

## Zależność emisji CO<sub>2</sub> z gleby od warunków atmosferycznych w podokresach zmienności respiracji gleby

The dependence of soil CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> emission from the soil as well as selected aspects of climatic conditions were examined. The temperature dependence of CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> z gleby) niemal powszechnie przyjmuje się, że zależność wielkości wydzielania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> AirTECH vento firmy Gazex, wykorzystujący metodę NDIR, przy pomocy którego dokonywano pomiarów stężenia CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>  $\left[\frac{g}{mol}\right]$ ,

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

$\Delta X$  – 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>, 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 fluwiogłacjalnych (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 H<sub>2</sub>O = 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.

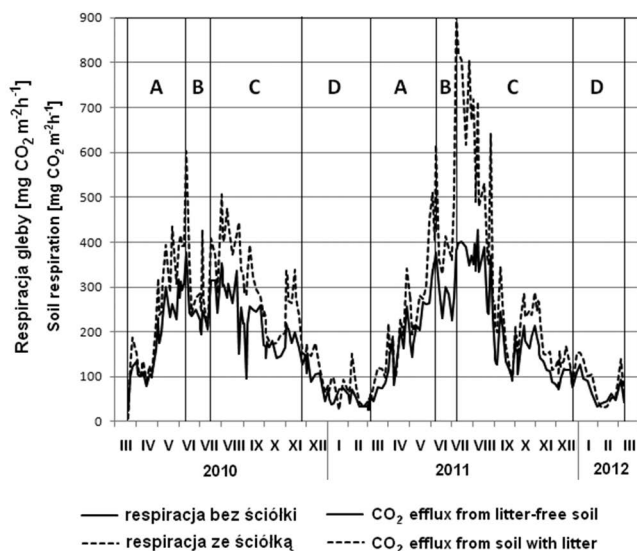
W drugim przypadku (zmienności sezonowej) obliczono korelację między (1) temperaturą z takiej liczby dni, dla jakiej zaobserwowano najsilniejszy związek przy zmienności krótkookresowej, a (2) respiracją gleby oraz logarytmem naturalnym respiracji gleby. Na podstawie tak obliczonych współczynników korelacji 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 CO<sub>2</sub> 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  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$ . 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  $\text{CO}_2$  (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  $\text{CO}_2$  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 <sup>st</sup> 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 <sup>nd</sup> 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 <sup>nd</sup> year	C	bez ściółki/ litter free	0,154	0,256	<b>0,369</b>	<b>0,365</b>	<b>0,343</b>	<b>0,304</b>	0,234	0,196	0,141	0,083
		ze ściółką/ with litter	<b>0,262</b>	<b>0,262</b>	<b>0,262</b>	0,205	0,171	0,120	0,078	0,080	0,046	0,010
	D	bez ściółki/ litter free	0,478	0,551	<b>0,567</b>	0,545	0,440	0,325	0,252	0,225	0,202	0,178
		ze ściółką/ with litter	<b>0,554</b>	<b>0,652</b>	<b>0,668</b>	<b>0,644</b>	<b>0,568</b>	0,495	0,448	0,439	0,418	0,387
	A+B	bez ściółki/ litter free	<b>0,679</b>	<b>0,595</b>	<b>0,527</b>	<b>0,492</b>	<b>0,456</b>	<b>0,416</b>	<b>0,405</b>	<b>0,383</b>	<b>0,352</b>	0,282
		ze ściółką/ with litter	<b>0,438</b>	<b>0,351</b>	<b>0,316</b>	0,292	0,256	0,210	0,185	0,215	0,237	0,218
	B+C	bez ściółki/ litter free	<b>0,280</b>	<b>0,327</b>	<b>0,394</b>	<b>0,383</b>	<b>0,369</b>	<b>0,354</b>	<b>0,310</b>	<b>0,292</b>	<b>0,254</b>	0,195
		ze ściółką/ with litter	<b>0,371</b>	<b>0,352</b>	<b>0,338</b>	<b>0,286</b>	<b>0,255</b>	0,216	0,190	0,209	0,188	0,146
	C+D	bez ściółki/ litter free	0,169	<b>0,247</b>	<b>0,333</b>	<b>0,331</b>	<b>0,304</b>	<b>0,259</b>	0,194	0,160	0,118	0,077
		ze ściółką/ with litter	<b>0,246</b>	<b>0,251</b>	<b>0,252</b>	0,207	0,175	0,129	0,094	0,096	0,072	0,047
	B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,262</b>	<b>0,302</b>	<b>0,359</b>	<b>0,351</b>	<b>0,330</b>	<b>0,301</b>	<b>0,253</b>	<b>0,232</b>	0,200	0,155
		ze ściółką/ with litter	<b>0,330</b>	<b>0,319</b>	<b>0,314</b>	<b>0,272</b>	<b>0,241</b>	0,201	0,175	0,186	0,168	0,135
	A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,242</b>	<b>0,284</b>	<b>0,340</b>	<b>0,329</b>	<b>0,307</b>	<b>0,279</b>	<b>0,235</b>	<b>0,213</b>	<b>0,178</b>	0,133
		ze ściółką/ with litter	<b>0,307</b>	<b>0,298</b>	<b>0,289</b>	<b>0,240</b>	<b>0,208</b>	<b>0,170</b>	<b>0,149</b>	<b>0,160</b>	<b>0,140</b>	0,108
Oba lata / Both years	A	bez ściółki/ litter free	<b>0,564</b>	<b>0,619</b>	<b>0,638</b>	<b>0,633</b>	<b>0,602</b>	<b>0,573</b>	<b>0,562</b>	<b>0,525</b>	<b>0,480</b>	<b>0,449</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,526</b>	<b>0,550</b>	<b>0,580</b>	<b>0,593</b>	<b>0,584</b>	<b>0,568</b>	<b>0,547</b>	<b>0,536</b>	<b>0,529</b>	<b>0,536</b>
	B	bez ściółki/ litter free	<b>0,747</b>	<b>0,607</b>	<b>0,515</b>	0,452	0,412	0,406	0,384	0,437	0,485	0,434
		ze ściółką/ with litter	<b>0,678</b>	<b>0,583</b>	<b>0,511</b>	0,448	0,396	0,364	0,333	0,390	0,408	0,349
	C	bez ściółki/ litter free	<b>0,332</b>	<b>0,412</b>	<b>0,465</b>	<b>0,434</b>	<b>0,382</b>	<b>0,318</b>	<b>0,260</b>	<b>0,226</b>	<b>0,184</b>	<b>0,136</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,388</b>	<b>0,370</b>	<b>0,358</b>	<b>0,309</b>	<b>0,270</b>	<b>0,217</b>	<b>0,179</b>	<b>0,164</b>	<b>0,127</b>	<b>0,084</b>
	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	<b>0,513</b>	<b>0,523</b>	<b>0,477</b>	<b>0,424</b>	<b>0,371</b>	<b>0,325</b>	0,293	0,258	0,209
	A+B	bez ściółki/ litter free	<b>0,567</b>	<b>0,565</b>	<b>0,552</b>	<b>0,531</b>	<b>0,503</b>	<b>0,485</b>	<b>0,478</b>	<b>0,459</b>	<b>0,432</b>	<b>0,384</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,479</b>	<b>0,454</b>	<b>0,442</b>	<b>0,427</b>	<b>0,407</b>	<b>0,389</b>	<b>0,373</b>	<b>0,379</b>	<b>0,374</b>	<b>0,349</b>

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	<b>0,403</b>	<b>0,444</b>	<b>0,473</b>	<b>0,448</b>	<b>0,415</b>	<b>0,374</b>	<b>0,330</b>	<b>0,307</b>	<b>0,277</b>	<b>0,229</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,458</b>	<b>0,434</b>	<b>0,415</b>	<b>0,382</b>	<b>0,362</b>	<b>0,333</b>	<b>0,307</b>	<b>0,297</b>	<b>0,264</b>	<b>0,215</b>
	C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,261</b>	<b>0,310</b>	<b>0,352</b>	<b>0,326</b>	<b>0,288</b>	<b>0,243</b>	<b>0,208</b>	<b>0,186</b>	0,164	0,137
		ze ściółką/ with litter	<b>0,341</b>	<b>0,327</b>	<b>0,319</b>	<b>0,282</b>	<b>0,253</b>	<b>0,216</b>	<b>0,188</b>	<b>0,175</b>	0,150	0,119
	B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,319</b>	<b>0,344</b>	<b>0,372</b>	<b>0,347</b>	<b>0,316</b>	<b>0,281</b>	<b>0,251</b>	<b>0,233</b>	<b>0,214</b>	<b>0,184</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,392</b>	<b>0,370</b>	<b>0,357</b>	<b>0,326</b>	<b>0,307</b>	<b>0,281</b>	<b>0,258</b>	<b>0,245</b>	<b>0,218</b>	<b>0,180</b>
	A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,358</b>	<b>0,393</b>	<b>0,419</b>	<b>0,397</b>	<b>0,363</b>	<b>0,329</b>	<b>0,302</b>	<b>0,273</b>	<b>0,242</b>	<b>0,205</b>
		ze ściółką/ with litter	<b>0,396</b>	<b>0,385</b>	<b>0,383</b>	<b>0,360</b>	<b>0,341</b>	<b>0,317</b>	<b>0,294</b>	<b>0,276</b>	<b>0,244</b>	<b>0,207</b>

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 <sup>st</sup> year		2. rok 2 <sup>nd</sup> 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	<b>0,878</b>	<b>0,819</b>	<b>0,914</b>	<b>0,880</b>	<b>0,891</b>	<b>0,838</b>	3
	ze ściółką / with litter	<b>0,911</b>	<b>0,788</b>	<b>0,854</b>	<b>0,866</b>	<b>0,869</b>	<b>0,791</b>	3
B	bez ściółki/ litter free	0,498	0,438	<b>0,730</b>	<b>0,731</b>	<b>0,464</b>	<b>0,421</b>	1
	ze ściółką/ with litter	0,638	0,608	0,398	0,393	0,302	<b>0,278</b>	1
C	bez ściółki/ litter free	<b>0,863</b>	<b>0,821</b>	<b>0,736</b>	<b>0,758</b>	<b>0,757</b>	<b>0,755</b>	3
	ze ściółką / with litter	<b>0,890</b>	<b>0,880</b>	<b>0,555</b>	<b>0,663</b>	<b>0,596</b>	<b>0,685</b>	1
D	bez ściółki/ litter free	-0,203	-0,119	<b>0,714</b>	<b>0,731</b>	0,123	0,187	3
	ze ściółką/ with litter	-0,102	-0,089	<b>0,786</b>	<b>0,847</b>	-0,102	0,268	3
A+B	bez ściółki/ litter free	<b>0,703</b>	<b>0,644</b>	<b>0,903</b>	<b>0,877</b>	<b>0,801</b>	<b>0,755</b>	1
	ze ściółką / with litter	<b>0,682</b>	<b>0,576</b>	<b>0,760</b>	<b>0,840</b>	<b>0,705</b>	<b>0,686</b>	1
B+C	bez ściółki/ litter free	<b>0,760</b>	<b>0,746</b>	<b>0,743</b>	<b>0,768</b>	<b>0,729</b>	<b>0,741</b>	3
	ze ściółką/ with litter	<b>0,701</b>	<b>0,709</b>	<b>0,557</b>	<b>0,679</b>	<b>0,548</b>	<b>0,657</b>	1
C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,875</b>	<b>0,798</b>	<b>0,774</b>	<b>0,841</b>	<b>0,813</b>	<b>0,819</b>	3
	ze ściółką / with litter	<b>0,882</b>	<b>0,783</b>	<b>0,555</b>	<b>0,791</b>	<b>0,704</b>	<b>0,790</b>	1
B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,861</b>	<b>0,803</b>	<b>0,785</b>	<b>0,849</b>	<b>0,811</b>	<b>0,824</b>	3
	ze ściółką/ with litter	<b>0,836</b>	<b>0,775</b>	<b>0,557</b>	<b>0,802</b>	<b>0,684</b>	<b>0,789</b>	1
A+B+C+D	bez ściółki/ litter free	<b>0,824</b>	<b>0,786</b>	<b>0,779</b>	<b>0,846</b>	<b>0,803</b>	<b>0,814</b>	3
	ze ściółką / with litter	<b>0,794</b>	<b>0,708</b>	<b>0,543</b>	<b>0,797</b>	<b>0,681</b>	<b>0,753</b>	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 <sup>st</sup> 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	<b>-0,698</b>	<b>-0,758</b>	<b>-0,800</b>	<b>-0,793</b>
	rok 2. 2 <sup>nd</sup> 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 <sup>st</sup> 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 <sup>nd</sup> 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 CO<sub>2</sub> wraz z temperaturą oraz okresu B+C+D, kiedy następuje spadek wydzielania CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 <sup>st</sup> 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 <sup>nd</sup> 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 <sup>st</sup> 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	<b>0,627</b>	<b>0,597</b>	0,196	0,189	0,166	0,129	0,116	0,014	0,022
	rok 2. 2 <sup>nd</sup> 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	<b>0,450</b>	<b>0,374</b>	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

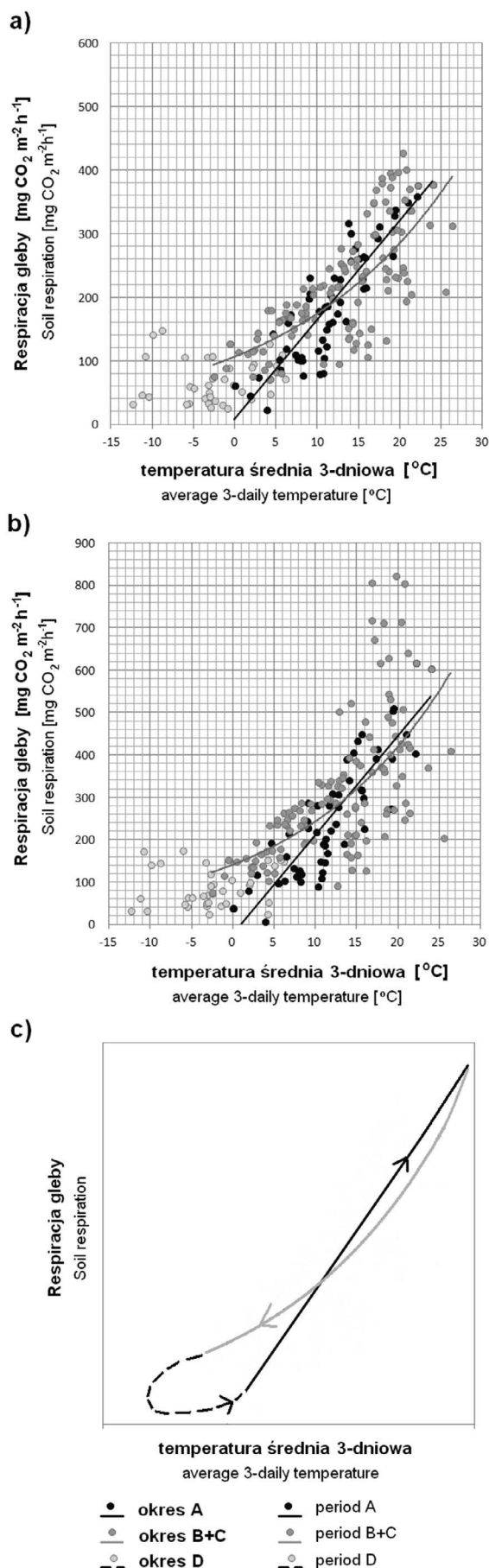
**Tabela 5. Współczynniki korelacji między (1) respiracją gleby a (2) wilgotnością względną średnią 9-dniową i wysokością opadów średnią 3-dniową**

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 <sup>st</sup> year	2. rok 2 <sup>nd</sup> year	Oba lata both years	1. rok 1 <sup>st</sup> year	2. rok 2 <sup>nd</sup> year	Oba lata both years
		B	bez ściółki/ litter free	0,131	0,196	0,215	0,299
	ze ściółką/ with litter	-0,122	<b>0,679</b>	0,495	0,360	0,023	0,234
D	bez ściółki/ litter free	<b>0,500</b>	<b>0,617</b>	<b>0,527</b>	<b>0,558</b>	0,164	<b>0,405</b>
	ze ściółką/ with litter	<b>0,510</b>	<b>0,687</b>	<b>0,510</b>	<b>0,706</b>	0,144	<b>0,706</b>

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 <sup>st</sup> year	3	bez ściółki/ litter free	<b>0,556</b>	<b>0,633</b>	<b>0,703</b>	<b>0,652</b>	<b>0,584</b>	<b>0,543</b>	<b>0,507</b>	<b>0,495</b>	<b>0,479</b>	<b>0,483</b>
		3	ze ściółką/ with litter	<b>0,559</b>	<b>0,620</b>	<b>0,749</b>	<b>0,717</b>	<b>0,660</b>	<b>0,607</b>	<b>0,566</b>	<b>0,547</b>	<b>0,537</b>	<b>0,546</b>
	rok 2. 2 <sup>nd</sup> 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	<b>0,266</b>	<b>0,318</b>	<b>0,307</b>	<b>0,269</b>	0,231	0,213	0,194	0,167	0,153
		3	ze ściółką/ with litter	<b>0,296</b>	<b>0,316</b>	<b>0,365</b>	<b>0,337</b>	<b>0,285</b>	0,229	0,223	0,210	0,183	0,155
B+C+D	rok 1. 1 <sup>st</sup> year	3	bez ściółki/ litter free	<b>0,391</b>	<b>0,451</b>	<b>0,462</b>	<b>0,430</b>	<b>0,398</b>	<b>0,376</b>	<b>0,345</b>	<b>0,325</b>	<b>0,313</b>	<b>0,307</b>
		1	ze ściółką/ with litter	<b>0,447</b>	<b>0,476</b>	<b>0,485</b>	<b>0,460</b>	<b>0,424</b>	<b>0,396</b>	<b>0,359</b>	<b>0,335</b>	<b>0,328</b>	<b>0,330</b>
	rok 2. 2 <sup>nd</sup> year	3	bez ściółki/ litter free	0,154	<b>0,241</b>	<b>0,266</b>	<b>0,247</b>	<b>0,272</b>	<b>0,242</b>	<b>0,223</b>	0,186	0,166	0,151
		1	ze ściółką/ with litter	<b>0,234</b>	<b>0,316</b>	<b>0,300</b>	<b>0,275</b>	<b>0,294</b>	<b>0,274</b>	<b>0,254</b>	<b>0,224</b>	0,220	0,211
	oba lata both years	3	bez ściółki/ litter free	<b>0,289</b>	<b>0,359</b>	<b>0,375</b>	<b>0,353</b>	<b>0,348</b>	<b>0,323</b>	<b>0,295</b>	<b>0,268</b>	<b>0,252</b>	<b>0,240</b>
		1	ze ściółką/ with litter	<b>0,342</b>	<b>0,397</b>	<b>0,396</b>	<b>0,376</b>	<b>0,369</b>	<b>0,345</b>	<b>0,313</b>	<b>0,287</b>	<b>0,279</b>	<b>0,274</b>
A+B+C+D	rok 1. 1 <sup>st</sup> year	3	bez ściółki/ litter free	<b>0,408</b>	<b>0,446</b>	<b>0,454</b>	<b>0,423</b>	<b>0,386</b>	<b>0,362</b>	<b>0,325</b>	<b>0,304</b>	<b>0,297</b>	<b>0,296</b>
		1	ze ściółką/ with litter	<b>0,424</b>	<b>0,409</b>	<b>0,401</b>	<b>0,380</b>	<b>0,341</b>	<b>0,311</b>	<b>0,270</b>	<b>0,247</b>	<b>0,247</b>	<b>0,254</b>
	rok 2. 2 <sup>nd</sup> year	3	bez ściółki/ litter free	0,061	0,175	<b>0,225</b>	<b>0,209</b>	<b>0,209</b>	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	<b>0,243</b>	<b>0,302</b>	<b>0,325</b>	<b>0,305</b>	<b>0,286</b>	<b>0,260</b>	<b>0,233</b>	<b>0,214</b>	<b>0,202</b>	<b>0,194</b>
		1	ze ściółką/ with litter	<b>0,321</b>	<b>0,346</b>	<b>0,342</b>	<b>0,321</b>	<b>0,299</b>	<b>0,269</b>	<b>0,242</b>	<b>0,224</b>	<b>0,220</b>	<b>0,216</b>

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

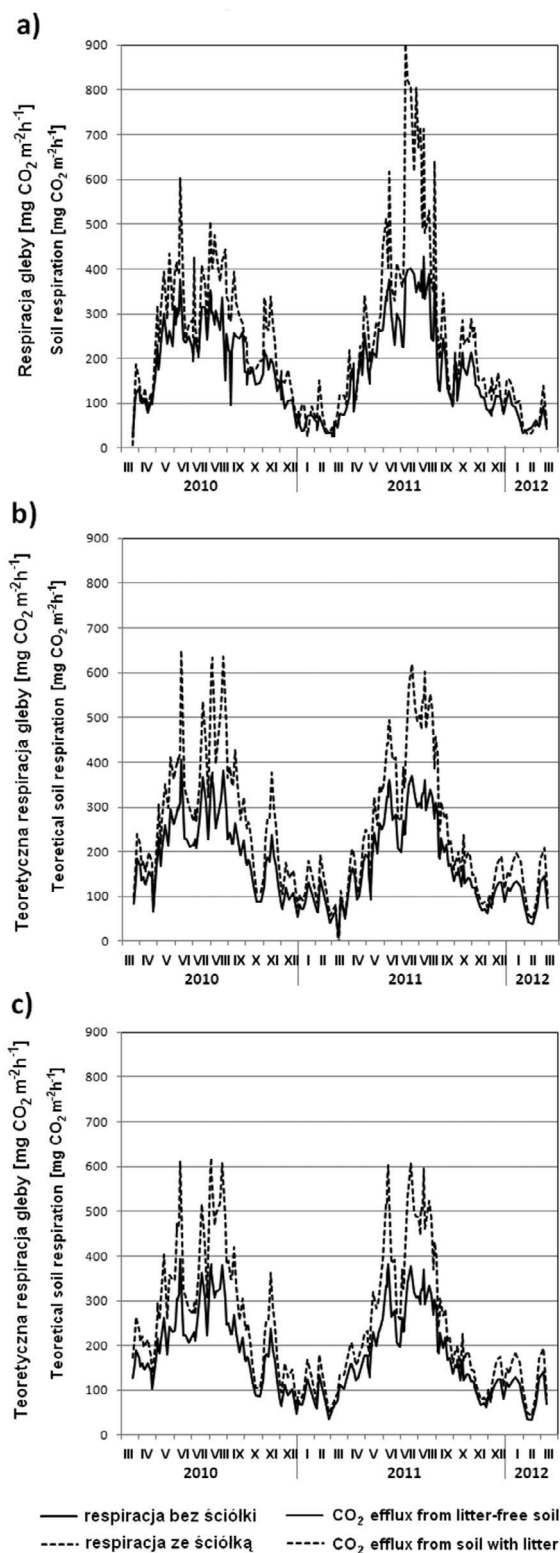
Okres Period	Rok Year	Liczba dni uśrednienia temperatury Number of days of averaging temperatur	Rodzaj stanowiska Type of re- search point	Okresy uśrednienia wysokości opadów Average precipitation from:									
				11dni	12 dni	13 dni	14 dni	15 dni	16 dni	17 dni	18 dni	19 dni	20 dni
				11 days	12 days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

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 CO<sub>2</sub> 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 R<sup>2</sup> i błędu standardowego estymacji dla obu rozpatrywanych modeli

Table 8. Values of R<sup>2</sup> 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 <sup>2</sup> Standard error of estimation	Błąd stand. estymacji R <sup>2</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub>.

## 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 14<sup>th</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> 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., Bridgman 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic* 46(3): 197–204.

## The dependence of soil CO<sub>2</sub> fluxes on atmospheric conditions during sub-periods of soil respiration

Krzysztof T. Wroński

University of Łódź, Faculty of Geographical Sciences, Department of Physical Geography, ul. Narutowicza 88, 90–139 Łódź, Poland.

Tel. + 48 504357430, e-mail: [krzysztofwr@tlen.pl](mailto:krzysztofwr@tlen.pl)

**Abstract.** Soil respiration was measured on rusty soil in a dry forest near Łódź. A two-year series of soil respiration measurements was divided into characteristic sub-periods, and the relationship between soil CO<sub>2</sub> emissions to selected aspects of climatic conditions was examined. The temperature dependence of soil CO<sub>2</sub> fluxes is linear from March to June and exponential during the period of June to March. Dividing the year into a phase of growth and a phase of decline and modelling soil respiration for each of these sub-periods separately does not significantly improve the accuracy of the model. Research shows that soil respiration responds with a delay of three days to changes in temperature and relative humidity, but with a 17-day delay to changes in precipitation.

**Keywords:** soil respiration, carbon dioxide, temperature, hysteresis

### 1. Introduction

In modelling the process of soil respiration (soil CO<sub>2</sub> emissions), it is almost universally accepted that an exponential equation best describes the dependence between the amount of soil CO<sub>2</sub> emissions and temperature (of soil and air) (Borken et al., 1999; Rochette et al., 1999; Kutsch et al., 2001; Tang et al. 2003, 2005; Zhaofu et al. 2005). In addition to temperature, soil respiration models also take into account moisture levels (amount of moisture in the soil or amount of precipitation) (Savage, Davidson 2003; Tufekcioglu, Kucuk 2004; Tang et al. 2005). The formulas for calculating soil CO<sub>2</sub> emissions vary among different authors, but these two characteristics are repeatedly found in almost all models. If they relate to an entire year, very good results are achieved.

Sometimes other factors are also taken into account, such as carbon content (Kutsch et al. 2001; Rodeghiero and Cascatti 2005), maximum leaf area index (Doran et al. 1990; Reichstein et al., 2003), pH (Reth et al. 2004), type of land use (Ardo, Olsson 2003), etc.

Meanwhile, more accurate analyses of changes in soil CO<sub>2</sub> emissions under different conditions show that a single formula is insufficient to describe soil respiration

for shorter periods of time. For example, Updegraff et al. (1998) (in a laboratory experiment) obtained different regression equations of respiration on temperature with an identical change in temperature depending on whether first generating an increase (from 6° C to 30° C), and then a drop (from 30° C to 6° C), or vice versa. In turn, Moore (1989) noted that in analysing the influence of the depth of groundwater on soil respiration, historical changes in this determinant should also be taken into account because the amount of CO<sub>2</sub> emissions differed at the same depth depending on whether the soil had been saturated with water and then dried, or whether the moisture content of the soil was increasing.

Another phenomenon worth examining is to determine the speed with which soil respiration responds to changes. Factors affecting the size of the population of soil microorganisms, mainly responsible for soil CO<sub>2</sub> emissions, i.e., temperature and moisture, are taken into account in soil respiration models, but a response in the size of this population to changes in these parameters may be delayed to a certain degree. So far, this issue has been studied by Wroński (2013, 2014) over an entire year, and Wroński and Okupny (2012) during the period of respiration growth in spring.

Received: 7.10.2014, reviewed: 1.12.2014, accepted: 10.12.2014.

The purpose of this article was to investigate:

1) the form of the dependence between soil respiration and temperature (linear or exponential) for specific phases of change in soil respiration during the year,

2) whether the ‘response’ of soil respiration to changes in air temperature, relative humidity and amount of precipitation is immediate or delayed,

3) whether dividing the entire period of soil respiration change into subperiods and modeling soil respiration for each of these subperiods increases the quality of the generated series of theoretical values of respiration.

## 2. Methodology

Measurements of soil CO<sub>2</sub> emissions were carried out using a closed chamber, which was 23 × 23 cm in size at a height of 6 cm. The lower part of the chamber was a steel frame driven into the ground, the upper part was a Plexiglas cloche. Placed inside was an Airtech vento carbon dioxide meter, manufactured by Gazex, which used the NDIR (Non-Dispersive Infrared) method, allowing CO<sub>2</sub> measurements to be taken at two points in time: 5 minutes and 10 minutes after closing the chamber. The difference in concentrations between the later and the earlier readings was converted to the volume of emitted CO<sub>2</sub> at a given time using the following formula:

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

where:

$M_{mol}$  – molar mass of CO<sub>2</sub>,

$V_{molnorm}$  – the molar volume of air under standard conditions

$\left[\frac{dm^3}{mol}\right]$ ,

$\Delta X$  – the difference in meter readings from the beginning to the end of the measurement,

$V_{pow}$  – the volume of air in the chamber (chamber volume minus the volume of the meter) [ $m^3$ ],

$T$  – temperature [ $K$ ],

$P$  – area used by the steel frame [ $m^2$ ],

$t$  – duration of the measurement [ $h$ ].

CO<sub>2</sub> emissions were measured at irregular intervals, not longer than seven days, depending on changes in the weather. The measurements were started in March 2010 and ended in March 2012. To determine whether intact or poorly distributed needles and leaves lying on the soil surface affect CO<sub>2</sub> emissions, measurements were carried out at two types of sites: soil from which all leaf litter was removed and soil on which the litter was left in place.

Measurement sites were located in a planted pine forest,

which can be classified as dry pine habitat. The area is located east of the Olechów district and south of the village of Nery (52°44'36" N, 19°34'57" E, 223 m asl) within the administrative boundaries of Łódź. It is a region where three Wartanian glacial lobes met (Turkowska 2006). The water which flowed from these lobes carried a large amount of fluvioglacial sediments to the area (Klatkova 1972; Trzmiel, Nowacki 1985, 1987), forming, therefore, favorable conditions for the emergence of a very acidic rusty soil profile (H<sub>2</sub>O pH= 4.0, KCl pH=3.5) with a mor type of humus. Sand fraction dominates throughout the soil profile, and texture class of its upper section—the part of soil most affecting the amount of respiration, is loamy sands.

In the statistical analyses, two aspects of the relationship between air temperature and respiration were considered: (1) the result of short-term changes, and (2) the result of seasonal variation.

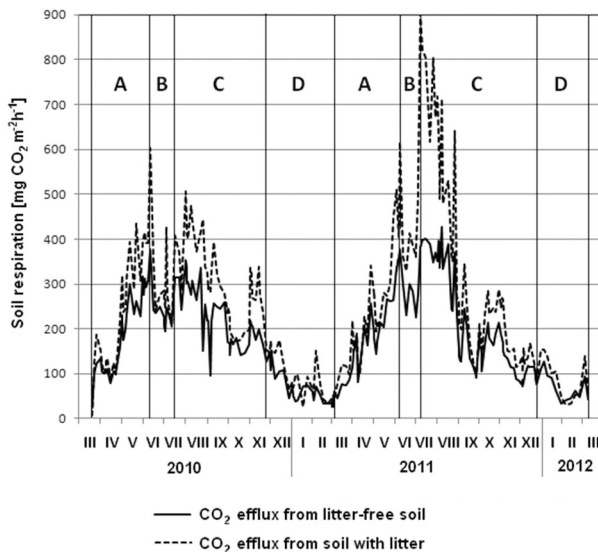
In the first case, the linear correlation coefficients between filtered series of soil respiration and air temperature were calculated. Filtration was based on subtracting moving average values from the observed values. The occurrence of a delayed reaction in soil respiration in response to changes in air temperature was also tested by calculating the correlation between the filtered series of respiration and filtered series of average temperature of 1, 2, 3, ..., 10 days. The average temperature values were calculated so that the last day of a series was the day of measuring soil respiration, i.e., the calculation of a three-day average temperature included the day of the respiration measurement and the preceding two days.

In the second case (seasonal variation), the correlation was calculated between (1) the temperature of the number of days for which the strongest correlation was observed with short term variability, and (2) soil respiration and the natural logarithm of soil respiration. On the basis of the correlation coefficient calculated in such a manner, I determined whether the relationship between the variables was linear or exponential for the considered periods. During seasonal variation, the reaction time of soil respiration to temperature change was not tested, because the properties of the correlation coefficient are such that when the curves of temperature and respiration do not exactly agree, a higher correlation is attained when the temperature curve is smoother (that is, the correlation values increase when number of days taken into account in moving average temperature increase regardless of the nature of the relationship). It was assumed a priori that in the case of seasonal variation, the strongest relationship to CO<sub>2</sub> emission occurs for the average air temperature of the same number of days as in the case of short-term variation.

For periods in which a significant correlation between respiration and temperature was observed, the strength of

the dependence and the size of the delayed reaction of soil respiration to changes in relative humidity and amount of rainfall were measured. This was done by calculating the linear correlation coefficient between the residuals of the soil respiration model based on temperature values (i.e., the observed variance between soil respiration and the soil respiration model, resulting from the distribution of temperatures), and, respectively: the relative humidity of the atmosphere (the daily average and the average of 2, 3, ..., 10 days) and amount of precipitation (daily and the average value of 2, 3, ..., 20 days). If, however, the relationship between soil respiration and temperature was exponential, the correlation with the relative humidity of the atmosphere or amount of precipitation was calculated for the residuals from the model of the natural logarithm ( $\ln$ ) of respiration, and not from the model of respiration.

The respiration model was developed using as the independent variables of temperature and the parameter of humidity (relative humidity of the atmosphere or amount of precipitation) which have the stronger correlation to soil respiration (more precisely, to deviations of actual respiration from theoretical respiration resulting from the distribution of temperatures). The value of the delay in the response of soil respiration to changes in these climatic elements was also taken into account. If during the given period, the relationship of soil respiration to temperature was linear, estimates were made using the multiple regression. However, if this relationship was exponential, the quasi-Newton method of estimation was used to determine the model.



**Figure 1.** Soil respiration at the study sites and sub-periods (A, B, C and D) of soil respiration

### 3. Results

Four distinct periods were revealed by the graphed course of soil respiration (Fig. 1). Period A is a time of increasing  $\text{CO}_2$  emissions. It usually begins about March 10, after the snow cover melts. It lasts until the end of May or beginning of June, when period B begins with a significant decrease in soil respiration. In period B, the high temperatures should stimulate soil  $\text{CO}_2$  emissions but light rains usually occur, reducing soil respiration (Wroński 2013). Period C begins in July. Initially, the value of  $\text{CO}_2$  emissions is very high, but over time, it systematically declines. The only exception is when tree leaves and needles are falling on the soil surface and begin to intensively decay, which causes respiration to rise again. Period D was distinguished due to the presence of snow cover (although snowless sub-periods can also occur during this time).

The correlation analysis of short-term changes (Table 1) showed that the strongest relationships to soil respiration usually occur with average daily temperature or average air temperatures of three days. For periods A and D, soil respiration was most strongly correlated with average 3-day temperatures; for periods B and A+B – with the average daily temperature; whereas at other times: for sites without leaf litter – with average 3-day temperature; while at sites with leaf litter – with average daily temperature.

It is worth noting that the observed correlations were relatively strong during periods of increasing respiration (period A) and stagnation of emitted  $\text{CO}_2$  amounts (period B), but weak at times of decreasing soil respiration (periods C and D).

It is surprising that for the entire first year of the study (period A+B+C+D), temperature was more strongly correlated with soil respiration than the natural logarithm  $\ln$  of respiration (Table 2), which is evidence of a linear type of relationship between these variables rather than exponential, as presumed by most authors. This result may have been the effect of the relatively low rainfall in the early summer of 2010, which is the time when soil respiration reaches its highest levels. A smaller amount of water may have reduced soil  $\text{CO}_2$  emissions when temperatures were at their highest, which modified the shape of the relationship. In the first year of the study, correlation coefficients with soil respiration (indicating a linear regression) had the greatest advantage over the correlation coefficients of the natural logarithm  $\ln$  of soil respiration (indicating an exponential dependence) for periods A and A+B – which are times of increasing soil respiration. During periods of decline (periods C, D, B+C), the value of both types of correlation coefficients was similar. The aforementioned sparse rainfall at the beginning of that summer may have

**Table 1.** Correlation coefficients between (1) filtered series of soil respiration and (2) filtered series of average temperature of 1 day, 2 days, ..., 10 days. Filtration consisted of subtracting the moving average temperature of 31 days from the observed temperature values.

Year	Period	Type of research point	Temperature average from:										
			1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days	
1 <sup>st</sup> year	A	litter free	<b>0.425</b>	<b>0.578</b>	<b>0.657</b>	<b>0.648</b>	<b>0.606</b>	<b>0.602</b>	<b>0.599</b>	<b>0.578</b>	<b>0.539</b>	<b>0.534</b>	
		with litter	<b>0.622</b>	<b>0.743</b>	<b>0.794</b>	<b>0.775</b>	<b>0.725</b>	<b>0.699</b>	<b>0.667</b>	<b>0.630</b>	<b>0.585</b>	<b>0.584</b>	
	B	litter free	<b>0.763</b>	<b>0.722</b>	<b>0.701</b>	<b>0.682</b>	<b>0.670</b>	0.645	0.570	0.544	0.567	0.537	
		with litter	<b>0.818</b>	<b>0.793</b>	<b>0.755</b>	<b>0.770</b>	<b>0.828</b>	<b>0.864</b>	<b>0.837</b>	<b>0.803</b>	<b>0.760</b>	<b>0.681</b>	
	C	litter free	<b>0.569</b>	<b>0.617</b>	<b>0.596</b>	<b>0.533</b>	<b>0.441</b>	<b>0.339</b>	<b>0.298</b>	<b>0.268</b>	<b>0.240</b>	<b>0.201</b>	
		with litter	<b>0.759</b>	<b>0.699</b>	<b>0.661</b>	<b>0.633</b>	<b>0.576</b>	<b>0.505</b>	<b>0.467</b>	<b>0.404</b>	<b>0.342</b>	<b>0.271</b>	
	D	litter free	0.059	0.038	0.149	0.131	0.099	0.082	0.100	0.127	0.160	0.179	
		with litter	<b>0.471</b>	<b>0.426</b>	<b>0.442</b>	<b>0.393</b>	0.353	0.303	0.251	0.201	0.157	0.099	
	A+B	litter free	<b>0.426</b>	<b>0.523</b>	<b>0.583</b>	<b>0.583</b>	<b>0.568</b>	<b>0.576</b>	<b>0.568</b>	<b>0.546</b>	<b>0.521</b>	<b>0.500</b>	
		with litter	<b>0.543</b>	<b>0.614</b>	<b>0.641</b>	<b>0.651</b>	<b>0.662</b>	<b>0.682</b>	<b>0.665</b>	<b>0.623</b>	<b>0.571</b>	<b>0.540</b>	
	B+C	litter free	<b>0.561</b>	<b>0.590</b>	<b>0.576</b>	<b>0.536</b>	<b>0.477</b>	<b>0.402</b>	<b>0.359</b>	<b>0.329</b>	<b>0.308</b>	<b>0.272</b>	
		with litter	<b>0.666</b>	<b>0.628</b>	<b>0.596</b>	<b>0.596</b>	<b>0.598</b>	<b>0.582</b>	<b>0.546</b>	<b>0.485</b>	<b>0.423</b>	<b>0.356</b>	
	C+D	litter free	<b>0.364</b>	<b>0.383</b>	<b>0.384</b>	<b>0.337</b>	<b>0.285</b>	0.238	0.228	0.218	0.212	0.195	
		with litter	<b>0.591</b>	<b>0.540</b>	<b>0.516</b>	<b>0.482</b>	<b>0.449</b>	<b>0.411</b>	<b>0.387</b>	<b>0.342</b>	<b>0.302</b>	<b>0.249</b>	
	B+C+D	litter free	<b>0.391</b>	<b>0.402</b>	<b>0.402</b>	<b>0.362</b>	<b>0.319</b>	<b>0.280</b>	<b>0.264</b>	<b>0.250</b>	<b>0.245</b>	<b>0.227</b>	
		with litter	<b>0.544</b>	<b>0.505</b>	<b>0.480</b>	<b>0.461</b>	<b>0.453</b>	<b>0.445</b>	<b>0.423</b>	<b>0.375</b>	<b>0.332</b>	<b>0.281</b>	
	A+B+C+D	litter free	<b>0.360</b>	<b>0.406</b>	<b>0.427</b>	<b>0.391</b>	<b>0.344</b>	<b>0.312</b>	<b>0.301</b>	<b>0.283</b>	<b>0.266</b>	<b>0.243</b>	
		with litter	<b>0.522</b>	<b>0.524</b>	<b>0.520</b>	<b>0.499</b>	<b>0.476</b>	<b>0.464</b>	<b>0.443</b>	<b>0.394</b>	<b>0.342</b>	<b>0.291</b>	
	2 <sup>nd</sup> year	A	litter free	<b>0.688</b>	<b>0.658</b>	<b>0.635</b>	<b>0.636</b>	<b>0.614</b>	<b>0.568</b>	<b>0.548</b>	<b>0.493</b>	<b>0.438</b>	<b>0.383</b>
			with litter	<b>0.445</b>	<b>0.394</b>	<b>0.422</b>	<b>0.471</b>	<b>0.500</b>	<b>0.489</b>	<b>0.470</b>	<b>0.472</b>	<b>0.489</b>	<b>0.503</b>
B		litter free	<b>0.752</b>	0.514	0.342	0.246	0.183	0.178	0.205	0.355	0.443	0.390	
		with litter	0.628	0.475	0.365	0.244	0.116	0.003	-0.044	0.107	0.198	0.168	
C		litter free	0.154	0.256	<b>0.369</b>	<b>0.365</b>	<b>0.343</b>	<b>0.304</b>	0.234	0.196	0.141	0.083	
		with litter	<b>0.262</b>	<b>0.262</b>	<b>0.262</b>	0.205	0.171	0.120	0.078	0.080	0.046	0.010	
D		litter free	0.478	0.551	<b>0.567</b>	0.545	0.440	0.325	0.252	0.225	0.202	0.178	
		with litter	<b>0.554</b>	<b>0.652</b>	<b>0.668</b>	<b>0.644</b>	<b>0.568</b>	0.495	0.448	0.439	0.418	0.387	
A+B		litter free	<b>0.679</b>	<b>0.595</b>	<b>0.527</b>	<b>0.492</b>	<b>0.456</b>	<b>0.416</b>	<b>0.405</b>	<b>0.383</b>	<b>0.352</b>	0.282	
		with litter	<b>0.438</b>	<b>0.351</b>	<b>0.316</b>	0.292	0.256	0.210	0.185	0.215	0.237	0.218	
B+C		litter free	<b>0.280</b>	<b>0.327</b>	<b>0.394</b>	<b>0.383</b>	<b>0.369</b>	<b>0.354</b>	<b>0.310</b>	<b>0.292</b>	<b>0.254</b>	0.195	
		with litter	<b>0.371</b>	<b>0.352</b>	<b>0.338</b>	<b>0.286</b>	<b>0.255</b>	0.216	0.190	0.209	0.188	0.146	

Year	Period	Type of research point	Temperature average from:									
			1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days
2 <sup>nd</sup> year	C+D	litter free	0.169	<b>0.247</b>	<b>0.333</b>	<b>0.331</b>	<b>0.304</b>	<b>0.259</b>	0.194	0.160	0.118	0.077
		with litter	<b>0.246</b>	<b>0.251</b>	<b>0.252</b>	0.207	0.175	0.129	0.094	0.096	0.072	0.047
	B+C+D	litter free	<b>0.262</b>	<b>0.302</b>	<b>0.359</b>	<b>0.351</b>	<b>0.330</b>	<b>0.301</b>	<b>0.253</b>	<b>0.232</b>	0.200	0.155
		with litter	<b>0.330</b>	<b>0.319</b>	<b>0.314</b>	<b>0.272</b>	<b>0.241</b>	0.201	0.175	0.186	0.168	0.135
	A+B+C+D	litter free	<b>0.242</b>	<b>0.284</b>	<b>0.340</b>	<b>0.329</b>	<b>0.307</b>	<b>0.279</b>	<b>0.235</b>	<b>0.213</b>	<b>0.178</b>	0.133
		with litter	<b>0.307</b>	<b>0.298</b>	<b>0.289</b>	<b>0.240</b>	<b>0.208</b>	<b>0.170</b>	<b>0.149</b>	<b>0.160</b>	<b>0.140</b>	0.108
Both years	A	litter free	<b>0.564</b>	<b>0.619</b>	<b>0.638</b>	<b>0.633</b>	<b>0.602</b>	<b>0.573</b>	<b>0.562</b>	<b>0.525</b>	<b>0.480</b>	<b>0.449</b>
		with litter	<b>0.526</b>	<b>0.550</b>	<b>0.580</b>	<b>0.593</b>	<b>0.584</b>	<b>0.568</b>	<b>0.547</b>	<b>0.536</b>	<b>0.529</b>	<b>0.536</b>
	B	litter free	<b>0.747</b>	<b>0.607</b>	<b>0.515</b>	0.452	0.412	0.406	0.384	0.437	0.485	0.434
		with litter	<b>0.678</b>	<b>0.583</b>	<b>0.511</b>	0.448	0.396	0.364	0.333	0.390	0.408	0.349
	C	litter free	<b>0.332</b>	<b>0.412</b>	<b>0.465</b>	<b>0.434</b>	<b>0.382</b>	<b>0.318</b>	<b>0.260</b>	<b>0.226</b>	<b>0.184</b>	<b>0.136</b>
		with litter	<b>0.388</b>	<b>0.370</b>	<b>0.358</b>	<b>0.309</b>	<b>0.270</b>	<b>0.217</b>	<b>0.179</b>	<b>0.164</b>	<b>0.127</b>	<b>0.084</b>
	D	litter free	0.221	0.232	0.296	0.269	0.211	0.164	0.151	0.158	0.168	0.171
		with litter	0.504	<b>0.513</b>	<b>0.523</b>	<b>0.477</b>	<b>0.424</b>	<b>0.371</b>	<b>0.325</b>	0.293	0.258	0.209
	A+B	litter free	<b>0.567</b>	<b>0.565</b>	<b>0.552</b>	<b>0.531</b>	<b>0.503</b>	<b>0.485</b>	<b>0.478</b>	<b>0.459</b>	<b>0.432</b>	<b>0.384</b>
		with litter	<b>0.479</b>	<b>0.454</b>	<b>0.442</b>	<b>0.427</b>	<b>0.407</b>	<b>0.389</b>	<b>0.373</b>	<b>0.379</b>	<b>0.374</b>	<b>0.349</b>
Obalata / Both years	B+C	litter free	<b>0.403</b>	<b>0.444</b>	<b>0.473</b>	<b>0.448</b>	<b>0.415</b>	<b>0.374</b>	<b>0.330</b>	<b>0.307</b>	<b>0.277</b>	<b>0.229</b>
		with litter	<b>0.458</b>	<b>0.434</b>	<b>0.415</b>	<b>0.382</b>	<b>0.362</b>	<b>0.333</b>	<b>0.307</b>	<b>0.297</b>	<b>0.264</b>	<b>0.215</b>
	C+D	litter free	<b>0.261</b>	<b>0.310</b>	<b>0.352</b>	<b>0.326</b>	<b>0.288</b>	<b>0.243</b>	<b>0.208</b>	<b>0.186</b>	0.164	0.137
		with litter	<b>0.341</b>	<b>0.327</b>	<b>0.319</b>	<b>0.282</b>	<b>0.253</b>	<b>0.216</b>	<b>0.188</b>	<b>0.175</b>	0.150	0.119
	B+C+D	litter free	<b>0.319</b>	<b>0.344</b>	<b>0.372</b>	<b>0.347</b>	<b>0.316</b>	<b>0.281</b>	<b>0.251</b>	<b>0.233</b>	<b>0.214</b>	<b>0.184</b>
		with litter	<b>0.392</b>	<b>0.370</b>	<b>0.357</b>	<b>0.326</b>	<b>0.307</b>	<b>0.281</b>	<b>0.258</b>	<b>0.245</b>	<b>0.218</b>	<b>0.180</b>
	A+B+C+D	litter free	<b>0.358</b>	<b>0.393</b>	<b>0.419</b>	<b>0.397</b>	<b>0.363</b>	<b>0.329</b>	<b>0.302</b>	<b>0.273</b>	<b>0.242</b>	<b>0.205</b>
		with litter	<b>0.396</b>	<b>0.385</b>	<b>0.383</b>	<b>0.360</b>	<b>0.341</b>	<b>0.317</b>	<b>0.294</b>	<b>0.276</b>	<b>0.244</b>	<b>0.207</b>

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

A, B, C, D as in Figure 1

affected the higher correlation with soil respiration compared to the correlation with the natural logarithm  $\ln$  for respiration during periods C+D and B+C+D.

In the second year of the study, values of the two types of correlation coefficients were similar for periods A, B, A+B. On the other hand, a clear exponential dependence was

found between soil respiration and temperature for periods C, D, and especially C+D and B+C+D.

Over the whole period under discussion, a linear type of relationship was evident for periods A and A+B (when respiration increased), but it was exponential for periods C, D, B+C, C+D, and B+C+D (times of decreasing respi-

**Table 2.** Correlation coefficients between (1) soil respiration and the natural logarithm of soil respiration and (2) average daily temperature or average temperature of 3 days

Period	Type of research point	1 <sup>st</sup> year		2 <sup>nd</sup> year		Both years		Number of days of averaging temperature
		Relationship				linear	expo-tential	
		linear	expo-tential	linear	expo-tential			
A	litter free	<b>0.878</b>	<b>0.819</b>	<b>0.914</b>	<b>0.880</b>	<b>0.891</b>	<b>0.838</b>	3
	with litter	<b>0.911</b>	<b>0.788</b>	<b>0.854</b>	<b>0.866</b>	<b>0.869</b>	<b>0.791</b>	3
B	litter free	0.498	0.438	<b>0.730</b>	<b>0.731</b>	<b>0.464</b>	<b>0.421</b>	1
	with litter	0.638	0.608	0.398	0.393	0.302	<b>0.278</b>	1
C	litter free	<b>0.863</b>	<b>0.821</b>	<b>0.736</b>	<b>0.758</b>	<b>0.757</b>	<b>0.755</b>	3
	with litter	<b>0.890</b>	<b>0.880</b>	<b>0.555</b>	<b>0.663</b>	<b>0.596</b>	<b>0.685</b>	1
D	litter free	-0.203	-0.119	<b>0.714</b>	<b>0.731</b>	0.123	0.187	3
	with litter	-0.102	-0.089	<b>0.786</b>	<b>0.847</b>	-0.102	0.268	3
A+B	litter free	<b>0.703</b>	<b>0.644</b>	<b>0.903</b>	<b>0.877</b>	<b>0.801</b>	<b>0.755</b>	1
	with litter	<b>0.682</b>	<b>0.576</b>	<b>0.760</b>	<b>0.840</b>	<b>0.705</b>	<b>0.686</b>	1
B+C	litter free	<b>0.760</b>	<b>0.746</b>	<b>0.743</b>	<b>0.768</b>	<b>0.729</b>	<b>0.741</b>	3
	with litter	<b>0.701</b>	<b>0.709</b>	<b>0.557</b>	<b>0.679</b>	<b>0.548</b>	<b>0.657</b>	1
C+D	litter free	<b>0.875</b>	<b>0.798</b>	<b>0.774</b>	<b>0.841</b>	<b>0.813</b>	<b>0.819</b>	3
	with litter	<b>0.882</b>	<b>0.783</b>	<b>0.555</b>	<b>0.791</b>	<b>0.704</b>	<b>0.790</b>	1
B+C+D	litter free	<b>0.861</b>	<b>0.803</b>	<b>0.785</b>	<b>0.849</b>	<b>0.811</b>	<b>0.824</b>	3
	with litter	<b>0.836</b>	<b>0.775</b>	<b>0.557</b>	<b>0.802</b>	<b>0.684</b>	<b>0.789</b>	1
A+B+C+D	litter free	<b>0.824</b>	<b>0.786</b>	<b>0.779</b>	<b>0.846</b>	<b>0.803</b>	<b>0.814</b>	3
	with litter	<b>0.794</b>	<b>0.708</b>	<b>0.543</b>	<b>0.797</b>	<b>0.681</b>	<b>0.753</b>	1

Statistically significant values (at significance level  $\alpha = 0.05$ ) are indicated with bold numerals A, B, C, D as in Figure 1

ration). Both types of correlation coefficient were similar during period B.

Because the correlation with temperature was most often not statistically significant for periods B and D, I examined whether another climatic factor may have had a stronger effect on the amount of soil respiration in these periods (B and D). The analysis was performed in the same manner as was done to determine the dependence between respiration and temperature. However, both atmospheric relative humidity (Table 3), and the amount of precipitation (Table 4), had a not significant effect on the short-term variability of soil respiration. In the case of seasonal variation (Table 5),

a significant correlation in both years was found only for relative humidity (9-day average), but at correlation coefficient values of 0.50–0.70 describe only 0.25–0.49% of the variability of soil respiration and this was not suitable to CO<sub>2</sub> emission model.

Given this situation, the most reasonable solution for the purpose of modelling was to divide the entire period of respiration variance into two sub-periods: A and B+C+D or A+B and C+D (Fig. 2). Because higher correlation coefficients were obtained for the first of these possibilities (Table 2), it was used in later stages of the work. I checked whether distinguishing period A, which

**Table 3.** Correlation coefficients between (1) filtered series of soil respiration and (2) filtered series of average relative humidity of 1 day, 2 days, ..., 10 days. Filtration consisted of subtracting the moving averages of the temperature of 31 days from observed temperature values.

Period	Year	Number of days of averaging temperature	Type of research point	Average relative moisture from:									
				1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days
B	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	-0.172	-0.234	-0.139	-0.130	-0.069	-0.273	-0.357	-0.494	-0.561	-0.591
		3	with litter	-0.229	-0.485	-0.378	-0.374	-0.343	-0.582	<b>-0.698</b>	<b>-0.758</b>	<b>-0.800</b>	<b>-0.793</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.100	0.096	-0.024	-0.059	-0.037	-0.029	-0.016	0.002	0.015	0.046
		3	with litter	-0.044	0.028	-0.035	-0.025	-0.054	-0.077	-0.082	-0.063	-0.046	-0.015
	both years	3	litter free	-0.335	-0.223	-0.179	-0.124	0.059	0.056	0.134	0.097	0.075	0.064
		3	with litter	-0.170	-0.109	-0.089	-0.034	0.132	0.136	0.205	0.182	0.220	0.229
D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	0.100	0.096	-0.024	-0.059	-0.037	-0.029	-0.016	0.002	0.015	0.046
		1	with litter	-0.044	0.028	-0.035	-0.025	-0.054	-0.077	-0.082	-0.063	-0.046	-0.015
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	-0.004	0.163	0.219	0.290	0.275	0.144	0.050	0.039	0.043	0.089
		1	with litter	0.064	0.308	0.330	0.417	0.379	0.295	0.218	0.237	0.269	0.343
	both years	3	litter free	0.063	0.109	0.055	0.055	0.067	0.031	0.007	0.015	0.024	0.061
		1	with litter	-0.005	0.120	0.100	0.131	0.099	0.057	0.024	0.046	0.072	0.128

Statistically significant values (at significance level  $\alpha = 0.05$ ) are indicated with bold numerals B, D as in Figure 1

has a linear increase of  $\text{CO}_2$  with temperature, and period B+C+D, when  $\text{CO}_2$  respiration decreases exponentially, improves the quality of the soil respiration models in relationship to time.

It should be noted, however, that the potential model could provide better results if a satisfactory formula for the calculation of soil respiration in winter could be found in the future. However, most likely it will take into account neither weather conditions nor even the physical processes of the soil, but its biological processes. The research of Zimov et al. (1993) found that the high variability of  $\text{CO}_2$  flow in this period is accompanied by relatively stable physical parameters. Figure 2 shows how changes occur in the relationship of soil respiration to average 3-day temperatures over a year, divided into these three periods (A, B+C and D). While respiration increases quite rapidly with increasing temperatures in period A, the decrease in respiration during period B+C is gradual, especially in late autumn. It is impossible, therefore, to formulate a single equation to calculate the amount of  $\text{CO}_2$  emissions based on temperature, but the

configurations of this variable over time result in a graph presenting a quasi-hysteresis loop.

Air temperature served as the basis for the model. In addition to temperature, the most important factor affecting the amount of soil respiration is moisture, which is why the model was supplemented with the relative humidity of the atmosphere or the amount of precipitation. An approximately 3-day delay was confirmed in the response of soil respiration to changes in relative humidity (in both periods A and B+C+D, as well as in the entire year) (Table 6). The delay is greater in the relationship of soil respiration to level of precipitation, usually ranging approximately 17–18 days in periods B+C+D and the entire year. In the second year of the study, soil respiration reacted more quickly in period A, amounting to 7–8 days (Table 7).

It was also noted that soil respiration (more precisely, the deviations of soil respiration from theoretical respiration, resulting from the temperature distribution) had a stronger relationship to the amount of precipitation than to the relative humidity of the atmosphere. An exception

**Table 4.** Correlation coefficient between (1) filtrem series of soil respiration and (2) filtred series of average 1-daily, 2-daily, .... 10-daily precipitation. Filtration consisted in subtraction moving average 31-daily temperature from observed values of temperature.

Period	Year	Number of days of averaging temperatur	Type of research point	Average precipitation from:									
				1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days
B	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	-0.096	-0.281	-0.230	-0.366	-0.418	-0.563	-0.580	-0.616	-0.608	-0.726
		3	with litter	0.202	-0.003	-0.097	-0.164	-0.216	-0.448	-0.558	-0.571	-0.550	-0.635
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	-0.268	0.017	0.321	0.160	0.137	0.152	0.146	0.095	0.187	0.228
		3	with litter	0.348	0.627	0.597	0.196	0.189	0.166	0.129	0.116	0.014	0.022
	both years	3	litter free	-0.291	-0.249	-0.322	-0.311	-0.111	-0.116	0.125	0.145	0.164	0.087
		3	with litter	-0.217	-0.172	-0.258	-0.258	0.037	0.018	0.221	0.233	0.240	0.179
D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	-0.268	0.017	0.321	0.160	0.137	0.152	0.146	0.095	0.187	0.228
		1	with litter	0.348	<b>0.627</b>	<b>0.597</b>	0.196	0.189	0.166	0.129	0.116	0.014	0.022
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.112	0.239	0.211	0.349	0.406	0.119	-0.017	-0.058	-0.056	0.020
		1	with litter	0.162	0.107	0.095	0.289	0.330	0.166	-0.002	0.066	0.008	0.044
	both years	3	litter free	-0.103	0.086	0.266	0.215	0.204	0.137	0.095	0.048	0.103	0.146
		1	with litter	0.265	<b>0.450</b>	<b>0.374</b>	0.220	0.221	0.165	0.091	0.101	0.015	0.035

Statistically significant values (at significance level a = 0.05) are indicated with bold numerals B, D as in Figure 1

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

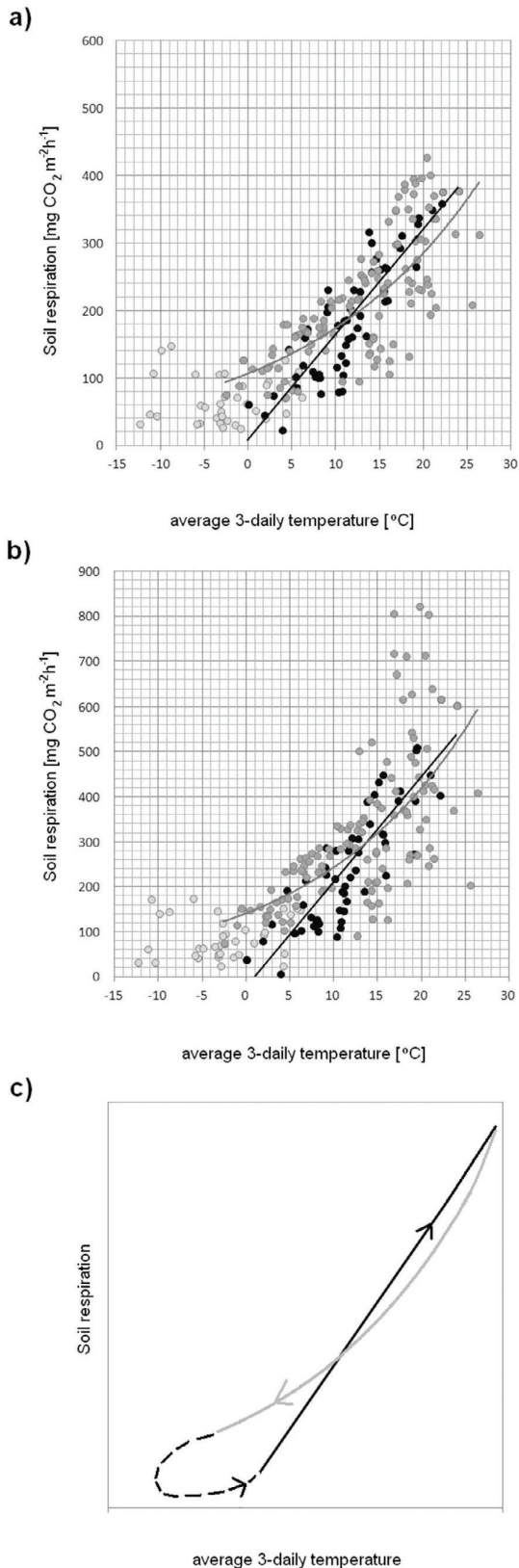
Period	Type of research point	Average 9-daily relative moisture			Average 3-daily precipitation		
		1 <sup>st</sup> year	2 <sup>nd</sup> year	both years	1 <sup>st</sup> year	2 <sup>nd</sup> year	both years
B	litter free	0.131	0.196	0.215	0.299	-0.312	0.007
	with litter	-0.122	<b>0.679</b>	0.495	0.360	0.023	0.234
D	litter free	<b>0.500</b>	<b>0.617</b>	<b>0.527</b>	<b>0.558</b>	0.164	<b>0.405</b>
	with litter	<b>0.510</b>	<b>0.687</b>	<b>0.510</b>	<b>0.706</b>	0.144	<b>0.706</b>

Statistically significant values (at significance level a = 0.05) are indicated with bold numerals B, D as in Figure 1

to this rule was noted for period A only in the first year of the study.

As a result of the above analysis, the average temperature of 3 days and the average precipitation of 17 days were adopted as the independent variables for the model. Although a better fit was obtained with average daily temperature and average precipitation of 5, 7, 8, 18 days in

some periods, the differences in the strength of the correlation with soil respiration (or with the deviations of soil respiration from theoretical respiration resulting from the temperature distribution in the case of amount of precipitation) are not large. It was therefore accepted that for period A, the relationship of soil respiration to temperature is described by a linear equation, while in period B+C+D, by



exponential equation. In both sub-periods, it was accepted that high precipitation limits  $\text{CO}_2$  emissions, so for period A, the equation describing respiration is:

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

while for period B+C+D, it is:

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

where:  $R$  – the theoretical respirations of the soil for the given day,

$T$  – average temperature of 3 days,

$W$  – average precipitation of 17 days,

$a, b, c, d, f$  – empirical coefficients.

It is assumed that period A starts on March 11 and ends on June 10, while period B+C+D begins on June 11 and ends on 10 March. Such a proposed model was compared with a model for the entire study period, which took into account the exponential form of the dependence between  $\text{CO}_2$  emissions and temperature, as well as the limiting effect of high precipitation on soil respiration. This model takes the following form:

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

Dividing the whole period of soil respiration variability by the time of its growth (period A) and decrease (period B+C+D) in modelling the process of soil respiration improved the accuracy of the theoretical values of respiration to some extent. This is especially evident for values from May and early June (Fig. 3). However, the standard error of the estimate and the coefficients of determination  $R^2$  for both considered models are almost identical (Table 8, Fig. 4). This means that including the different shapes of the dependence of  $\text{CO}_2$  emission amounts in periods A and B+C+D does not significantly improve the quality of the respiration model, so the use of a single formula for the entire period of variability provides satisfactory results.

**Figure 2.** Regression curve of soil respiration and average temperature of 3 days in distinguished periods A and B+C at study sites without leaf litter (a) and with litter (B) and a schematic diagram presenting how the relationship between soil respiration and average 3-day temperature changes during the year. A, B, C, D / as in Figure 1.

**Table 6.** Correlation coefficients between (1) average relative humidity of 1 day, 2 days, .... 10 days and (2) residuals of the respiration model based on average temperature values of 3 days (during period A) and the residuals of the natural logarithm model of respiration based on average daily or average 3-day temperatures (in periods B+C+D and A+B+C+D)

Period	Year	Number of days of averaging temperatur	Type of research point	Average precipitation from:									
				1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days
A	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.556</b>	<b>0.633</b>	<b>0.703</b>	<b>0.652</b>	<b>0.584</b>	<b>0.543</b>	<b>0.507</b>	<b>0.495</b>	<b>0.479</b>	<b>0.483</b>
		3	with litter	<b>0.559</b>	<b>0.620</b>	<b>0.749</b>	<b>0.717</b>	<b>0.660</b>	<b>0.607</b>	<b>0.566</b>	<b>0.547</b>	<b>0.537</b>	<b>0.546</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	-0.090	0.047	0.158	0.163	0.154	0.088	0.079	0.046	-0.015	-0.051
		3	with litter	0.105	0.229	0.284	0.215	0.136	0.035	0.060	0.056	-0.011	-0.092
	both years	3	litter free	0.235	<b>0.266</b>	<b>0.318</b>	<b>0.307</b>	<b>0.269</b>	0.231	0.213	0.194	0.167	0.153
		3	with litter	<b>0.296</b>	<b>0.316</b>	<b>0.365</b>	<b>0.337</b>	<b>0.285</b>	0.229	0.223	0.210	0.183	0.155
B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.391</b>	<b>0.451</b>	<b>0.462</b>	<b>0.430</b>	<b>0.398</b>	<b>0.376</b>	<b>0.345</b>	<b>0.325</b>	<b>0.313</b>	<b>0.307</b>
		1	with litter	<b>0.447</b>	<b>0.476</b>	<b>0.485</b>	<b>0.460</b>	<b>0.424</b>	<b>0.396</b>	<b>0.359</b>	<b>0.335</b>	<b>0.328</b>	<b>0.330</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.154	<b>0.241</b>	<b>0.266</b>	<b>0.247</b>	<b>0.272</b>	<b>0.242</b>	<b>0.223</b>	0.186	0.166	0.151
		1	with litter	<b>0.234</b>	<b>0.316</b>	<b>0.300</b>	<b>0.275</b>	<b>0.294</b>	<b>0.274</b>	<b>0.254</b>	<b>0.224</b>	0.220	0.211
	both years	3	litter free	<b>0.289</b>	<b>0.359</b>	<b>0.375</b>	<b>0.353</b>	<b>0.348</b>	<b>0.323</b>	<b>0.295</b>	<b>0.268</b>	<b>0.252</b>	<b>0.240</b>
		1	with litter	<b>0.342</b>	<b>0.397</b>	<b>0.396</b>	<b>0.376</b>	<b>0.369</b>	<b>0.345</b>	<b>0.313</b>	<b>0.287</b>	<b>0.279</b>	<b>0.274</b>
A+B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.408</b>	<b>0.446</b>	<b>0.454</b>	<b>0.423</b>	<b>0.386</b>	<b>0.362</b>	<b>0.325</b>	<b>0.304</b>	<b>0.297</b>	<b>0.296</b>
		1	with litter	<b>0.424</b>	<b>0.409</b>	<b>0.401</b>	<b>0.380</b>	<b>0.341</b>	<b>0.311</b>	<b>0.270</b>	<b>0.247</b>	<b>0.247</b>	<b>0.254</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.061	0.175	<b>0.225</b>	<b>0.209</b>	<b>0.209</b>	0.179	0.165	0.145	0.128	0.114
		1	with litter	0.232	0.330	0.343	0.320	0.310	0.280	0.266	0.250	0.243	0.229
	both years	3	litter free	<b>0.243</b>	<b>0.302</b>	<b>0.325</b>	<b>0.305</b>	<b>0.286</b>	<b>0.260</b>	<b>0.233</b>	<b>0.214</b>	<b>0.202</b>	<b>0.194</b>
		1	with litter	<b>0.321</b>	<b>0.346</b>	<b>0.342</b>	<b>0.321</b>	<b>0.299</b>	<b>0.269</b>	<b>0.242</b>	<b>0.224</b>	<b>0.220</b>	<b>0.216</b>

Statistically significant values (at significance level  $\alpha = 0.05$ ) are indicated with bold numerals A, B, C, D as in Figure 1

#### 4. Discussion

Soil respiration, like any other phenomenon in nature, defies attempts to be described with simple mathematical formulas. However, mathematical modelling makes it easier to predict changes in soil CO<sub>2</sub> emissions, thus increasing the need to improve these models.

Exceptions to the exponential shape of the relationship between soil respiration and temperature has been observed, among others, by Rodeghiero and Cascatti (2005).

According to these authors, soil respiration is lower at the highest temperatures than would be expected from the exponential equation due to the decrease in humidity at high temperatures. Chapman and Thurlow (1996), Fang and Moncrieff (2001) and Falge et al. (2002) believe that the relationship between soil respiration and temperature is best described by the Arrhenius equation. On the other hand, Tufekcioglu and Kucuk (2004) treat this as a rectilinear relationship. I believe that the dependence of soil respiration to air temperature is fairly well described by

**Table 7.** Correlation coefficients between (1) average precipitation of 1 day, 2 days, .... 20 days and (2) residuals of the soil respiration model based on average temperature values of 3 days (in period A) and residuals of the natural logarithm soil respiration model based on average 1-day or average 3-day temperatures (in periods B+C+D and A+B+C+D)

Period	Year	Number of days of averaging temperatur	Type of research point	Average precipitation from:									
				1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	6 days	7 days	8 days	9 days	10 days
A	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	0.325	<b>0.552</b>	<b>0.664</b>	<b>0.680</b>	<b>0.674</b>	<b>0.620</b>	<b>0.592</b>	<b>0.628</b>	<b>0.635</b>	<b>0.604</b>
		3	with litter	0.269	<b>0.493</b>	<b>0.602</b>	<b>0.653</b>	<b>0.728</b>	<b>0.682</b>	<b>0.648</b>	<b>0.685</b>	<b>0.687</b>	<b>0.656</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	-0.148	0.136	0.303	<b>0.448</b>	<b>0.453</b>	<b>0.482</b>	<b>0.533</b>	<b>0.506</b>	<b>0.466</b>	<b>0.467</b>
		3	with litter	-0.014	<b>0.425</b>	<b>0.585</b>	<b>0.535</b>	<b>0.445</b>	<b>0.416</b>	<b>0.573</b>	<b>0.588</b>	<b>0.528</b>	0.484
	both years	3	litter free	0.142	<b>0.349</b>	<b>0.462</b>	<b>0.525</b>	<b>0.529</b>	<b>0.493</b>	<b>0.476</b>	<b>0.501</b>	<b>0.495</b>	<b>0.461</b>
		3	with litter	<b>0.132</b>	<b>0.379</b>	<b>0.473</b>	<b>0.484</b>	<b>0.500</b>	<b>0.463</b>	<b>0.477</b>	<b>0.511</b>	<b>0.496</b>	<b>0.454</b>
B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	-0.020	0.036	0.121	0.223	<b>0.265</b>	<b>0.315</b>	<b>0.306</b>	<b>0.312</b>	<b>0.358</b>	<b>0.370</b>
		1	with litter	0.197	<b>0.297</b>	<b>0.349</b>	<b>0.386</b>	<b>0.400</b>	<b>0.426</b>	<b>0.412</b>	<b>0.423</b>	<b>0.450</b>	<b>0.460</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.093	0.204	<b>0.337</b>	<b>0.374</b>	<b>0.403</b>	<b>0.393</b>	<b>0.427</b>	<b>0.417</b>	<b>0.392</b>	<b>0.383</b>
		1	with litter	<b>0.230</b>	<b>0.327</b>	<b>0.425</b>	<b>0.447</b>	<b>0.482</b>	<b>0.488</b>	<b>0.517</b>	<b>0.530</b>	<b>0.534</b>	<b>0.516</b>
	both years	3	litter free	0.007	0.117	<b>0.211</b>	<b>0.281</b>	<b>0.316</b>	<b>0.338</b>	<b>0.340</b>	<b>0.332</b>	<b>0.352</b>	<b>0.359</b>
		1	with litter	<b>0.184</b>	<b>0.314</b>	<b>0.376</b>	<b>0.401</b>	<b>0.422</b>	<b>0.429</b>	<b>0.426</b>	<b>0.425</b>	<b>0.438</b>	<b>0.444</b>
A+B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	0.040	0.143	<b>0.218</b>	<b>0.291</b>	<b>0.323</b>	<b>0.328</b>	<b>0.309</b>	<b>0.327</b>	<b>0.367</b>	<b>0.371</b>
		1	with litter	<b>0.197</b>	<b>0.286</b>	<b>0.327</b>	<b>0.358</b>	<b>0.370</b>	<b>0.344</b>	<b>0.319</b>	<b>0.350</b>	<b>0.379</b>	<b>0.380</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	0.030	0.185	<b>0.321</b>	<b>0.375</b>	<b>0.381</b>	<b>0.387</b>	<b>0.417</b>	<b>0.409</b>	<b>0.384</b>	<b>0.378</b>
		1	with litter	<b>0.206</b>	<b>0.359</b>	<b>0.454</b>	<b>0.460</b>	<b>0.463</b>	<b>0.472</b>	<b>0.506</b>	<b>0.505</b>	<b>0.507</b>	<b>0.498</b>
	both years	3	litter free	0.030	<b>0.160</b>	<b>0.252</b>	<b>0.316</b>	<b>0.337</b>	<b>0.335</b>	<b>0.327</b>	0.333	0.351	0.351
		1	with litter	<b>0.181</b>	<b>0.312</b>	<b>0.364</b>	<b>0.385</b>	<b>0.389</b>	<b>0.364</b>	<b>0.352</b>	<b>0.367</b>	<b>0.385</b>	<b>0.383</b>

Period	Year	Number of days of averaging temperatur	Type of research point	Average precipitation from:									
				11 days	12 days	13 days	14 days	15 days	16 days	17 days	18 days	19 days	20 days
A	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.627</b>	<b>0.649</b>	<b>0.621</b>	<b>0.614</b>	<b>0.678</b>	<b>0.684</b>	<b>0.685</b>	<b>0.688</b>	<b>0.656</b>	<b>0.637</b>
		3	with litter	<b>0.674</b>	<b>0.698</b>	<b>0.703</b>	<b>0.700</b>	<b>0.724</b>	<b>0.720</b>	<b>0.728</b>	<b>0.713</b>	<b>0.647</b>	<b>0.612</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	<b>0.448</b>	<b>0.498</b>	<b>0.496</b>	<b>0.487</b>	<b>0.484</b>	<b>0.465</b>	<b>0.450</b>	<b>0.438</b>	<b>0.420</b>	<b>0.401</b>
		3	with litter	<b>0.431</b>	<b>0.488</b>	<b>0.489</b>	<b>0.524</b>	<b>0.510</b>	<b>0.430</b>	<b>0.431</b>	<b>0.446</b>	<b>0.437</b>	<b>0.392</b>
	both years	3	litter free	<b>0.457</b>	<b>0.485</b>	<b>0.473</b>	<b>0.466</b>	<b>0.504</b>	<b>0.506</b>	<b>0.505</b>	<b>0.505</b>	<b>0.477</b>	<b>0.456</b>
		3	with litter	<b>0.435</b>	<b>0.471</b>	<b>0.486</b>	<b>0.494</b>	<b>0.500</b>	<b>0.475</b>	<b>0.480</b>	<b>0.478</b>	<b>0.443</b>	<b>0.410</b>

Period	Year	Number of days of averaging temperatur	Type of research point	Average precipitation from:									
				11 days	12 days	13 days	14 days	15 days	16 days	17 days	18 days	19 days	20 days
B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.383</b>	<b>0.387</b>	<b>0.394</b>	<b>0.406</b>	<b>0.419</b>	<b>0.447</b>	<b>0.474</b>	<b>0.484</b>	<b>0.477</b>	<b>0.456</b>
		1	with litter	<b>0.507</b>	<b>0.524</b>	<b>0.533</b>	<b>0.539</b>	<b>0.537</b>	<b>0.559</b>	<b>0.580</b>	<b>0.582</b>	<b>0.568</b>	<b>0.547</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	<b>0.390</b>	<b>0.395</b>	<b>0.407</b>	<b>0.414</b>	<b>0.411</b>	<b>0.417</b>	<b>0.424</b>	<b>0.404</b>	<b>0.421</b>	<b>0.418</b>
		1	with litter	<b>0.509</b>	<b>0.502</b>	<b>0.525</b>	<b>0.537</b>	<b>0.534</b>	<b>0.527</b>	<b>0.527</b>	<b>0.513</b>	<b>0.519</b>	<b>0.513</b>
	both years	3	litter free	<b>0.372</b>	<b>0.377</b>	<b>0.382</b>	<b>0.394</b>	<b>0.403</b>	<b>0.423</b>	<b>0.443</b>	<b>0.442</b>	<b>0.442</b>	<b>0.430</b>
		1	with litter	<b>0.471</b>	<b>0.479</b>	<b>0.488</b>	<b>0.498</b>	<b>0.500</b>	<b>0.510</b>	<b>0.525</b>	<b>0.521</b>	<b>0.513</b>	<b>0.503</b>
A+B+C+D	1 <sup>st</sup> year	3	litter free	<b>0.390</b>	<b>0.402</b>	<b>0.407</b>	<b>0.415</b>	<b>0.432</b>	<b>0.456</b>	<b>0.475</b>	<b>0.487</b>	<b>0.480</b>	<b>0.460</b>
		1	with litter	<b>0.421</b>	<b>0.442</b>	<b>0.453</b>	<b>0.454</b>	<b>0.457</b>	<b>0.469</b>	<b>0.481</b>	<b>0.487</b>	<b>0.477</b>	<b>0.461</b>
	2 <sup>nd</sup> year	3	litter free	<b>0.386</b>	<b>0.397</b>	<b>0.405</b>	<b>0.410</b>	<b>0.410</b>	<b>0.414</b>	<b>0.420</b>	<b>0.403</b>	<b>0.416</b>	<b>0.413</b>
		1	with litter	<b>0.492</b>	<b>0.493</b>	<b>0.516</b>	<b>0.525</b>	<b>0.523</b>	<b>0.511</b>	<b>0.515</b>	<b>0.503</b>	<b>0.511</b>	<b>0.504</b>
	both years	3	litter free	<b>0.366</b>	<b>0.377</b>	<b>0.381</b>	<b>0.389</b>	<b>0.403</b>	<b>0.419</b>	<b>0.434</b>	<b>0.435</b>	<b>0.431</b>	<b>0.418</b>
		1	with litter	<b>0.408</b>	<b>0.420</b>	<b>0.433</b>	<b>0.439</b>	<b>0.444</b>	<b>0.446</b>	<b>0.456</b>	<b>0.455</b>	<b>0.445</b>	<b>0.435</b>

Statistically significant values (at significance level  $\alpha = 0.05$ ) are indicated with bold numerals A. B. C. D as in Figure 1

the exponential equation in the period of decreasing respiration (from June to March) and by the linear equation when respiration is increasing (March to June). Parkin and Kaspar (2003) noted a similar shape to the course of CO<sub>2</sub> soil emissions and the phenomenon of hysteresis, but in a diurnal cycle. When the temperature rose between 6:00 and 12:00, soil respiration increased very quickly, stabilizing at approx. 13:00 despite further increases in temperature, and the exponential shape of the relationship between soil CO<sub>2</sub> emissions and temperature occurred only as respiration decreased.

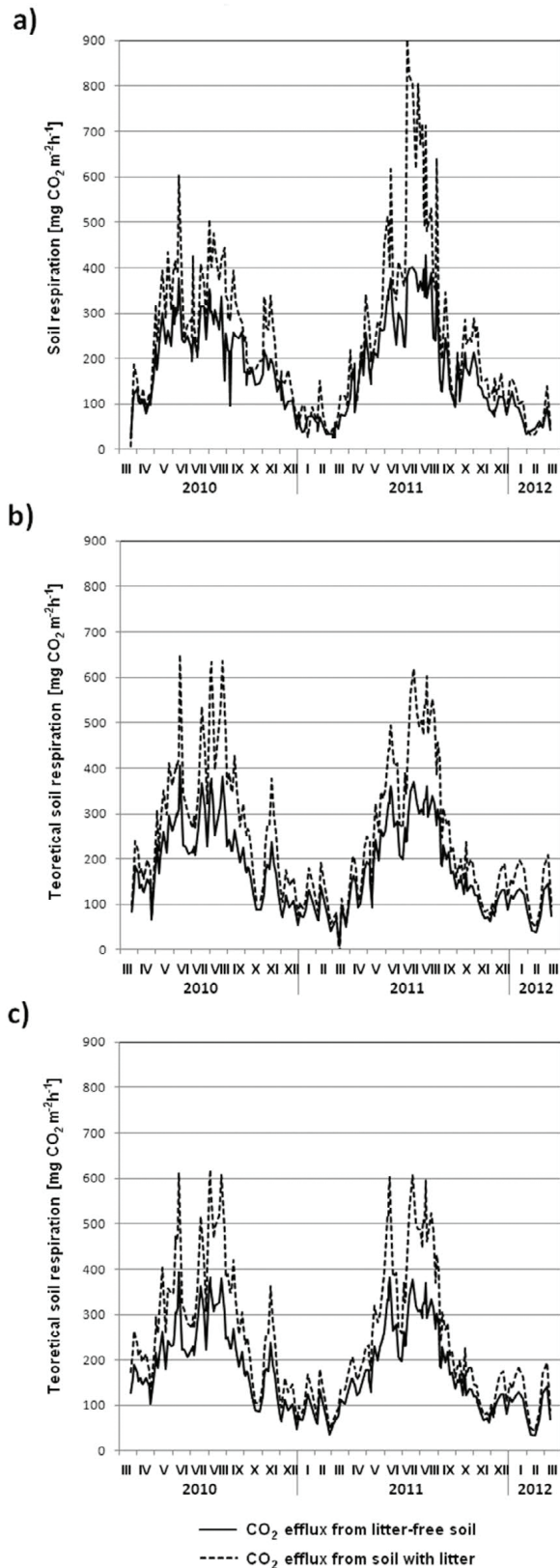
My research also indicated that soil respiration is best correlated with temperature when it is increasing. Slightly different results were obtained by Moncrieff and Fang (1999), who state that the reaction of soil respiration to changes in temperature is certainly highest in summer, but soil CO<sub>2</sub> emissions are more strongly determined by temperature in spring than in autumn.

The problem of soil respiration response time to changes in temperature and relative humidity has hardly been studied thus far. This should probably be explained by the fact that it takes a certain amount of time for the population of soil microbes to change due to reaction to improving

or deteriorating environmental conditions. The three day delay observed in this study corresponds to the 2–8 day periodicity in the amount of CO<sub>2</sub> emissions found in the tundra (Zimov et al. 1993), which was also associated with the life cycle of microorganisms.

In the case of the relationship of soil respiration to amount of precipitation, a 17–18 day delay is most likely due to the shape of these averages, which fairly well describes the changes in soil moisture directly affecting the number of soil microorganisms.

So far, no attempt has been made to model soil respiration by dividing the period of variability in the amount of CO<sub>2</sub> emissions into sub-periods. Attempts to do so in this study did not improve the model significantly, despite providing a better representation of the course of soil respiration in May and early June. Another problem is finding the right formula for the calculation of soil respiration in winter. Most researchers omit this period, beginning their studies in spring and ending in autumn. The use of the exponential model for the entire period of soil respiration variation may be useful for estimating the amount of CO<sub>2</sub> emitted in an entire the year, but it does not reflect the dynamics of the changes, because the period of winter is considered separately.



**Table 8.** Values of  $R^2$  and standard error of the estimate for the two tested models

Model	Research point without litter		Research point with litter	
	$R^2$	Standard error of estimation	$R^2$	Standard error of estimation
$R = a+bT+cW+dW^2$ in period A	0.83	41.28	0.81	85.33
$R = a + e^{b+cT+dW+fW^2}$ in period B+C+D				
$R = a + e^{b+cT+dW+fW^2}$ in whole research period	0.75	42.85	0.73	88.3

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

## 5. Conclusions

The following conclusions can be made from the study presented in this paper:

1. Between approx. March 10 to approx. June 10, soil respiration increases linearly as temperature increases.
2. When respiration decreases (from approx. June 10 to approx. March 10), the relationship of soil respiration to air temperature takes the shape of an exponential curve.
3. Soil respiration responds with a delay of approx. 3 days to temperature changes and relative humidity, and with a delay of approx. 17 days to changes in amount of precipitation.

4. Dividing the period of soil respiration variation into a period of increasing respiration and a period of decreasing respiration, as well as modelling soil respiration for each of these periods alone does not significantly improve the quality of the generated series of theoretical values of respiration.

The research carried out by the author also shows that there is very little knowledge available about the determinants of soil respiration in winter. Future research should focus also on this issue.

**Figure 3.** Observed soil respiration at the study sites (a) and theoretical soil respiration values based on the model taking into account a division between the period of increasing soil respiration and the period of decreasing soil respiration (b) and a single model for the entire research period (c)

## Conflict of interest

The author declares that there are no potential conflicts of interest.

## Acknowledgements and funding sources

The study was funded by the author. The author would like to thank the Department of Physical Geography, University of Łódź for the free use of a carbon dioxide meter.

## References

- 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 14<sup>th</sup> International Congress of Soil Science, Kyoto, Japan. 12–18 Aug. 1990, p. 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 CO<sub>2</sub> 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, 220s.
- 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 CO<sub>2</sub> 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, temperature 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> efflux using continuous measurements of CO<sub>2</sub> 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, 83s.
- 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 p. ISBN 83-7171-982-5
- Udegraff 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* (eds. K. Fortuniak, J. Jędruszkiewicz, M. Zieliński) Wyd. UŁ, Łódź, 28–36.
- Wroński K. 2013. Wpływ warunków środowiskowych na emisję CO<sub>2</sub> z gleb leśnych i łąkowych na obszarze środkowej Polski (manuscript), 143 p. 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 CO<sub>2</sub> fluxes in a *Deyeuxia angustifolia* wetland in Sanjiang Plain, China. *Wetlands Ecology and Management* 13: 35–41.
- Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., Yu.V. Voropaev, Prosyannikov S.F., Wong C.S., ChanY.-H. 1993. Wintertime CO<sub>2</sub> Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic* 46(3): 197–204.