomiarów stężenia CO₂ w 2 momentach czasowych: 5 min. i 10 min. po zamknięciu komory. Różnica stężeń między późniejszym a wcześniejszym odczytem była przeliczana na wielkość emitowanego w danym czasie CO₂ wg wzoru:

$$R = \frac{M_{mol}}{V_{molnorm}} \frac{273 \cdot \Delta X \cdot V_{pow}}{T \cdot P \cdot t}$$

gdzie:

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

$V_{molnorm}$ – objętość molowa powietrza w warunkach normalnych $\left[\frac{dm^3}{mol}\right]$,

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

V_{pow} – objętość powietrza w komorze (objętość komory pomniejszona o objętość miernika) $[m^3]$,

T – temperatura $[K]$,

P – powierzchnia ograniczona stalową ramą $[m^2]$,

t – czas pomiaru $[h]$.

Wydzielanie CO₂ mierzono w odstępach nieregularnych, nie dłuższych niż 7 dni, uzależnionych od zmian pogody. Pomiary rozpoczęto w marcu 2010 r., a zakończono w marcu 2012 r. Aby sprawdzić w jaki sposób nierozłożone i słabo rozłożone igliwie oraz liście zalegające na powierzchni gleby wpływają na wielkość emisji CO₂, pomiary prowadzono na 2 rodzajach stanowisk: na glebie z której usunięto ściółkę i na glebie na której ściółkę pozostawiono.

Stanowiska pomiarowe zlokalizowano na terenie nasadzonego lasu sosnowego, który można zaklasyfikować do typu siedliskowego boru suchego. Znajduje się on na wschód od osiedla Olechów i na południe od wsi Nery (52°44'36" N, 19°34'57" E, 223 m n.p.m.) na terenie należącym administracyjnie do Łodzi. Jest to rejon „spotkania” trzech łobów łądolodu warciańskiego (Turkowska 2006). Wody, które spływały z tych łobów, naniósł na tym obszarze dużą ilość osadów fluwioglacjalnych (Klatkova 1972; Trzmiel, Nowacki 1985, 1987), w związku z czym wystąpiły tutaj korzystne warunki do wykształcenia się profilu gleby rdzawej o bar-

dzo kwaśnym odczynie (pH w H₂O = 4,0, pH w KCl = 3,5) z próchnicą typu mor. W całym profilu glebowym dominuje frakcja piaszczysta, a jego górna część, najsilniej wpływająca na wielkość respiracji, charakteryzuje się grupą granulometryczną piasku gliniastego.

W analizach statystycznych zależność między temperaturą powietrza a respiracją rozpatrywano w dwóch aspektach: (1) wynikającą ze zmienności krótkookresowej i (2) wynikającą ze zmienności sezonowej.

W pierwszym przypadku obliczono współczynniki korelacji liniowej między odfiltrowanymi seriami respiracji gleby i temperatury powietrza. Filtracja polegała na odjęciu wartości średnich ruchomych od wartości zaobserwowanych. Zbadano też, czy istnieje opóźnienie reakcji oddychania gleby na zmiany temperatury, obliczając korelację między odfiltrowanymi seriami respiracji a odfiltrowanymi seriami temperatury średniej z 1, 2, 3, ..., 10 dni. Średnie wartości temperatury obliczono w ten sposób, że ostatni dzień zaliczony do serii był dniem wykonania pomiaru oddychania gleby, np. średnią 3-dniową obliczono z wartości temperatury w dniu pomiaru i 2 dni poprzedzających ten pomiar.

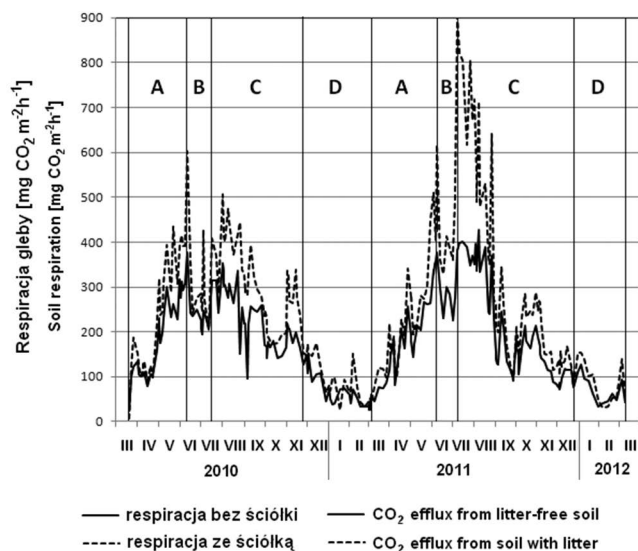
W drugim przypadku (zmienności sezonowej) obliczono korelację między (1) temperaturą z takiej liczby dni, dla jakiej zaobserwowano najsilniejszy związek przy zmienności krótkookresowej, a (2) respiracją gleby oraz logarytmem naturalnym respiracji gleby. Na podstawie tak obliczonych współczynników korelacji określono, czy w wyróżnionych okresach kształt zależności między zmiennymi ma charakter liniowy czy wykładniczy. Przy rozpatrywaniu zmienności sezonowej nie badano czasu reakcji oddychania gleby na zmiany temperatury, gdyż właściwości współczynnika korelacji sprawiają, że w przypadku nie do końca zgodnych krzywych przebiegu temperatury i respiracji, wyższą korelację uzyskuje się, gdy krzywa temperatury jest bardziej wygładzona (tzn. wartości korelacji rosną wraz ze zwiększaniem uśrednienia niezależnie od natury związku). Przyjęto a priori, że przy zmienności sezonowej najsilniejszy związek z emisją CO₂ występuje dla średniej temperatury powietrza z takiej liczby dni, jaka występuje w przypadku zmienności krótkookresowej.

Dla okresów, w których zauważono istotną korelację między respiracją a temperaturą, zmierzono siłę zależności oraz wielkość opóźnienia reakcji oddychania gleby na zmiany wilgotności względnej atmosfery oraz wysokości opadów. Dokonano tego, obliczając współczynniki korelacji liniowej między resztami z modelu respiracji gleby bazującego na wartościach temperatury (tzn. odchyleniami zaobserwowanej respiracji gleby od respiracji gleby modelowej, wynikającej z rozkładu temperatury), a odpowiednio: wilgotnością względną atmosfery (średnią dobową oraz średnimi z 2, 3, ..., 10 dni) i wysokością opadów (wartością dobową i średnimi z 2, 3, ..., 20 dni). Jeżeli jednak zależność między oddychaniem gleby a temperaturą była wykładnicza, korelację z wymienionymi parametrami, opisującymi wilgotność, obliczono dla reszt z modelu logarytmu naturalnego (ln) respiracji, a nie respiracji.

Model respiracji tworzonego, wykorzystując jako zmienne niezależne temperaturę i ten z parametrów opisujących warunki wilgotnościowe (wilgotność względną atmosfery lub wysokość opadów), który wykazywał silniejszy związek z respiracją gleby (dokładniej z odchyleniami respiracji rzeczywistej od respiracji teoretycznej wynikającej z rozkładu temperatur). Uwzględniono również wartość opóźnień w reakcji oddychania gleby na zmiany tych elementów klimatu. Jeżeli w danym okresie zależność respiracji gleby od temperatury była liniowa, estymacji dokonano metodą regresji wielorakiej, zaś jeżeli ta zależność była wykładnicza, model wyznaczono metodą estymacji quasi-Newtona.

3. Wyniki

Na podstawie kształtu przebiegu respiracji gleby wyróżniono cztery okresy (ryc. 1). Okres A to czas wzrostu emisji CO_2 . Rozpoczyna się on zwykle ok. 10 marca, po stopieniu pokrywy śnieżnej. Trwa on do przełomu maja i czerwca, kiedy rozpoczyna się okres B, w którym oddychanie gleby wyraźnie maleje. Obok wysokich temperatur (które powinny stymulować emisję CO_2 z gleby) występują zwykle wówczas niewielkie opady, co ogranicza oddychanie gleby (Wroński 2013). W lipcu rozpoczyna się okres C. Początkowo występują w nim bardzo wysokie wartości emisji CO_2 . Z czasem jednak zaznacza się systematyczny spadek. Wyjątkiem jest jedynie czas opadu liści i igliwia na powierzchnię gleby i rozpoczęcia ich intensywnego rozkładu, który wywołuje ponowny wzrost respiracji. Okres D wyróżniono ze względu na występowanie pokrywy śnieżnej (choć mogą również w nim występować podokresy bezśnieżne).



Rycina 1. Respiracja gleby na stanowisku badawczym i jej podokresy (A, B, C i D)

Figure 1. Soil respiration in research point and subperiods (A, B, C and D) of soil respiration

Analiza korelacyjna dotycząca zmian krótkookresowych (tab. 1.) wykazała, że najsilniejsze związki z oddychaniem gleby występują zwykle w przypadku średnich dobowych temperatur lub średnich 3-dniowych temperatur powietrza. Dla okresów A i D można przyjąć, że respiracja gleby była najsilniej skorelowana ze średnimi 3-dniowymi temperatury, dla okresów B oraz A+B – ze średnimi dobowymi temperatury, zaś w pozostałych okresach – dla stanowisk bez ściółki – ze średnimi 3-dniowymi temperatury, a na stanowiskach ze ściółką – ze średnimi dobowymi temperatury.

Warto przy tym zauważyć, że zaobserwowane korelacje były stosunkowo silne w okresie wzrostu respiracji (okres A) i stagnacji wielkości emitowanego CO_2 (okres B), zaś słabe w okresie spadku oddychania gleby (okresy C i D).

Zaskakujący jest fakt, że dla całego 1. roku badań (okres A+B+C+D) temperatura była silniej skorelowana z respiracją gleby niż z logarytmem naturalnym \ln respiracji (tab. 2.), co świadczy o liniowym kształcie zależności między tymi zmiennymi, a nie wykładniczym, jak zakłada większość autorów. Mogły na tym zaważyć stosunkowo niskie opady na początku lata 2010 r., a więc w okresie, kiedy oddychanie gleby osiąga najwyższe wartości. Mniejsza ilość wody mogła więc ograniczyć emisję CO_2 z gleby przy najwyższych temperaturach, co zmodyfikowało kształt zależności. W 1. roku badań współczynniki korelacji z respiracją gleby (świadczące o liniowej regresji) miały największą przewagę nad współczynnikami korelacji z \ln respiracji gleby (świadczącymi o wykładniczej zależności) w okresie A, a także A+B, a więc w okresie wzrostu oddychania gleby. W okresach spadku (okresy C, D, B+C) wartości obu typów współczynników korelacji były zbliżone. Na wyższą wartość korelacji z oddychaniem gleby w porównaniu z korelacją z \ln respiracji w okresach C+D i B+C+D mogła zaważyć wspomniana niska ilość opadów na początku lata tego roku.

W 2. roku badań w okresach A, B, A+B wartości obu typów współczynników korelacji były zbliżone. Z kolei w okresach C, D, a zwłaszcza C+D i B+C+D, zaznaczył się wyraźnie wykładniczy kształt zależności respiracji gleby od temperatury.

Dla całego omawianego czasu liniowy kształt zależności był widoczny w okresie A oraz A+B (a więc w czasie wzrostu respiracji), wykładniczy w okresach C, D, B+C, C+D i B+C+D (a więc w czasie spadku). W okresie B oba typy współczynników korelacji były zbliżone.

Skoro w okresach B oraz D korelacja z temperaturą najczęściej była nieistotna statystycznie, zbadano, czy inny element klimatu nie wpływa silniej na wielkość oddychania gleby w tych okresach (B i D). Analizy dokonano w analogiczny sposób jak w przypadku zbadania zależności respiracji od temperatury. Jednak zarówno wilgotność względną atmosfery (tab. 3), jak i wysokość opadów (tab. 4) wpływała wówczas w znikomym stopniu na zmienność krótkookresową oddychania gleby. W przypadku zmienności sezonowej (tab. 5) istotną korelację w obu latach badań uzyskano jedynie dla wilgotności względnej (średniej 9-dniowej), ale przy wartości współczynników korelacji rzędu 0,50–0,70 opisywała ona zaledwie 0,25–0,49% zmienności respiracji gleby i nie nadawała się do modelowania tego zjawiska.

Tabela 1. Współczynniki korelacji między (1) odfiltrowanymi seriami respiracji i (2) odfiltrowanymi seriami temperatury średniej dobowej i 2, 3, ..., 10-dniowej. Odfiltrowanie polegało na odjęciu wartości średnich ruchomych 31-dniowych od wartości zaobserwowanych.

Table 1. Values of correlation coefficient between (1) filtered serie of soil respiration and (2) filtered series of average daily, 2-daily, ..., 10-daily temperature. Filtration consisted in subtraction moving average 31-daily temperature from observed values of temperature.

Rok Year	Okres Period	Rodzaj stanowiska Type of research point	Okresy uśrednienia temperatury Temperature average from:										
			1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days	
Rok 1. / 1 st year	A	bez ściółki/ litter free	0,425	0,578	0,657	0,648	0,606	0,602	0,599	0,578	0,539	0,534	
		ze ściółką/ with litter	0,622	0,743	0,794	0,775	0,725	0,699	0,667	0,630	0,585	0,584	
	B	bez ściółki/ litter free	0,763	0,722	0,701	0,682	0,670	0,645	0,570	0,544	0,567	0,537	
		ze ściółką/ with litter	0,818	0,793	0,755	0,770	0,828	0,864	0,837	0,803	0,760	0,681	
	C	bez ściółki/ litter free	0,569	0,617	0,596	0,533	0,441	0,339	0,298	0,268	0,240	0,201	
		ze ściółką/ with litter	0,759	0,699	0,661	0,633	0,576	0,505	0,467	0,404	0,342	0,271	
	D	bez ściółki/ litter free	0,059	0,038	0,149	0,131	0,099	0,082	0,100	0,127	0,160	0,179	
		ze ściółką/ with litter	0,471	0,426	0,442	0,393	0,353	0,303	0,251	0,201	0,157	0,099	
	A+B	bez ściółki/ litter free	0,426	0,523	0,583	0,583	0,568	0,576	0,568	0,546	0,521	0,500	
		ze ściółką/ with litter	0,543	0,614	0,641	0,651	0,662	0,682	0,665	0,623	0,571	0,540	
	B+C	bez ściółki/ litter free	0,561	0,590	0,576	0,536	0,477	0,402	0,359	0,329	0,308	0,272	
		ze ściółką/ with litter	0,666	0,628	0,596	0,596	0,598	0,582	0,546	0,485	0,423	0,356	
	C+D	bez ściółki/ litter free	0,364	0,383	0,384	0,337	0,285	0,238	0,228	0,218	0,212	0,195	
		ze ściółką/ with litter	0,591	0,540	0,516	0,482	0,449	0,411	0,387	0,342	0,302	0,249	
	B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,391	0,402	0,402	0,362	0,319	0,280	0,264	0,250	0,245	0,227	
		ze ściółką/ with litter	0,544	0,505	0,480	0,461	0,453	0,445	0,423	0,375	0,332	0,281	
	A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,360	0,406	0,427	0,391	0,344	0,312	0,301	0,283	0,266	0,243	
		ze ściółką/ with litter	0,522	0,524	0,520	0,499	0,476	0,464	0,443	0,394	0,342	0,291	
	Rok 2. / 2 nd year	A	bez ściółki/ litter free	0,688	0,658	0,635	0,636	0,614	0,568	0,548	0,493	0,438	0,383
			ze ściółką/ with litter	0,445	0,394	0,422	0,471	0,500	0,489	0,470	0,472	0,489	0,503
B		bez ściółki/ litter free	0,752	0,514	0,342	0,246	0,183	0,178	0,205	0,355	0,443	0,390	
		ze ściółką/ with litter	0,628	0,475	0,365	0,244	0,116	0,003	-0,044	0,107	0,198	0,168	

Rok Year	Okres Period	Rodzaj stanowiska Type of research point	Okresy uśrednienia temperatury Temperature average from:									
			1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
Rok 2. / 2 nd year	C	bez ściółki/ litter free	0,154	0,256	0,369	0,365	0,343	0,304	0,234	0,196	0,141	0,083
		ze ściółką/ with litter	0,262	0,262	0,262	0,205	0,171	0,120	0,078	0,080	0,046	0,010
	D	bez ściółki/ litter free	0,478	0,551	0,567	0,545	0,440	0,325	0,252	0,225	0,202	0,178
		ze ściółką/ with litter	0,554	0,652	0,668	0,644	0,568	0,495	0,448	0,439	0,418	0,387
	A+B	bez ściółki/ litter free	0,679	0,595	0,527	0,492	0,456	0,416	0,405	0,383	0,352	0,282
		ze ściółką/ with litter	0,438	0,351	0,316	0,292	0,256	0,210	0,185	0,215	0,237	0,218
	B+C	bez ściółki/ litter free	0,280	0,327	0,394	0,383	0,369	0,354	0,310	0,292	0,254	0,195
		ze ściółką/ with litter	0,371	0,352	0,338	0,286	0,255	0,216	0,190	0,209	0,188	0,146
	C+D	bez ściółki/ litter free	0,169	0,247	0,333	0,331	0,304	0,259	0,194	0,160	0,118	0,077
		ze ściółką/ with litter	0,246	0,251	0,252	0,207	0,175	0,129	0,094	0,096	0,072	0,047
	B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,262	0,302	0,359	0,351	0,330	0,301	0,253	0,232	0,200	0,155
		ze ściółką/ with litter	0,330	0,319	0,314	0,272	0,241	0,201	0,175	0,186	0,168	0,135
	A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,242	0,284	0,340	0,329	0,307	0,279	0,235	0,213	0,178	0,133
		ze ściółką/ with litter	0,307	0,298	0,289	0,240	0,208	0,170	0,149	0,160	0,140	0,108
Oba lata / Both years	A	bez ściółki/ litter free	0,564	0,619	0,638	0,633	0,602	0,573	0,562	0,525	0,480	0,449
		ze ściółką/ with litter	0,526	0,550	0,580	0,593	0,584	0,568	0,547	0,536	0,529	0,536
	B	bez ściółki/ litter free	0,747	0,607	0,515	0,452	0,412	0,406	0,384	0,437	0,485	0,434
		ze ściółką/ with litter	0,678	0,583	0,511	0,448	0,396	0,364	0,333	0,390	0,408	0,349
	C	bez ściółki/ litter free	0,332	0,412	0,465	0,434	0,382	0,318	0,260	0,226	0,184	0,136
		ze ściółką/ with litter	0,388	0,370	0,358	0,309	0,270	0,217	0,179	0,164	0,127	0,084
	D	bez ściółki/ litter free	0,221	0,232	0,296	0,269	0,211	0,164	0,151	0,158	0,168	0,171
		ze ściółką/ with litter	0,504	0,513	0,523	0,477	0,424	0,371	0,325	0,293	0,258	0,209
	A+B	bez ściółki/ litter free	0,567	0,565	0,552	0,531	0,503	0,485	0,478	0,459	0,432	0,384
		ze ściółką/ with litter	0,479	0,454	0,442	0,427	0,407	0,389	0,373	0,379	0,374	0,349

Rok Year	Okres Period	Rodzaj stanowiska Type of research point	Okresy uśrednienia temperatury Temperature average from:									
			1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
Oba lata / Both years	B+C	bez ściółki/ litter free	0,403	0,444	0,473	0,448	0,415	0,374	0,330	0,307	0,277	0,229
		ze ściółką/ with litter	0,458	0,434	0,415	0,382	0,362	0,333	0,307	0,297	0,264	0,215
	C+D	bez ściółki/ litter free	0,261	0,310	0,352	0,326	0,288	0,243	0,208	0,186	0,164	0,137
		ze ściółką/ with litter	0,341	0,327	0,319	0,282	0,253	0,216	0,188	0,175	0,150	0,119
	B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,319	0,344	0,372	0,347	0,316	0,281	0,251	0,233	0,214	0,184
		ze ściółką/ with litter	0,392	0,370	0,357	0,326	0,307	0,281	0,258	0,245	0,218	0,180
	A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,358	0,393	0,419	0,397	0,363	0,329	0,302	0,273	0,242	0,205
		ze ściółką/ with litter	0,396	0,385	0,383	0,360	0,341	0,317	0,294	0,276	0,244	0,207

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

A, B, C, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

Tabela 2. Współczynniki korelacji między (1) respiracją gleby i logarytmem naturalnym respiracji a (2) temperaturą średnią dobową lub temperaturą średnią 3-dniową

Table 2. Values of correlation coefficient between (1) soil respiration and the natural logarithm of soil respiration and (2) average daily temperature or average 3-daily temperature

Okres Period	Rodzaj stanowiska Type of research point	1. rok 1 st year		2. rok 2 nd year		Oba lata Both years		Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperature
		Zależność / Relationship						
		liniowa linear	wykładnicza expo-tential	liniowa linear	wykładnicza expo-tential	liniowa linear	wykładnicza expo-tential	
A	bez ściółki/ litter free	0,878	0,819	0,914	0,880	0,891	0,838	3
	ze ściółką / with litter	0,911	0,788	0,854	0,866	0,869	0,791	3
B	bez ściółki/ litter free	0,498	0,438	0,730	0,731	0,464	0,421	1
	ze ściółką/ with litter	0,638	0,608	0,398	0,393	0,302	0,278	1
C	bez ściółki/ litter free	0,863	0,821	0,736	0,758	0,757	0,755	3
	ze ściółką / with litter	0,890	0,880	0,555	0,663	0,596	0,685	1
D	bez ściółki/ litter free	-0,203	-0,119	0,714	0,731	0,123	0,187	3
	ze ściółką/ with litter	-0,102	-0,089	0,786	0,847	-0,102	0,268	3
A+B	bez ściółki/ litter free	0,703	0,644	0,903	0,877	0,801	0,755	1
	ze ściółką / with litter	0,682	0,576	0,760	0,840	0,705	0,686	1
B+C	bez ściółki/ litter free	0,760	0,746	0,743	0,768	0,729	0,741	3
	ze ściółką/ with litter	0,701	0,709	0,557	0,679	0,548	0,657	1
C+D	bez ściółki/ litter free	0,875	0,798	0,774	0,841	0,813	0,819	3
	ze ściółką / with litter	0,882	0,783	0,555	0,791	0,704	0,790	1
B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,861	0,803	0,785	0,849	0,811	0,824	3
	ze ściółką/ with litter	0,836	0,775	0,557	0,802	0,684	0,789	1
A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	0,824	0,786	0,779	0,846	0,803	0,814	3
	ze ściółką / with litter	0,794	0,708	0,543	0,797	0,681	0,753	1

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

A, B, C, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

Tabela 3. Współczynniki korelacji między (1) odfiltrowanymi seriami respiracji i (2) odfiltrowanymi seriami wilgotności względnej średniej dobowej i 2, 3, ..., 10-dniowej. Odfiltrowanie polegało na odjęciu wartości średnich ruchomych 31-dniowych od wartości zaobserwowanych.

Table 3. Correlation coefficient between (1) filtered serie of soil respiration and (2) filtered series of average 1-daily, 2-daily, ..., 10-daily relative moisture. Filtration consisted in subtraction moving average 31-daily temperature from observed values of temperature.

Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperature	Rodzaj stanowiska Type of research point	Okresy uśrednienia wilgotności względnej Average relative moisture from:									
				1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
B	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	-0,172	-0,234	-0,139	-0,130	-0,069	-0,273	-0,357	-0,494	-0,561	-0,591
		3	ze ściółką/ with litter	-0,229	-0,485	-0,378	-0,374	-0,343	-0,582	-0,698	-0,758	-0,800	-0,793
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,100	0,096	-0,024	-0,059	-0,037	-0,029	-0,016	0,002	0,015	0,046
		3	ze ściółką/ with litter	-0,044	0,028	-0,035	-0,025	-0,054	-0,077	-0,082	-0,063	-0,046	-0,015
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	-0,335	-0,223	-0,179	-0,124	0,059	0,056	0,134	0,097	0,075	0,064
		3	ze ściółką/ with litter	-0,170	-0,109	-0,089	-0,034	0,132	0,136	0,205	0,182	0,220	0,229
D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,100	0,096	-0,024	-0,059	-0,037	-0,029	-0,016	0,002	0,015	0,046
		1	ze ściółką/ with litter	-0,044	0,028	-0,035	-0,025	-0,054	-0,077	-0,082	-0,063	-0,046	-0,015
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	-0,004	0,163	0,219	0,290	0,275	0,144	0,050	0,039	0,043	0,089
		1	ze ściółką/ with litter	0,064	0,308	0,330	0,417	0,379	0,295	0,218	0,237	0,269	0,343
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,063	0,109	0,055	0,055	0,067	0,031	0,007	0,015	0,024	0,061
		1	ze ściółką/ with litter	-0,005	0,120	0,100	0,131	0,099	0,057	0,024	0,046	0,072	0,128

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

B, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

W tej sytuacji najrozsądniejszym rozwiązaniem było podzielenie do celów modelowania całego okresu zmienności respiracji na 2 podokresy: A i B+C+D lub A+B i C+D (ryc. 2). Ponieważ wyższe współczynniki korelacji otrzymano dla pierwszej z wymienionych możliwości (tab. 2), właśnie nią posługiwano się w dalszych etapach pracy. Sprawdzone, czy wyróżnienie okresu A z liniowym wzrostem emisji CO₂ wraz z temperaturą oraz okresu B+C+D, kiedy następuje spadek wydzielania CO₂ wg krzywej wykładniczej, poprawia jakość modeli respiracji gleby w układzie czasowym.

Trzeba jednak zwrócić uwagę, że potencjalny model mógłby dawać lepsze rezultaty, gdyby udało się znaleźć w przyszłości satysfakcjonującą formułę na obliczanie respiracji gleby w okresie zimowym. Prawdopodobnie nie będzie ona uwzględ-

niała jednak ani warunków atmosferycznych, ani nawet procesów fizycznych w samej glebie, lecz procesy biologiczne. Z badań Zimova i in. (1993) wynika, że dużej zmienności przepływów CO₂ w tym okresie towarzyszą względnie stabilne parametry fizyczne. Na rysunku 2 przedstawiono, w jaki sposób zmieniają się relacje respiracji gleby oraz średniej temperatury 3-dniowej w ciągu roku z podziałem na te trzy okresy (A, B+C i D). Podczas, gdy w okresie A respiracja rośnie dosyć szybko wraz ze wzrostem temperatury, w okresie B+C spadek oddychania gleby jest spowolniony, zwłaszcza pod koniec jesieni. Nie można zatem sformułować jednego wzoru pozwalającego obliczyć wielkość emisji CO₂ na podstawie temperatury, lecz układy tych zmiennych w czasie tworzą na wykresie pętlę quasi-histerozy.

Tabela 4. Współczynniki korelacji między (1) odfiltrowanymi seriami respiracji i (2) odfiltrowanymi seriami średniej wysokości opadów z 1, 2, ..., 10-dniowej. Odfiltrowanie polegało na odjęciu wartości średnich ruchomych 31-dniowych od wartości zaobserwowanych.
 Table 4. Correlation coefficient between (1) filtered series of soil respiration and (2) filtered series of average 1-daily, 2-daily, ..., 10-daily precipitation. Filtration consisted in subtraction moving average 31-daily temperature from observed values of temperature.

Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperatur	Rodzaj stanowiska Type of rese- arch point	Okresy uśrednienia wysokości opadów Average precipitation from:									
				1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
B	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	-0,096	-0,281	-0,230	-0,366	-0,418	-0,563	-0,580	-0,616	-0,608	-0,726
		3	ze ściółką/ with litter	0,202	-0,003	-0,097	-0,164	-0,216	-0,448	-0,558	-0,571	-0,550	-0,635
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	-0,268	0,017	0,321	0,160	0,137	0,152	0,146	0,095	0,187	0,228
		3	ze ściółką/ with litter	0,348	0,627	0,597	0,196	0,189	0,166	0,129	0,116	0,014	0,022
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	-0,291	-0,249	-0,322	-0,311	-0,111	-0,116	0,125	0,145	0,164	0,087
		3	ze ściółką/ with litter	-0,217	-0,172	-0,258	-0,258	0,037	0,018	0,221	0,233	0,240	0,179
D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	-0,268	0,017	0,321	0,160	0,137	0,152	0,146	0,095	0,187	0,228
		1	ze ściółką/ with litter	0,348	0,627	0,597	0,196	0,189	0,166	0,129	0,116	0,014	0,022
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,112	0,239	0,211	0,349	0,406	0,119	-0,017	-0,058	-0,056	0,020
		1	ze ściółką/ with litter	0,162	0,107	0,095	0,289	0,330	0,166	-0,002	0,066	0,008	0,044
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	-0,103	0,086	0,266	0,215	0,204	0,137	0,095	0,048	0,103	0,146
		1	ze ściółką/ with litter	0,265	0,450	0,374	0,220	0,221	0,165	0,091	0,101	0,015	0,035

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

B, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

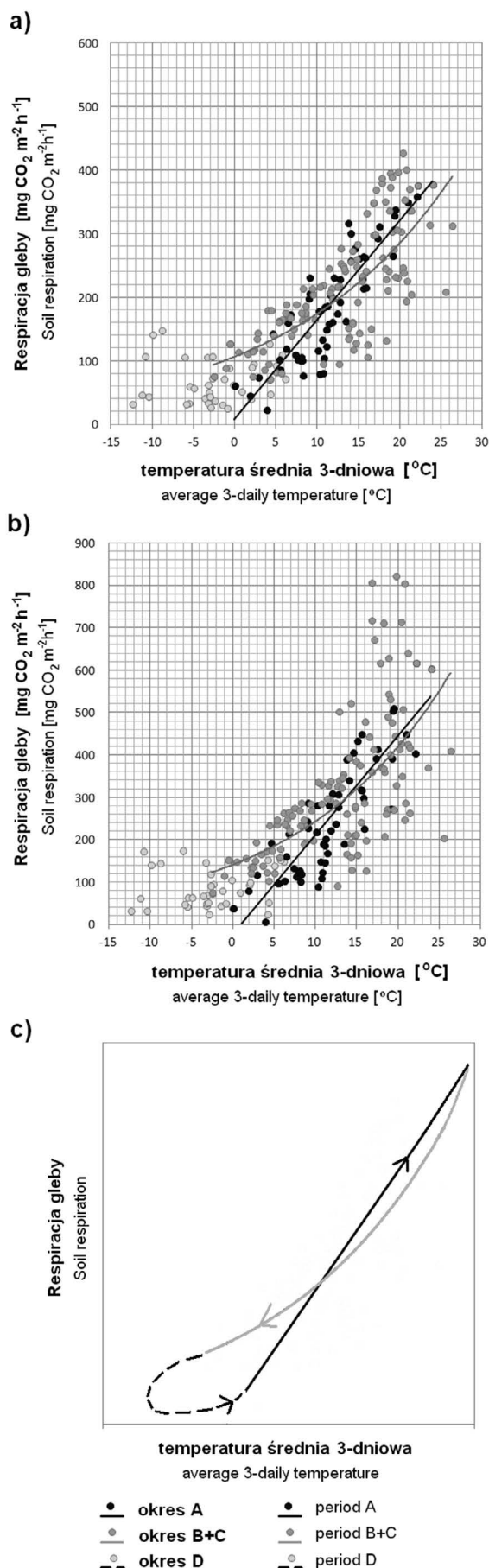
Tabela 5. Współczynniki korelacji między (1) respiracją gleby a (2) wilgotnością względną średnią 9-dniową i wysokością opadów średnią 3-dniową

Table 5. Correlation coefficients between (1) soil respiration and (2) average 9-daily relative moisture and average 3-daily precipitation

Okres Period	Rodzaj stanowiska Type of research point	Wilgotność względna śr. 9 dn. Average 9-daily relative moisture			Wysokość opadów śr. 3 dn. Average 3-daily precipitation		
		1. rok 1 st year	2. rok 2 nd year	Oba lata both years	1. rok 1 st year	2. rok 2 nd year	Oba lata both years
		B	bez ściółki/ litter free	0,131	0,196	0,215	0,299
	ze ściółką/ with litter	-0,122	0,679	0,495	0,360	0,023	0,234
D	bez ściółki/ litter free	0,500	0,617	0,527	0,558	0,164	0,405
	ze ściółką/ with litter	0,510	0,687	0,510	0,706	0,144	0,706

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

B, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1



Za podstawę modelu posłużyła temperatura powietrza. Oprócz temperatury, najważniejszym czynnikiem kształtującym wielkość respiracji gleby są warunki wilgotnościowe, dlatego uzupełniono model o wilgotność względną atmosfery lub wysokość opadów. Stwierdzono występowanie ok. 3-dniowego opóźnienia w reakcji oddychania gleby na zmiany wilgotności względnej (zarówno w okresie A, B+C+D, jak i w całym roku) (tab. 6). W przypadku zależności respiracji gleby od wysokości opadów to opóźnienie jest większe, wynoszące zwykle ok. 17–18 dni w okresach B+C+D oraz całym roku. W okresie A w drugim roku badań reakcja oddychania gleby była jednak szybsza i wyniosła 7–8 dni (tab. 7).

Zauważono też, że związek respiracji gleby (ściślej odchyleń respiracji gleby od respiracji teoretycznej, wynikającej z rozkładu temperatury) był silniejszy z wysokością opadów niż z wilgotnością względną atmosfery. Jedynie w przypadku okresu A w 1. roku badań zauważono odstępstwo od tej reguły.

Powyższa analiza skłania do przyjęcia jako zmiennych niezależnych modelu respiracji gleby średnie wartości temperatury z 3 dni oraz średnie sumy opadów z 17 dni. Wprawdzie w niektórych okresach lepsze dopasowanie uzyskano dla średnich dobowych temperatury oraz średnich sum opadów z 5, 7, 8, 18 dni, ale różnice w sile korelacji z respiracją gleby (lub z odchyleniami respiracji gleby od respiracji teoretycznej wynikającej z rozkładu temperatury w przypadku wysokości opadów) nie są duże. Przyjęto, że w okresie A kształt zależności respiracji gleby od temperatury opisuje równanie prostoliniowe, a w okresie B+C+D – równanie krzywej wykładniczej. W obu podokresach przyjęto, że wysokie opady ograniczają emisję CO₂ z gleby, dlatego w okresie A równanie opisujące respirację ma postać:

$$R = a + bT + cW + dW^2$$

zaś w okresie B+C+D:

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

gdzie:

R – teoretyczna respiracja gleby w danym dniu,

T – średnia temperatura z 3 dni,

W – średnia wysokość opadów z 17 dni,

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

Przyjęto, że okres A zaczyna się 11 marca a kończy 10 czerwca, natomiast okres B+C+D zaczyna się 11 czerwca i kończy 10 marca. Tak opracowany model porównano z modelem dla całego okresu badawczego, uwzględniającego wykładniczy kształt zależności emisji CO₂ od temperatury i ograniczenie oddychania gleby przy bardzo wysokich opadach. Model ten ma zatem postać:

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

Rycina 2. Krzywe regresji między respiracją gleby a temperaturą średnią 3-dniową w wyróżnionych okresach A i B+C na stanowiskach bez ściółki (a) i ze ściółką (b) oraz schematyczny rysunek obrazujący w jaki sposób zmieniają się relacje respiracji gleby oraz temperatury śr. 3-dniowej w ciągu roku. A, B, C, D jak na rycinie 1.

Figure 2. Soil respiration as a function of average 3-daily temperature in periods A and B+C in research point without litter (a) and with litter (b) and schematic graph of changes in relations between soil respiration and average 3-daily temperature. A, B, C, D / as in Figure 1.

Tabela 6. Współczynniki korelacji między (1) wilgotnością względną średnią z 1, 2, ..., 10 dni a (2) resztami z modelu respiracji bazującego na wartościach średniej 3-dniowej temperatury (w okresie A) i resztami z modelu logarytmu naturalnego respiracji bazującego na wartościach średniej 1-dniowej lub średniej 3-dniowej temperatury (w okresach B+C+D i A+B+C+D)

Table 6. Correlation coefficients between (1) average 1-daily, 2-daily, ..., 10-daily relative moisture and (2) residual of above average 3-daily temperature model of soil respiration (in period A) and residual of above average 1-daily or 3-daily temperature model of ln soil respiration (in periods B+C+D and A+B+C+D)

Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperatur	Rodzaj stanowiska Type of rese- arch point	Okresy uśrednienia wysokości opadów Average precipitation from:									
				1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
A	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,556	0,633	0,703	0,652	0,584	0,543	0,507	0,495	0,479	0,483
		3	ze ściółką/ with litter	0,559	0,620	0,749	0,717	0,660	0,607	0,566	0,547	0,537	0,546
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	-0,090	0,047	0,158	0,163	0,154	0,088	0,079	0,046	-0,015	-0,051
		3	ze ściółką/ with litter	0,105	0,229	0,284	0,215	0,136	0,035	0,060	0,056	-0,011	-0,092
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,235	0,266	0,318	0,307	0,269	0,231	0,213	0,194	0,167	0,153
		3	ze ściółką/ with litter	0,296	0,316	0,365	0,337	0,285	0,229	0,223	0,210	0,183	0,155
B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,391	0,451	0,462	0,430	0,398	0,376	0,345	0,325	0,313	0,307
		1	ze ściółką/ with litter	0,447	0,476	0,485	0,460	0,424	0,396	0,359	0,335	0,328	0,330
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,154	0,241	0,266	0,247	0,272	0,242	0,223	0,186	0,166	0,151
		1	ze ściółką/ with litter	0,234	0,316	0,300	0,275	0,294	0,274	0,254	0,224	0,220	0,211
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,289	0,359	0,375	0,353	0,348	0,323	0,295	0,268	0,252	0,240
		1	ze ściółką/ with litter	0,342	0,397	0,396	0,376	0,369	0,345	0,313	0,287	0,279	0,274
A+B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,408	0,446	0,454	0,423	0,386	0,362	0,325	0,304	0,297	0,296
		1	ze ściółką/ with litter	0,424	0,409	0,401	0,380	0,341	0,311	0,270	0,247	0,247	0,254
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,061	0,175	0,225	0,209	0,209	0,179	0,165	0,145	0,128	0,114
		1	ze ściółką/ with litter	0,232	0,330	0,343	0,320	0,310	0,280	0,266	0,250	0,243	0,229
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,243	0,302	0,325	0,305	0,286	0,260	0,233	0,214	0,202	0,194
		1	ze ściółką/ with litter	0,321	0,346	0,342	0,321	0,299	0,269	0,242	0,224	0,220	0,216

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

A, B, C, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

Tabela 7. Współczynniki korelacji między (1) średnią wysokością opadów z 1, 2, ..., 20 dni a (2) resztami z modelu respiracji bazującego na wartościach średniej 3-dniowej temperatury (w okresie A) i resztami z modelu logarytmu naturalnego respiracji bazującego na wartościach średniej 1-dniowej lub średniej 3-dniowej temperatury (w okresach B+C+D i A+B+C+D)

Table 7. Correlation coefficients between (1) average 1-daily, 2-daily, ..., 20-daily precipitation and (2) residual of above average 3-daily temperature model of soil respiration (in period A) and residual of above average 1-daily or 3-daily temperature model of ln soil respiration (in periods B+C+D and A+B+C+D)

Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperatur	Rodzaj stanowiska Type of rese- arch point	Okresy uśrednienia wysokości opadów Average precipitation from:									
				1 doba 1 day	2 dni 2 days	3 dni 3 days	4 dni 4 days	5 dni 5 days	6 dni 6 days	7 dni 7 days	8 dni 8 days	9 dni 9 days	10 dni 10 days
A	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,325	0,552	0,664	0,680	0,674	0,620	0,592	0,628	0,635	0,604
		3	ze ściółką/ with litter	0,269	0,493	0,602	0,653	0,728	0,682	0,648	0,685	0,687	0,656
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	-0,148	0,136	0,303	0,448	0,453	0,482	0,533	0,506	0,466	0,467
		3	ze ściółką/ with litter	-0,014	0,425	0,585	0,535	0,445	0,416	0,573	0,588	0,528	0,484
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,142	0,349	0,462	0,525	0,529	0,493	0,476	0,501	0,495	0,461
		3	ze ściółką/ with litter	0,132	0,379	0,473	0,484	0,500	0,463	0,477	0,511	0,496	0,454
B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	-0,020	0,036	0,121	0,223	0,265	0,315	0,306	0,312	0,358	0,370
		1	ze ściółką/ with litter	0,197	0,297	0,349	0,386	0,400	0,426	0,412	0,423	0,450	0,460
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,093	0,204	0,337	0,374	0,403	0,393	0,427	0,417	0,392	0,383
		1	ze ściółką/ with litter	0,230	0,327	0,425	0,447	0,482	0,488	0,517	0,530	0,534	0,516
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,007	0,117	0,211	0,281	0,316	0,338	0,340	0,332	0,352	0,359
		1	ze ściółką/ with litter	0,184	0,314	0,376	0,401	0,422	0,429	0,426	0,425	0,438	0,444
A+B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,040	0,143	0,218	0,291	0,323	0,328	0,309	0,327	0,367	0,371
		1	ze ściółką/ with litter	0,197	0,286	0,327	0,358	0,370	0,344	0,319	0,350	0,379	0,380
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,030	0,185	0,321	0,375	0,381	0,387	0,417	0,409	0,384	0,378
		1	ze ściółką/ with litter	0,206	0,359	0,454	0,460	0,463	0,472	0,506	0,505	0,507	0,498
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,030	0,160	0,252	0,316	0,337	0,335	0,327	0,333	0,351	0,351
		1	ze ściółką/ with litter	0,181	0,312	0,364	0,385	0,389	0,364	0,352	0,367	0,385	0,383

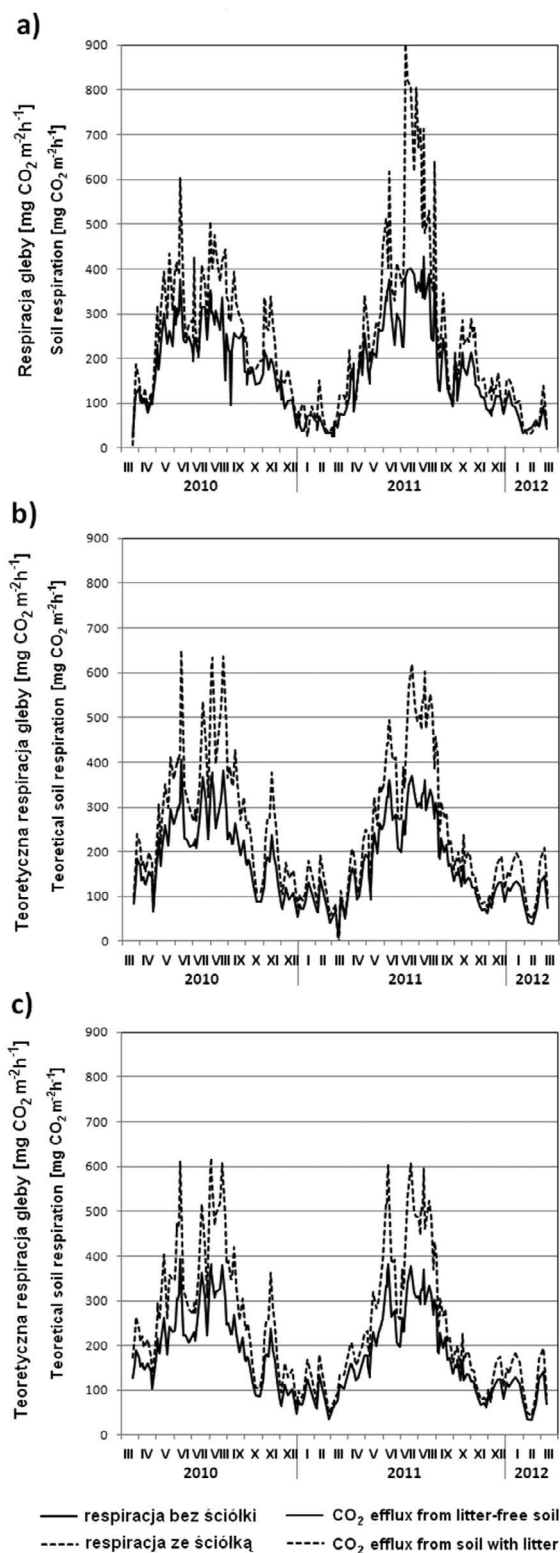
Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperatur	Rodzaj stanowiska Type of re- search point	Okresy uśrednienia wysokości opadów Average precipitation from:									
				11dni	12 dni	13 dni	14 dni	15 dni	16 dni	17 dni	18 dni	19 dni	20 dni
				11 days	12 days	13 days	14 days	15 days	16 days	17 days	18 days	19 days	20 days
A	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,627	0,649	0,621	0,614	0,678	0,684	0,685	0,688	0,656	0,637
		3	ze ściółką/ with litter	0,674	0,698	0,703	0,700	0,724	0,720	0,728	0,713	0,647	0,612
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,448	0,498	0,496	0,487	0,484	0,465	0,450	0,438	0,420	0,401
		3	ze ściółką/ with litter	0,431	0,488	0,489	0,524	0,510	0,430	0,431	0,446	0,437	0,392
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,457	0,485	0,473	0,466	0,504	0,506	0,505	0,505	0,477	0,456
		3	ze ściółką/ with litter	0,435	0,471	0,486	0,494	0,500	0,475	0,480	0,478	0,443	0,410
B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,383	0,387	0,394	0,406	0,419	0,447	0,474	0,484	0,477	0,456
		1	ze ściółką/ with litter	0,507	0,524	0,533	0,539	0,537	0,559	0,580	0,582	0,568	0,547
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,390	0,395	0,407	0,414	0,411	0,417	0,424	0,404	0,421	0,418
		1	ze ściółką/ with litter	0,509	0,502	0,525	0,537	0,534	0,527	0,527	0,513	0,519	0,513
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,372	0,377	0,382	0,394	0,403	0,423	0,443	0,442	0,442	0,430
		1	ze ściółką/ with litter	0,471	0,479	0,488	0,498	0,500	0,510	0,525	0,521	0,513	0,503
A+B+C+D	rok 1. 1 st year	3	bez ściółki/ litter free	0,390	0,402	0,407	0,415	0,432	0,456	0,475	0,487	0,480	0,460
		1	ze ściółką/ with litter	0,421	0,442	0,453	0,454	0,457	0,469	0,481	0,487	0,477	0,461
	rok 2. 2 nd year	3	bez ściółki/ litter free	0,386	0,397	0,405	0,410	0,410	0,414	0,420	0,403	0,416	0,413
		1	ze ściółką/ with litter	0,492	0,493	0,516	0,525	0,523	0,511	0,515	0,503	0,511	0,504
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	0,366	0,377	0,381	0,389	0,403	0,419	0,434	0,435	0,431	0,418
		1	ze ściółką/ with litter	0,408	0,420	0,433	0,439	0,444	0,446	0,456	0,455	0,445	0,435

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

A, B, C, D jak na rycinie 1 / as in Figure 1

Podzielenie całego okresu zmienności respiracji gleby na czas jej wzrostu (okres A) i spadku (okres B+C+D) przy modelowaniu procesu oddychania gleby w pewnym stopniu poprawiło dokładność wartości teoretycznych respiracji. Jest to widoczne głównie dla wartości z maja i początku czerwca (ryc. 3). Jednak wartości standardowego błędu estymacji oraz

współczynników determinacji R^2 dla obu rozpatrywanych modeli są niemal identyczne (tab. 8, ryc. 4), co oznacza, że uwzględnienie różnych kształtów zależności wielkości emisji CO_2 w okresie A i B+C+D nie poprawia znacząco jakości modelu respiracji i stosowanie jednej formuły dla całego okresu zmienności daje satysfakcjonujące rezultaty.



Rycina 3. Zaobserwowana wartość respiracji gleby na stanowisku badawczym (a) oraz wartości teoretyczne respiracji gleby wg modelu uwzględniającego podział na okres wzrostu i spadku wielkości emisji CO₂ z gleby (b) i wg modelu stosującego jedną formułę dla całego okresu badawczego (c)

Figure 3. Observed soil respiration in research point (a) and theoretical soil respiration based on model taking into account the division for a period of increasing and period of decreasing of soil respiration (b) and one model for whole research period (c)

Tabela 8. Wartości R² i błędu standardowego estymacji dla obu rozpatrywanych modeli

Table 8. Values of R² and standard error of estimation for two tested models

Model Model	Stanowisko bez ściółki Research point without litter	Stanowisko ze ściółką Research point with litter		
	Błąd stand. estymacji R ² Standard error of estimation	Błąd stand. estymacji R ² Standard error of estimation		
$R = a+bT+cW+dW^2$				
w okresie A / in period A				
	0,83	41,28	0,81	85,33
w okresie B+C+D / in period B+C+D				
w całym okresie ba- dawczym / in whole research period				
	0,75	42,85	0,73	88,3

Oznaczenia: R – teoretyczna respiracja gleby w danym dniu; T – średnia temperatura z 3 dni; W – średnia wysokość opadów z 17 dni; a, b, c, d, f – współczynniki empiryczne; A, B, C, D jak na rycinie 1

Notes: R – theoretical soil respiration of the day; T – average 3-daily temperature; W – average 17-daily precipitation; a, b, c, d, f – empirical coefficients; A, B, C, D as in Figure 1.

4. Dyskusja

Respiracja gleby, podobnie jak każde inne zjawisko w przyrodzie, wymyka się próbom ujęcia przy pomocy prostych formuł matematycznych. Jednocześnie modelowanie matematyczne ułatwia prognozowanie zmian wielkości emisji CO₂ z gleby, stąd rośnie konieczność ulepszenia tych modeli.

Odstępstwa od wykładniczego kształtu zależności oddychania gleby od temperatury zauważyli m.in. Rodeghiero i Cascatti (2005). Zdaniem tych autorów przy najwyższych wartościach temperatury respiracja gleby jest mniejsza, niż by to wynikało z równania krzywej wykładniczej ze względu na spadek wilgotności przy wysokich temperaturach. Z kolei Chapman i Thurlow (1996), Fang i Moncrieff (2001) oraz Falge i in. (2002) uważają, że związek między oddychaniem gleby a temperaturą najlepiej opisuje równanie krzywej Arrheniusa. Natomiast Tufekcioglu i Kucuk (2004) traktują tę zależność jako prostoliniową. Zdaniem autora tego artykułu zależność respiracji gleby od temperatury powietrza jest dość dobrze opisywana przez równanie eksponentialne w okresie spadku wartości oddychania gleby (od czerwca do marca) a równanie liniowe – w czasie, kiedy respiracja rośnie (od marca do czerwca). Zbliżony kształt przebiegu wielkości emisji CO₂ z gleby i zjawisko histerezy, ale w cyklu dobowym, zauważyli Parkin i Kaspar (2003). W okresie wzrostu temperatury między godziną 6 a 12 oddychanie gleby bardzo szybko rośnie, ok. godziny 13 stabilizuje się mimo dalszych

wzrostów temperatury, a wykładniczy kształt zależności między emisją CO₂ z gleby a temperaturą występuje tylko w czasie spadku respiracji.

Badania będące przedmiotem niniejszego artykułu wskazują również, że oddychanie gleby jest najlepiej skorelowane z temperaturą w okresie jej wzrostu. Nieco odmiennie wyniki uzyskali Moncrieff i Fang (1999), zdaniem których czułość respiracji na zmiany temperatury gleby największa jest wprawdzie latem, jednak wielkość emisji CO₂ z gleby jest silnie zdeterminowana przez temperaturę wiosną niż jesienią.

Zagadnienie czasu reakcji oddychania gleby na zmiany temperatury i wilgotności względnej atmosfery było dotychczas niemal nie badane. Należy je tłumaczyć zapewne tym, że musi upłynąć pewien przedział czasowy, aby liczebność populacji mikroorganizmów glebowych uległa zmianie na skutek poprawy lub pogorszenia warunków środowiskowych. Zauważone w badaniach prowadzonych przez autora 3-dniowe opóźnienie odpowiada 2–8 dniowej periodyczności wielkości emisji CO₂ zauważonej na obszarze tundry (Zimov et al. 1993), również związanej z cyklem życiowym mikroorganizmów.

W przypadku zależności oddychania gleby od wysokości opadów 17–18 dniowe opóźnienie wynika natomiast prawdopodobnie z tego, że kształt przebiegu tych średnich dość dobrze opisuje kształt przebiegu wilgotności gleby, która bezpośrednio wpływa na liczebność mikroorganizmów glebowych.

Jak dotąd nie próbowano modelować zjawiska respiracji gleby, dzieląc okres zmienności wielkości emisji CO₂ na podokresy. Próba dokonania przez autora, pomimo lepszego odzwierciedlenia kształtu przebiegu oddychania gleby w maju i na początku czerwca, nie poprawiła jednak znacząco modelu. Problemem jest też znalezienie właściwej formuły na obliczanie respiracji gleby zimą. Większość badaczy pomija ten okres, rozpoczynając badania wiosną a kończąc jesienią. Wykorzystanie modelu wykładniczego dla całego okresu zmienności oddychania gleby może być przydatne w przypadku szacowania wielkości wyemitowanego CO₂ w całym roku, jednak nie odzwierciedla dynamiki zmian, gdy okres zimowy rozpatrywany jest osobno.

5. Podsumowanie

Z powyższych badań wynikają następujące wnioski:

1. W okresie od ok. 10 marca do ok. 10 czerwca respiracja gleby rośnie liniowo wraz ze wzrostem temperatury.

2. W okresie spadku respiracji (od ok. 10 czerwca do ok. 10 marca) zależność oddychania gleby od temperatury powietrza przyjmuje kształt krzywej wykładniczej.

3. Respiracja gleby odpowiada z ok. 3-dniowym opóźnieniem na zmiany temperatury, 3-dniowym opóźnieniem – na zmiany wilgotności względnej i ok. 17-dniowym opóźnieniem na zmiany wysokości opadów.

4. Podzielenie okresu zmienności respiracji gleby na okres wzrostu i spadku oraz modelowanie oddychania gleby w każdym z tych okresów osobno nie poprawia znacząco jakości wygenerowanych serii wartości teoretycznych respiracji.

Badania przeprowadzone przez autora wskazują również na bardzo niewielką wiedzę na temat determinant oddycha-

nia gleby w okresie zimowym. Przyszłe badania powinny się skupiać m.in. na tym zagadnieniu.

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.

Literatura

- Ardo J., Olsson L. 2003. Assessment of soil organic carbon in semi-arid Sudan using GIS and the CENTURY model. *Journal of Arid Environments* 54: 633–651. DOI 10.1006/jare.2002.1105.
- 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.
- Chapman S.J., Thurlow M. 1998. Peat respiration at low temperatures. *Soil Biology and Biochemistry* 30(8/9): 1013–1021. DOI 10.1016/S0038-0717(98)00009-1.
- Doran J. W., Mielke L. N., Power J. F. 1990. Microbial activity as regulated by soil water-filled pore space. *Transactions 14th International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan. 12–18 Aug. 1990*, s. 94–99.
- Falge E., Baldocchi D., Tenhunen J., Aubinet M., Bakwin P., Berbigier P. et al. 2002. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 113: 53–74. DOI 10.1016/S0168-1923(02)00102-8.
- Fang C., Moncrieff J.B. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 155–165. DOI 10.1016/S0038-0717(00)00125-5.
- Klatkova H. 1972. Paleogeografia Wyżyny Łódzkiej i obszarów sąsiednich podczas zlodowacenia warciańskiego. *Acta Geographica Lodziensia* 28, 220 s.
- 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.
- Moncrieff J. B., Fang C. 1999. A model for soil CO₂ production and transport 2: Application to a Florida Pinus elliotte plantation. *Agricultural and Forest Meteorology* 95: 237–256. DOI 10.1016/S0168-1923(99)00035-0.
- Moore T.R. 1989. Plant production, decomposition, and carbon efflux in a subarctic patterned fen. *Arctic and Alpine Research* 21: 156–162. DOI: 10.2307/1551627.
- Parkin T. B., Kaspar T. C. 2003. Temperature Controls on Diurnal Carbon Dioxide Flux: Implications for Estimating Soil Carbon Loss. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1763–1772. DOI 10.2136/sssaj2003.1763.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer, A., Tenhunen, J., Valentini, R., Banza, J. et al. 2003. Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, tem-

- perature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles* 17(4): 1104. DOI 10.1029/2003GB002035.
- Reth S., Reichstein M. and Falge E. 2005. The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux: A modified model. *Plant and Soil* 268: 21–33. DOI 10.1007/s11104-005-0175-5.
- 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.
- 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.
- 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.
- Trzmiel B., Nowacki K. 1985. Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1:50 000, ark. Łódź – Wschód. Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Trzmiel B., Nowacki K. 1987. Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000, ark. Łódź – Wschód., Instytut Geologiczny, Warszawa, 83 s.
- 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.
- Turkowska K. 2006. Geomorfologia regionu łódzkiego. Wyd. UŁ, Łódź, 238 s. ISBN 83-7171-982-5.
- Updegraff K., Bridgham S. D., Pastor J., Weishampel P. 1998. Hysteresis in the temperature response of carbon dioxide and methane production in peat soils. *Biochemistry* 43: 253–272. DOI 10.1023/A:1006097808262.
- Wroński K., Okupny D. 2012. Emisja dwutlenku węgla z powierzchni torfowiska Rąbień, w: Przestrzeń w badaniach geograficznych (red. K. Fortuniak, J. Jędruszkiewicz, M. Zieliński) Wyd. UŁ, Łódź, 28–36.
- Wroński K. 2013. Wpływ warunków środowiskowych na emisję CO₂ z gleb leśnych i łąkowych na obszarze środkowej Polski (rękopis), 143 s. ISBN 978-83-7525-666-6.
- Wroński K. 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.
- 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.
- Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviudov S.P., Yu.V. Voropaev, Prosyannikov S.F., Wong C.S., Chan Y.-H. 1993. Wintertime CO₂ Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic* 46(3): 197–204.