

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 17.01.2012 r.
Zaakceptowano 18.02.2012 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

ZMIENNOŚĆ DOBOWA STRUMIENI CO₂ WYMIENIANYCH MIĘDZY ATMOSFERĄ A RÓŻNYMI UPRAWAMI ROLNICZYMI

Karolina SAKOWSKA^{ABCDEF}, **Radosław JUSZCZAK**^{ADE},
Bogna UŹDZICKA^{BCD}, **Janusz OLEJNIK**^{DE}

Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii

Streszczenie

Jedną z metod, służącą poznaniu mechanizmów procesów wymiany masy i energii między atmosferą a powierzchnią czynną różnych ekosystemów lądowych, jest bezpośredni pomiar strumieni gazów szklarniowych. Szczególna uwaga badaczy skupia się na ditlenku węgla, którego koncentracja w atmosferze wzrasta w niepokojącym tempie [URBANIAK 2006].

W pracy przedstawiono wyniki pomiarów wymiany ditlenku węgla przeprowadzonych w dniu 29 czerwca 2011 r. i wykonanych na trzech poletkach doświadczalnych (uprawa lucerny, pszenicy oraz ziemniaków), zlokalizowanych na terenie Rolniczej Stacji Doświadczalnej w Brodach (województwo wielkopolskie) oraz wymodelowane wielkości oddychania (R_{eco}), wymiany netto (NEE) i produkcji pierwotnej (GEP) ekosystemu. Pomiarzy przeprowadzono techniką dynamicznych komór zamkniętych.

W dniu 29 czerwca 2011 r. wartości zmierzonego R_{eco} wahały się w granicach od 3,61 do 16,62 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast wartości zmierzonego NEE od 4,22 do $-24,08 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Wyniki modelowania oddychania ekosystemu (R_{eco}) dla poszczególnych upraw, uzyskane za pomocą modelu LLOYDA i TAYLORA [1994], nie różniły się średnio od wartości zmierzonych o więcej niż 4%.

Wyniki modelowania NEE wskazują, że wybrany model [MICHAELIS, MENTEN 1913] sprawdził się dla stanowiska z uprawą lucerny i pszenicy (średni bezwzględny błąd procentowy – $MAPE$ równał się, odpowiednio, 25,0 i 7,3%). Prognozy NEE dla stanowiska z uprawą ziemniaka różniły się w znacznym stopniu ($MAPE$ równy 98,5%) od wartości pomierzonych, dlatego też przesłankę do dalszych badań stanowi poszukiwanie modelu, który uwzględniłby, oprócz $PPFD$, także inne czynniki środowiska kontrolujące proces fotosyntezy.

Słowa kluczowe: metody komorowe, oddychanie ekosystemu, produkcja pierwotna ekosystemu, strumień CO_2 , wymiana netto ekosystemu

Adres do korespondencji: mgr inż. K. Sakowska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Katedra Meteorologii, ul. Piątkowska 94B, 60-649 Poznań; tel. +48 607 848 708, e-mail: sakowska.karolina@wp.pl

WSTĘP

Koncentracja atmosferycznego CO₂ podwoiła się od końca ostatniej epoki lodowcowej i wzrosła o ponad 30% od początku ery przemysłowej – w erze przedprzemysłowej koncentracja tego gazu szklarniowego w powietrzu wynosiła ok. 280 ppm i w ostatnich kilkudziesięciu dekadach wzrastała średnio o 1,5 ppm rocznie. Co więcej, według obecnych prognoz koncentracja CO₂ w powietrzu atmosferycznym w 2100 r. może wynieść nawet 500–1000 ppm [KEELING, WHORF 1994; MAYEUX i in. 2002; URBANIAK 2006].

W celu określenia kierunku oraz skali zmian klimatycznych, stanowiących przedmiot coraz powszechniejszego zainteresowania zarówno naukowców, jak i innych środowisk oraz ich wpływu na funkcjonowanie ekosystemów należy zapoznać się z prawami rządzącymi procesami wymiany masy i energii między atmosferą i różnymi ekosystemami lądowymi [BALDOCCHI i in. 2001; GAMON i in. 2006].

Obecnie dostępnych jest wiele technik (m.in. metoda kowariancji wirów, metody komorowe, metody profilowe), służących poznaniu i ocenie ww. procesów, przy czym każda z metod ma zarówno zalety, jak i ograniczenia.

Do najbardziej popularnych technik można zaliczyć metodę kowariancji wirów (ang. „Eddy Covariance” – EC), która opiera się na założeniu, że transport masy i energii w warstwie granicznej atmosfery kształtują przede wszystkim turbulencje, stąd strumienie masy i energii liczone są na podstawie pomiarów fluktuacji wektora pionowej składowej prędkości wiatru oraz fluktuacji wielkości skalarnej, np. temperatury powietrza, stężenia ditlenku węgla czy pary wodnej [BALDOCCHI 2003; BURBA, ANDERSON 2010; MICHALAK-GALCZEWSKA 2011, URBANIAK 2006]. Podstawową wadą tej metody jest wymóg homogeniczności, płaskości oraz odpowiedniej wielkości badanej powierzchni [BURBA, ANDERSON 2010; DRÖSLER 2005], dlatego uzupełnieniem techniki kowariancji wirów są różnego typu metody komorowe, w których zamyka się porcję powietrza, znajdującą się nad powierzchnią czynną, i mierzy się zmiany koncentracji skalarów wynikające z aktywności powierzchni [DRÖSLER 2005; LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995]. Spośród dostępnych metod komorowych najbardziej popularne są: statyczne komory zamknięte, dynamiczne komory zamknięte oraz dynamiczne komory otwarte. W systemach dynamicznych komór zamkniętych, w których stosuje się ciągły przepływ powietrza między komorą a analizatorem gazowym, strumienie badanych gazów są wyznaczone na podstawie zmiany ich koncentracji w czasie wewnątrz komory na jednostkę powierzchni [LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995; PUMPANEN i in. 2004; ROCHETTE, HUTCHINSON 2005].

Obecnie coraz popularniejsze stają się także techniki oparte na krzywych odbicia spektralnego roślin, które umożliwiają zdalną ocenę ich stanu fizjologicznego oraz wymiany CO₂. Pomiarów spektralne mogą być prowadzone z poziomu naziemnego, lotniczego oraz satelitarne, co umożliwia znaczące rozszerzenie skali ba-

dań [COGLIATI 2011; GITELSON i in. 2008; FUENTES i in. 2006; SIMS i in. 2006; YUAN i in. 2007].

Wszystkie wyżej wymienione techniki mogą służyć do oszacowania bilansu węgla dla różnych ekosystemów. Całkowita ilość węgla pochłoniętego przez rośliny w procesie fotosyntezy jest określana jako produkcja pierwotna ekosystemu (ang. „gross ecosystem production” – *GEP*). Z drugiej strony ditlenek węgla zasymilowany w procesie fotosyntezy zostaje również wyemitowany do atmosfery w procesie oddychania ekosystemu (R_{eco}), na które składa się oddychanie autotroficzne (ang. „autotrophic respiration” – R_a) oraz heterotroficzne ekosystemu (ang. “heterotrophic respiration” – R_h). Saldo wyżej wymienionych procesów określa się mianem wymiany netto ekosystemu (ang. „net ecosystem exchange” – *NEE*) [JUSZCZAK i in. 2010; KIRSCHBAUM i in. 2001; LAW i in. 2002; LOVETT i in. 2006; MICHALAK-GALCZEWSKA 2011]. *NEE* odnosi się do bilansu ditlenku węgla z perspektywy atmosfery, dlatego przyjmuje wartości ujemne, gdy przeważa absorpcja tego gazu przez ekosystem, a dodatnie, gdy dominuje emisja CO₂ z ekosystemu do atmosfery [MICHALAK-GALCZEWSKA 2011; URBANIAK 2006].

Bilans węgla jest uzależniony od typu ekosystemu. Grunty rolne (rozumiane jako grunty wykorzystywane do produkcji rolniczej, składające się z pól uprawnych, łąk oraz plantacji trwałych, w tym rolno-leśnych i roślin energetycznych), zajmujące ok. 40–50% powierzchni łądu, odgrywają znaczącą rolę w krążeniu węgla w przyrodzie [SMITH i in. 2007]. Rolnictwo ma potencjał, aby działać zarówno jako źródło, jak i rezerwar niektórych gazów szklarniowych, przy czym trzy główne gazy cieplarniane, których emisja może być regulowana działalnością rolniczą, to ditlenek węgla, metan i podtlenek azotu [SMITH i in. 1997]. Według TEBRÜGGE i EPPERLEIN [2011] rolnictwo jest odpowiedzialne za emisję ok. 10% gazów cieplarnianych w UE. Źródła rolniczych gazów cieplarnianych obejmują utlenianie węgla glebowego, emisję metanu z obornika oraz przez przeżuwacze, a także emisję podtlenku azotu z nawozów azotowych, gleb i odpadów zwierzęcych [SMITH i in. 1997]. Istnieją dowody, że w ramach obecnych praktyk rolniczych (tj. m.in. spalanie organicznych resztek poźniwnych) wiele europejskich użytków rolnych stanowi raczej źródło, aniżeli rezerwar atmosferycznego CO₂ [WEISKE 2007]. Z kolei potencjał ekosystemów rolniczych do sekwestracji węgla polega przede wszystkim na nagromadzeniu materii organicznej w glebach [ROGIERS 2006; SMITH i in. 1997]. Proces fotosyntezy przeprowadzany przez rośliny rolnicze jest głównym pochłaniaczem CO₂ z atmosfery, a niezebrana biomasa roślinna wraca do gleby i przyczynia się do sekwestracji węgla. Ilość węgla zakumulowana bądź wyemitowana przez dany ekosystem zależy od tempa produkcji roślinnej oraz tempa rozkładu materii organicznej [MICHALAK i in. 2010], tak więc to, czy grunty rolne stanowią źródło czy rezerwar CO₂, będzie uzależnione od typu gleby, uprawianego gatunku roślin, techniki uprawy oraz warunków klimatycznych [KETTUNEN 2007; TEBRÜGGE, EPPERLEIN 2011].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników jednodniowych pomiarów dynamicznymi komorami zamkniętymi oraz modelowania strumieni CO₂, wymienianych między atmosferą a powierzchnią czynną różnych użytków rolnych, zlokalizowanych na terenie Rolniczej Stacji Doświadczalnej w Brodach, w województwie wielkopolskim.

METODY BADAŃ

OPIS TERENU BADAŃ

Badania prowadzono na terenie Rolniczej Stacji Doświadczalnej w Brodach (52°26'18"N, 16°17'40"E), która stanowi własność Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu i jest zlokalizowana ok. 55 km na zachód od Poznania, w województwie wielkopolskim, powiecie nowotomyskim, w granicach administracyjnych gminy Lwówek.

Poletka doświadczalne gospodarstwa stanowią unikatowe w skali Polski doświadczenie, bowiem od 1950 r. jego elementy stanowi uprawa roślin w monokulturze oraz w zmianowaniu w warunkach różnych systemów nawożenia (7 gatunków oraz 11 systemów nawożeń w każdym systemie gospodarczym).

Wieloletnie doświadczenie zlokalizowane na glebie płowej, klasy bonitacyjnej IIIb–IVa, kompleksu żytniego dobrego i bardzo dobrego, o składzie granulometrycznym piasków gliniastych lekkich i mocnych, średnio głębokich, zalegających na glinach lekkich [BLECHARCZYK 2002].

SYSTEM POMIAROWY

Strumienie CO₂ wymieniane między powierzchnią czynną użytków rolnych a atmosferą pomierzono z użyciem zamkniętych komór dynamicznych, w których ma miejsce ciągły przepływ powietrza między wnętrzem komory, a analizatorem gazowym. System pomiarowy składał się z dwóch komór: transparentnej i nietransparentnej, skonstruowanych według pomysłu DRÖSLERA [2005]. Każda z komór ma kształt graniastosłupa o wysokości 50 cm i podstawie o wymiarach 77 × 77 cm. Objętość komór wynosi ok. 0,3 m³.

Komora nieprzezroczysta, służąca do pomiaru oddychania ekosystemu (R_{eco}), została wykonana z polichlorku winylu (PCW) o grubości 3 mm. Biały kolor materiału, z którego wykonano komorę zwiększa jej albedo, co dodatkowo zmniejsza nagrzewanie się powietrza we wnętrzu komory.

Komora transparentna, służąca do pomiaru wymiany netto ekosystemu (NEE) została wykonana ze szkła akrylowego (polimetakrylanu metylu, pleksiglasu) o grubości 3 mm. Na podstawie testów przeprowadzonych przez DRÖSLERA [2005]

stwierdzono, że przepuszczalność promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (*PPFD*) przez materiał, z którego wykonano komorę transparentną sięga 95%.

W celu prowadzenia pomiarów dokładnie w tym samym miejscu przez cały sezon wegetacyjny, dwa tygodnie przed rozpoczęciem pierwszej kampanii pomiarowej, zainstalowano w glebie, do głębokości 15 cm, ramy wykonane z PCW. Zabieg ten miał również na celu minimalizację poziomej dyfuzji CO₂ [DAVIDSON i in. 2002; HUTCHINSON, LIVINGSTON 2001; LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995; NORMAN i in. 1997; PUMPANEN i in. 2004].

Obie komory wyposażono w wewnętrzny czujnik temperatury (T₁₀₇, Campbell Scientific, Inc., USA). Zgodnie z przyjętą metodyką, zaproponowaną przez DRÖSLERA [2005], temperatura powietrza wewnątrz komory w trakcie pomiaru nie powinna zmienić się o więcej niż 1,5°C. Termometr, umieszczony w osłonie radiacyjnej, zainstalowano na ścianie komory, na wysokości ok. 35 cm.

Każdą z komór wyposażono w 3 wentylatory (Sunon, MagLev, Taiwan, o mocy 1,4 W), które mieszając powietrze wewnątrz komory umożliwiają utrzymywanie jednorodnego stężenia tego gazu w całej jej objętości [DRÖSLER 2005; PUMPANEN i in. 2004]. Obie komory zaopatrzone również w wentyl do wyrównywania ciśnienia między otoczeniem a wnętrzem komory [DAVIDSON i in. 2002; HUTCHINSON, LIVINGSTON 2001; LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995; ROCHETTE, HUTCHINSON 2005].

W celu uszczelnienia połączenia komory z ramą zainstalowaną w glebie [HUTCHINSON, LIVINGSTON 2001; LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995; ROCHETTE, HUTCHINSON 2005], na dolnych, wewnętrznych krawędziach obu komór zamocowano system uszczelki neoprenowych. Podczas pomiarów stosowano elastyczne linki, które były rozciągane między uchwytami znajdującymi się na szczycie komory, a bocznymi hakami ramy glebowej.

W skład systemu pomiarowego wchodził ponadto analizator gazowy LI-820 (Licor, USA), określający koncentrację CO₂, czujnik do pomiaru promieniowania fotosyntetycznie aktywnego *PPFD* (SKP 215, Quantum Sensor, Skye Instrument Ltd., UK) oraz zestaw dwóch termometrów do pomiaru temperatury gleby na głębokości 2 i 5 cm (T₁₀₇, Campbell Scientific, Inc., USA). Dane z wyżej wymienionych przyrządów były przekazywane analogowo do przetwornika analogowo-cyfrowego (datalogger CR1000, Campbell Scientific, Inc., USA), który zapisywał je z częstotliwością 0,2 Hz.

Od marca 2011 r., na znajdującej się ok. 50 m od stanowisk pomiarowych stacji meteorologicznej, prowadzone są ciągle pomiary podstawowych parametrów fizycznych gleby i powietrza: m.in. temperatury powietrza na wysokości 30 oraz 200 cm (T₁₀₇, Campbell Scientific, Inc., USA), temperatury gleby na głębokościach 2, 5, 10 oraz 20 cm, promieniowania fotosyntetycznie aktywnego *PPFD* (BF3H Sunshine Sensor, Delta-T Devices Ltd, UK), opadu całkowitego (deszczomierz korytkowy TPG-034-H24, Aster, Polska), głębokości zalegania zwierciadła wód gruntowych (hydrostatyczna sonda poziomu NLS633C, NEGELAP-Automa-

tyka, Polska), siły ssącej (tensjometr TS1, UMS, Niemcy) oraz wilgotności objętościowej gleby (CS616, Campbell Scientific, Inc., USA). Pomierzone wartości są rejestrowane urządzeniem datalogger CR3000 (Campbell Scientific, Inc., USA).

OPIS BADAŃ TERENOWYCH

Badania intensywności wymiany strumieni CO_2 między atmosferą a powierzchnią czynną użytków rolnych w Brodach rozpoczęto od marca 2011 r., przy czym kampanie pomiarowe prowadzono w ok. 3-tygodniowych odstępach czasu.

Pomiary prowadzono na uprawach 5 gatunków roślin (żyto ozime – odmiana Dańkowskie Żłote, pszenica ozima – odmiana Turkis, Lucerna II – odmiana Alba, ziemniaki – odmiana Wineta, jęczmień jary – odmiana Nadek), uprawianych w zmianowaniu i nawożonych NPKCa (dawki nawozowe: N – $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ saletry amonowej, P_2O_5 – $60 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ w formie superfosfatu, K_2O – $120 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ w formie soli potasowej, CaO – $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ wapna palonego mielonego), przy czym na każdym gatunku zlokalizowano 2 stanowiska pomiarowe.

Pomiary wykonywano w dni słoneczne, bowiem kluczem do wykonania prawidłowego pomiaru wymiany netto ekosystemu (*NEE*) komorą transparentną i szacowania strumieni CO_2 jest stabilność promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (według DRÖSLERA [2005] w czasie jednego pomiaru wartość *PPFD* nie może ulec zmianie o więcej niż 10%). Badania rozpoczynano tuż przed wschodem słońca, kiedy wartości *PPFD* były bliskie zeru, a temperatura gleby i powietrza bliskie temperaturze minimalnej i kontynuowano do momentu, w którym wyżej wymienione parametry osiągały wartości maksymalne (*PPFD* – godziny południowe, temperatura powietrza i gleby – godziny popołudniowe).

Pojedynczy pomiar wymiany netto ekosystemu (*NEE*), wykonywany komorą transparentną trwał ok. 1,5 min, natomiast czas wykonywania pomiaru komorą nieprzezroczystą (oddychanie ekosystemu – R_{eco}) był dłuższy i wynosił ok. 2,5 min.

Z uwagi na to, że celem niniejszej pracy jest przedstawienie zmienności dobowej strumieni CO_2 , wymienianych między atmosferą a różnymi uprawami rolniczymi, w publikacji wykorzystano dane dotyczące gatunków należących do różnych grup roślin uprawnych (pszenica ozima – zbożowe, ziemniak – okopowe, lucerna – motylkowe) z kampanii pomiarowej przeprowadzonej 29 czerwca 2011 r. Wybór tej daty był uzasadniony faktem, że wybrany dzień należy do najdłuższych w roku, co umożliwiło zgromadzenie dużej liczby pojedynczych pomiarów (na każdym z gatunków wykonano 11 pojedynczych pomiarów komorą transparentną i 13 pomiarów komorą nietransparentną).

ANALIZA DANYCH POMIAROWYCH

Do obliczeń strumieni CO₂, wymienianych między powierzchnią czynną a atmosferą, wykorzystano jeden z powszechnie stosowanych wzorów, opracowany przez MÜNCHMEYERA [2000]:

$$F_{CO_2} = \frac{M P V \delta v f}{R T t A} \quad (1)$$

gdzie:

- F_{CO_2} – strumień dwutlenku węgla, $\mu\text{g CO}_2\text{-C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;
- M – masa molowa, $\text{g C}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- P – ciśnienie atmosferyczne, Pa;
- V – objętość komory, m^3 ;
- δv – zmiana koncentracji CO₂ w komorze w czasie pomiaru, ppm(v);
- f – współczynnik przeliczeniowy C na CO₂, 12g/44g;
- R – stała gazowa, $\text{m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$;
- T – temperatura powietrza podczas pomiaru, K;
- t – czas trwania pomiaru, h;
- A – powierzchnia ramy glebowej, m^2 .

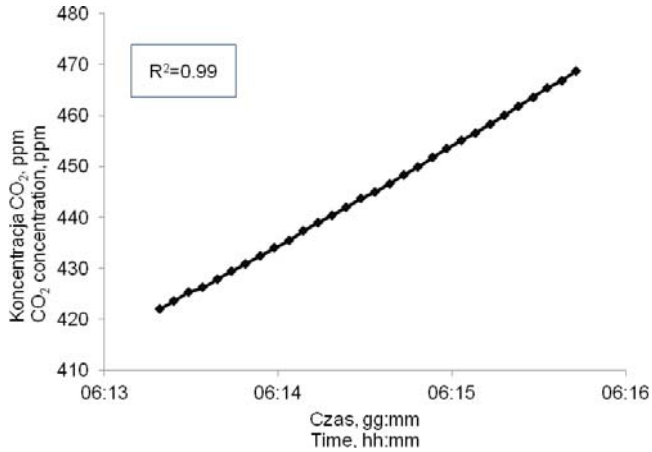
Miarą oddychania ekosystemu (R_{eco}) jest liniowy wzrost koncentracji CO₂ w komorze podczas pomiaru komorą nieprzezroczystą (rys. 1). Z kolei spadek koncentracji tego gazu podczas pomiaru komorą transparentną wskazuje na przewagę procesów absorpcji CO₂ przez rośliny w procesie fotosyntezy nad procesami oddychania ekosystemu (rys. 2).

Kolejnym krokiem w analizie danych było modelowanie dobowego przebiegu oddychania ekosystemu (R_{eco}). W tym celu wykorzystano równanie LLOYDA i TAYLORA [1994], będące funkcją zależności respiracji od temperatury powietrza lub gleby na pewnej głębokości (równanie 2). Parametry R_{ref} (a) oraz E_o (b) funkcji zostały indywidualnie dopasowane do poszczególnych zbiorów danych:

$$R_{eco} = R_{ref} e^{E_o \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)} \quad (2)$$

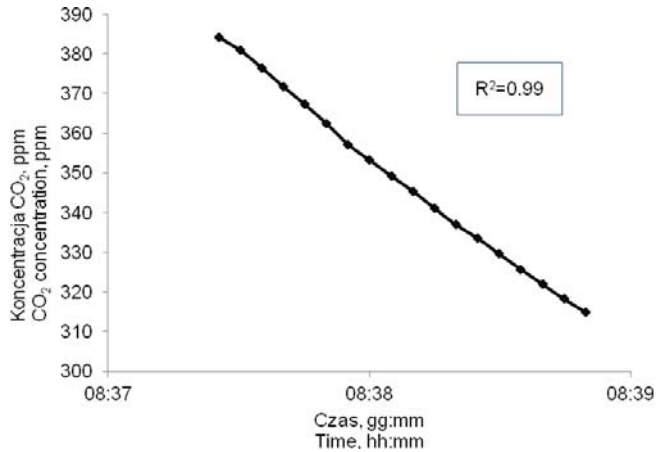
gdzie:

- R_{eco} – oddychanie ekosystemu, $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;
- R_{ref} – oddychanie w temperaturze referencyjnej, $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;
- E_o – energia aktywacji, K;
- T_{ref} – temperatura referencyjna, 283,15 K;
- T_0 – stała temperatura, w której dochodzi do inicjacji procesów biologicznych, 227,1 K;
- T – temperatura gleby lub powietrza, K.



Rys. 1. Wzrost koncentracji CO₂ w komorze nietransparentnej na uprawie lucerny 29.06.2011 r.;
źródło: wyniki własne

Fig. 1. Increase of CO₂ concentration in the non-transparent chamber over time within an alfalfa crop on 29. 06. 2011; source: own studies



Rys. 2. Spadek koncentracji CO₂ w komorze transparentnej na uprawie lucerny 29.06.2011 r.;
źródło: wyniki własne

Fig. 2. Decrease of CO₂ concentration in the transparent chamber over time within an alfalfa crop on 29. 06. 2011; source: own studies

W celu wymodelowania wartości wymiany netto ekosystemu (*NEE*) wykorzystano równanie hiperboliczne MICHAELISA i MENTENA [1913], w którym produkcja brutto ekosystemu (*GEP*) zależna jest od promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (*PPFD*). Model ten jest powszechnie używany przez wielu autorów [BELLISARIO i in. 1998; DRÖSLER 2005; FROLKING i in. 1998; WHITING 1994]

w celu kalkulacji *NEE*, jako różnicy między wymodelowanym *GEP* oraz *R_{eco}* (równanie 3):

$$NEE = ((GP_{\max} \alpha PPF D)(\alpha PPF D + GP_{\max})^{-1}) - R_{eco} \quad (3)$$

gdzie:

- NEE* – wymiana netto ekosystemu, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- GP_{max}* – produkcja brutto ekosystemu dla „optymalnego” *PPFD*, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- PPFD* – gęstość strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- α – współczynnik wykorzystania *PPFD*, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- R_{eco}* – model oddychania ekosystemu, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

Zebrane dane opracowano w środowisku Microsoft Excel oraz programie TableCurve 2D (Systat Software Inc., USA), umożliwiającym dopasowanie krzywej do zbioru danych.

Na podstawie modelu, opracowanego przez DRÖSLERA [2005], wymodelowano dzienne przebiegi strumieni *R_{eco}*, *GEP* oraz *NEE* w 30-minutowych interwałach czasowych. Wartości te posłużyły następnie do obliczania wartości skumulowanych wielkości strumieni, co miało na celu określenie, czy w dniu prowadzenia pomiarów dany ekosystem był pochłaniaczem, czy emitentem atmosferycznego dwutlenku węgla. Jako miarę dokładności predykcji modelu oddychania ekosystemu (*R_{eco}*) i wymiany netto (*NEE*) wykorzystano średni bezwzględny błąd procentowy (*MAPE*), podający, o ile procent średnio prognoza różni się od wartości rzeczywistej (równanie 4):

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x_i^*}{x_i} \right| 100\% \quad (4)$$

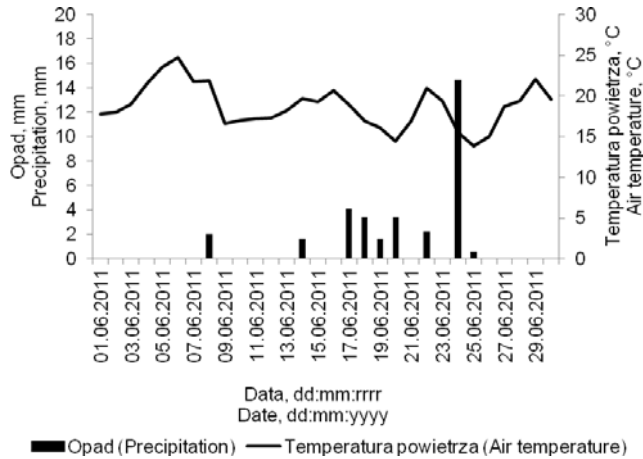
gdzie:

- MAPE* – średni bezwzględny błąd procentowy, %;
- n* – liczba zmiennych;
- x_i* – wartość zmiennej rzeczywistej, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;
- x_i^{*}* – wartość zmiennej prognozowanej, $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

WYNIKI I DYSKUSJA

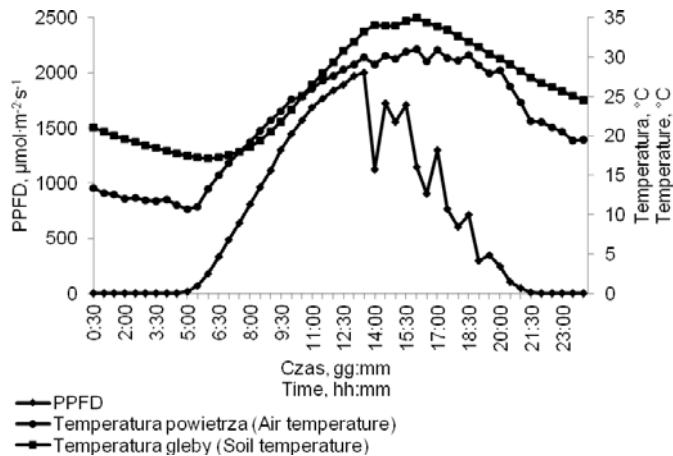
WARUNKI ŚRODOWISKOWE

Suma opadu całkowitego na badanym obszarze dla czerwca 2011 r. wynosiła 33,5 mm, przy czym dzień, w którym wykonywano pomiary komorowe charakteryzował się całkowitym brakiem opadu (rys. 3). Średnia dobową temperaturą powietrza na wysokości 30 cm powyżej powierzchni terenu w tym dniu wynosiła



Rys. 3. Przebiegi dobowych sum opadów oraz średniej dobowej temperatury powietrza na stacji meteorologicznej w Brodach w czerwcu 2011 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 3. The courses of daily sum of precipitation and daily mean air temperature at the meteorological station in Brody in June 2011; source: own studies



Rys. 4. Dobowe przebiegi promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (PPFD), temperatury powietrza na wysokości 30 cm powyżej powierzchni terenu oraz temperatury gleby na głębokości 2 cm na stacji meteorologicznej w Brodach w dniu 29.06.2011 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 4. The daily courses of PPFD, air temperature measured 30 cm above the ground surface and soil temperature at a depth of 2 cm at the meteorological station in Brody on 29th of June 2012; source: own studies

22,0°C, a zwierciadło wód gruntowych zalegało na głębokości 1,70 m poniżej powierzchni terenu; wilgotność objętościowa gleby kształtowała się na poziomie jedynie 8%, natomiast siła ssąca gleby wynosiła 76 kPa.

Warunki pogodowe panujące w dniu prowadzenia pomiarów komorowych umożliwiły pomiar *PPFD* w szerokim zakresie tego promieniowania, bowiem zachmurzenie zmienne wystąpiło dopiero w godzinach popołudniowych (rys. 4). Pierwsza część dnia, w której miały miejsce pomiary komorą przezroczystą, charakteryzowała się sprzyjającymi do prowadzenia badań warunkami solarnymi (bezhmurnym niebem).

W dniu 29 czerwca 2011 r. średnie półgodzinne wartości *PPFD* osiągnęły maksimum ($2001 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) między godziną 13:00 a 13:30, podczas gdy maksymalna średnia półgodzinna temperatura powietrza ($31,0^{\circ}\text{C}$) oraz gleby na głębokości 2 cm ($35,0^{\circ}\text{C}$) zmierzone na stacji meteorologicznej zostały odnotowane dwie godziny później (między 15:30 a 16:00). Najmniejszą wartość średniej półgodzinnej temperatury powietrza ($10,7^{\circ}\text{C}$) oraz gleby ($17,2^{\circ}\text{C}$) zaobserwowano we wczesnych godzinach porannych (odpowiednio, pomiędzy 4:30 a 5:00 oraz 5:30 i 6:00).

DZIENNE PRZEBIEGI WYMIANY NETTO EKOSYSTEMU (*NEE*), ODDYCHANIA EKOSYSTEMU (*R_{eco}*) I PRODUKCJI PIERWOTNEJ EKOSYSTEMU (*GEP*)

Zgodnie z wieloma badaniami, głównymi czynnikami wywierającymi wpływ na oddychanie ekosystemu ($R_{eco} = R_a + R_h$) są temperatura gleby oraz jej wilgotność [DAVIDSON i in. 2006; FANG, MONCRIEFF 2000; FLANAGAN, JOHNSON 2005; GIFFORD 2003; JASSAL i in. 2008; JIN i in. 2008; JUSZCZAK i in. 2012; LIVINGSTON, HUTCHINSON 1995; LLOYD, TAYLOR 1994; ZHOU i in. 2007].

Analizy zależności zmierzonego R_{eco} od temperatury powietrza i temperatury gleby na różnych głębokościach wykazały, że w większości przypadków temperatura powietrza koreluje lepiej z R_{eco} , aniżeli temperatura gleby. Podobne zależności zaobserwowali w swoich pracach CHOJNICKI i in. [2010], DRÖSLER [2005] czy MICHALAK i in. [2010]. Wyjątek stanowi pszenica, dla której najsilniejszy związek zaobserwowano między R_{eco} a temperaturą gleby pomierzoną na głębokości 2 cm (tab. 1).

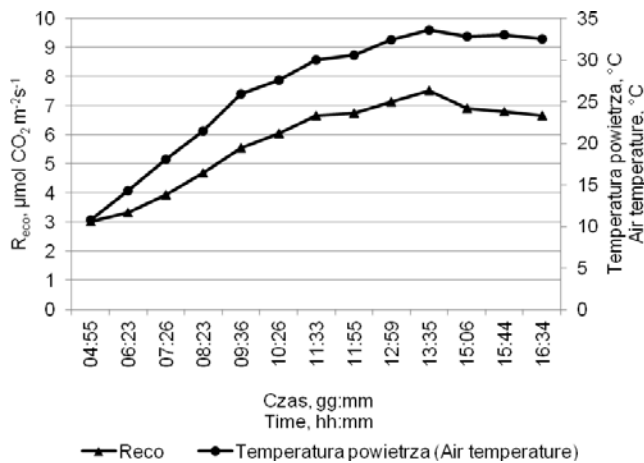
W dniu 29 czerwca 2011 r. pomierzone wartości oddychania ekosystemu (R_{eco}) kształtowały się w granicach od 7,02 do $16,62 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na stanowisku z uprawą lucerny, od 3,61 do $5,84 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na stanowisku z pszenicą oraz od 3,03 do $7,53 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ na stanowisku z ziemniakami. Na wszystkich stanowiskach wartości emitowanych strumieni CO₂ rosły wraz z temperaturą, a maksymalne R_{eco} odnotowano w godzinach popołudniowych (między godziną 13:00 a 16:30), kiedy również temperatura powietrza bądź gleby osiągnęła największe wartości. Minimalne wartości strumieni zaobserwowano we wczesnych godzinach porannych (4:30–6:00), gdy temperatura powietrza wahała się w granicach $10\text{--}14^{\circ}\text{C}$, a temperatura gleby na głębokości 2 cm wynosiła ok. 15°C .

Tabela 1. Zależność R_{eco} zmierzonego na poszczególnych użytkach rolnych od temperatury gleby i temperatury powietrza w dniu 29.06.2011 r.

Table 1. The relationship between R_{eco} measured over particular crops and soil and air temperature on 29th of June 2011

Zależność Relationship	Współczynnik determinacji R^2 Coefficient of determination R^2		
	lucerna alfalfa	pszenica ozima winter wheat	ziemniaki potato plants
R_{eco} vs temperatura gleby na 2 cm R_{eco} vs soil temperature at a depth of 2 cm	0,94	0,98	0,87
R_{eco} vs temperatura gleby na 5 cm R_{eco} vs soil temperature at a depth of 5 cm	0,90	0,97	0,73
R_{eco} vs temperatura powietrza R_{eco} vs air temperature	0,96	0,84	0,98

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

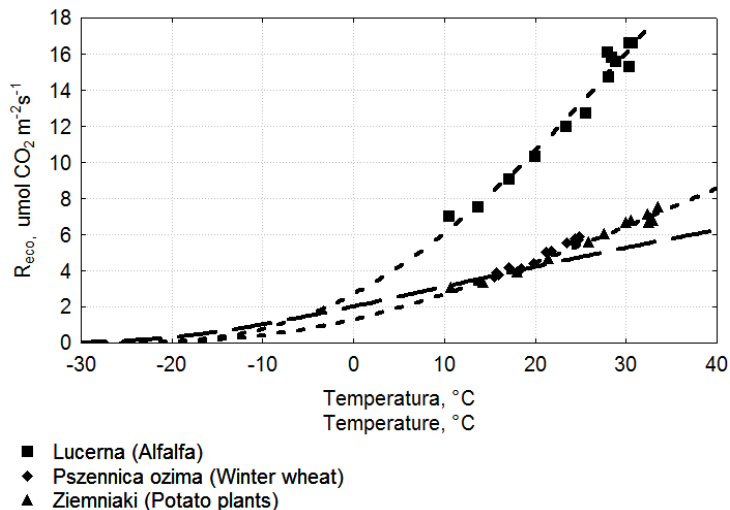


Rys. 5. Dienne przebiegi R_{eco} i temperatury powietrza zmierzonej na wysokości 30 cm powyżej powierzchni terenu na stanowisku zajmowanym przez ziemniaki w dniu 29.06.2011 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 5. The daily courses of R_{eco} and air temperature measured 30 cm above the ground surface over the potato crop on 29. 06. 2011; source: own studies

W kolejnej fazie wykreślono krzywe przedstawiające zależność oddychania ekosystemu (R_{eco}) od temperatury powietrza dla stanowiska z uprawą lucerny i ziemniaków oraz od temperatury gleby na głębokości 2 cm dla stanowiska, na którym uprawiana była pszenica (rys. 6).

Postępowanie to umożliwiło wyznaczenie dla każdego stanowiska parametrów R_{ref} (oddychanie ekosystemu w temperaturze referencyjnej wynoszącej 10°C) oraz E_o (energia aktywacji niezbędna do zainicjowania procesów oddechowych) funkcji



Rys. 6. Zależność oddychania ekosystemu (R_{eco}) od temperatury na stanowiskach pomiarowych z lucerną, ziemniakami i pszenicą ozimą w dniu 29.06.2011 r. z dopasowaną krzywą LLOYDA i TAYLORA [1994]; uwaga: dla lucerny i ziemniaków R_{eco} skorelowano z temperaturą powietrza na wysokości 30 cm p.p.t., natomiast dla pszenicy ozimej z temperaturą gleby na głębokości 2 cm; źródło: wyniki własne

Fig. 6. The relationship between ecosystem respiration (R_{eco}) and temperature at alfalfa, potato plants and winter wheat plots on 29. 06. 2011 with fitted LLOYD and TAYLOR [1994] curve; note: R_{eco} for the alfalfa and potato plants plots was correlated with air temperature 30 cm above the ground surface and R_{eco} for the winter wheat plot was correlated with soil temperature at a depth of 2 cm; source: own studies

LLOYDA i TAYLORA [1994] (równanie 2), wykorzystywanych w dalszym etapie do modelowania strumieni CO_2 (tab. 2).

Prognozy oddychania ekosystemu (R_{eco}) wymodelowanego na podstawie temperatury powietrza (lucerna i ziemniaki) oraz temperatury gleby na głębokości 2 cm (pszenica) nie różniły się średnio od wartości zmierzonego R_{eco} o więcej niż 4% (rys. 7).

Dzienna skumulowana suma węgla wyemitowanego w procesach oddychania ekosystemu w dniu 29 czerwca 2011 r. kształtowała się na stanowisku z lucerną na poziomie $12,05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, z ziemniakami – $5,29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ oraz z pszenicą – $4,76 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (rys. 8). Duże różnice w oddychaniu ekosystemu (R_{eco}) są najprawdopodobniej wynikiem różnic w fazach rozwojowych, w których znajdowały się rośliny w dniu pomiaru. Największe wartości R_{eco} odnotowano na stanowisku z lucerną, która znajdowała się w maksymalnym stadium rozwoju, natomiast najmniejsze wartości R_{eco} na stanowisku z dojrzałą, składającą się głównie z martwej biomasy pszenicą.

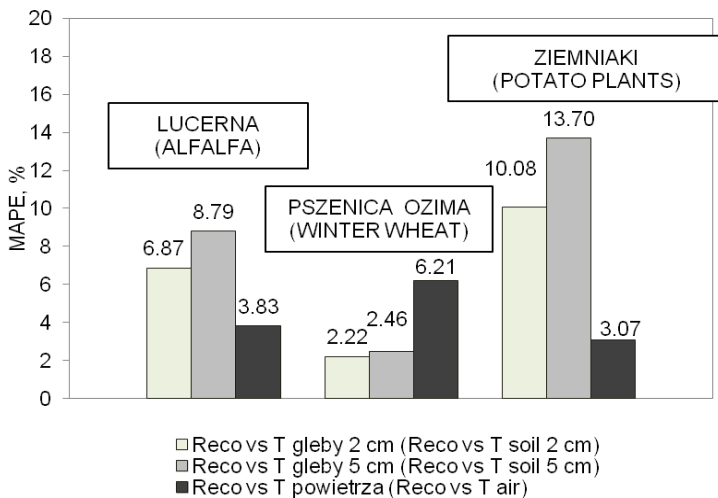
Sumując pomierzone wartości wymiany netto ekosystemu (NEE) oraz wymodelowane oddychanie ekosystemu (R_{eco}) oszacowano produkcję pierwotną (GEP) dla poszczególnych stanowisk roślinnych.

Tabela 2. Wartości parametru R_{ref} ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) opisującego oddychanie ekosystemu w temperaturze referencyjnej, wynoszącej 10°C , oraz energii aktywacji niezbędnej do zainicjowania procesów oddechowych – E_o (K) dla poszczególnych stanowisk w dniu 29.06.2011 r.

Table 2. The values of R_{ref} ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) – parameter describing ecosystem respiration at the reference temperature (10°C) and the activation energy – E_o (K) required to initiate respiration processes for particular plots on 29. 06. 2011

Rodzaj uprawy Crop	Parametr funkcji LLOYDA i TAYLORA [1994] Parameters of the LLOYD and TAYLOR [1994] function	
	R_{ref}	E_o
Lucerna Alfalfa	6,08	206,78
Pszenica ozima Winter wheat	2,60	213,33
Ziemniaki Potato plants	2,70	185,59

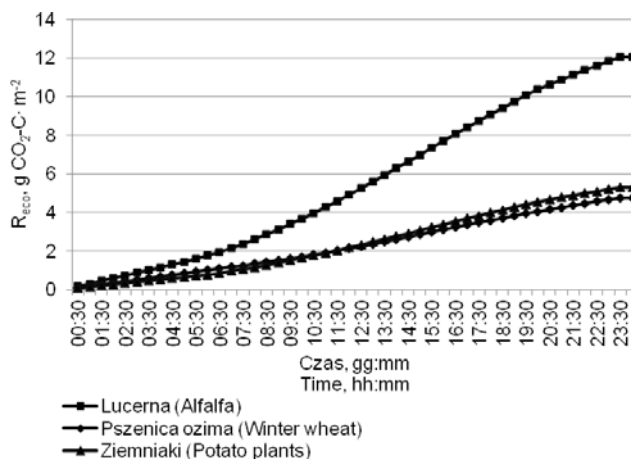
Źródło: wyniki własne. Source: own studies



Rys. 7. Średni bezwzględny błąd procentowy ($MAPE$) jako miara dokładności predykcji modelu R_{eco} dla poszczególnych użytków rolnych; źródło: wyniki własne

Fig. 7. The values of mean absolute percentage error ($MAPE$) as a measure of the accuracy of the R_{eco} models for particular crops; source: own studies

Analizy dziennych przebiegów oraz wzajemnych zależności strumieni R_{eco} , NEE oraz GEP wykazały znaczne różnice między poszczególnymi gatunkami roślin. Stanowiska z uprawami różniły się położeniem świetlnego punktu kompensacyjnego, przy którym wydzielanie CO_2 równoważy się z fotosyntetycznym pobieraniem, intensywnością procesu fotosyntezy oraz położeniem świetlnego punktu wysycenia, definiowanego jako najmniejsze natężenie światła, powyżej którego dalsze jego zwiększanie nie powoduje wzrostu intensywności procesu fotosyntezy [KOZŁOWSKA i in. 2007].



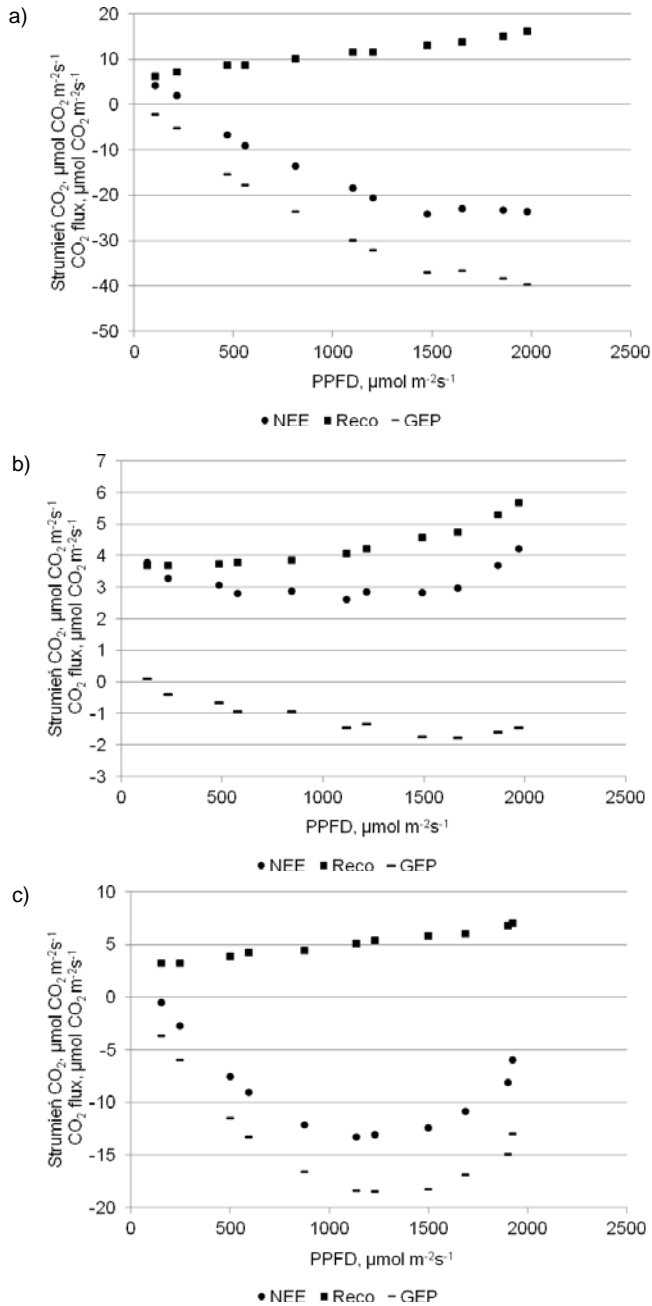
Rys. 8. Krzywe kumulacyjne wyemitowanej w procesach oddychania ekosystemu masy węgla (w postaci CO₂) w dniu 29.06.2011 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 8. Cumulative curves of carbon emitted (as a CO₂) through the ecosystem respiration processes on 29.06.2011; source: own studies

Największe bezwzględne wartości produkcji pierwotnej ekosystemu *GEP* (39,75 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) oraz wymiany netto *NEE* (24,08 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), czyli najwyższe pochłanianie CO₂ zaobserwowano na stanowisku z lucerną, charakteryzującą się największym udziałem części zielonych. Duża ilość aktywnej fotosyntetycznie biomasy na tym stanowisku zaowocowała przewagą procesów pochłaniania netto (większe wartości bezwzględne *NEE* niż *R_{eco}*) nad respiracją, co zaobserwowano już w warunkach stosunkowo małej wartości gęstości strumienia promieniowania *PPFD*, wynoszącej ok. 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (rys. 9a).

Z kolei wymiana netto (*NEE*) dojrzałej, składającej się głównie z nieaktywnej fotosyntetycznie biomasy pszenicy w dniu 29.06.2011 r., nie osiągnęła wartości ujemnych – tym samym stanowisko to stanowiło jedynie źródło, a nie pochłaniacz atmosferycznego CO₂ (rys. 9b). W związku z tym *GEP* dla pszenicy przyjmowało najmniejsze ujemne wartości – maksymalna produkcja pierwotna ekosystemu nie przekroczyła $-1,8 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ciekawym zagadnieniem jest dzienny przebieg *GEP* oraz *NEE* w przypadku ziemniaka. Produkcja pierwotna (*GEP*) osiąga tu maksimum już około godziny dziewiątej rano (wartość bezwzględna równa 18,45 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), gdy gęstość strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego *PPFD* wynosi 1230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, po czym mimo dalszego wzrostu gęstości strumienia *PPFD*, *GEP* wykazuje gwałtowny spadek (rys. 9c). Biorąc pod uwagę warunki wilgotnościowe i temperaturowe, panujące w okresie pomiarów (wilgotność objętościowa gleby na poziomie 8%, siła ssąca gleby równa 76 kPa) oraz budowę systemu korzeniowego ziemniaka, można dojść do wniosku, że wiąże się to z reakcją ziemniaka na stres



Rys. 9. Dzielne przebiegi pomierzonych wartości NEE i wymodelowanego R_{eco} oraz obliczonego GEP w dniu 29.06.2011 r. na stanowisku z: a) lucerną, b) pszenicą ozimą, c) ziemniakami; źródło: wyniki własne

Fig. 9. The daily courses of measured NEE values, modeled R_{eco} and calculated GEP on 29.06.2011 at plots: a) alfalfa, b) winter wheat, c) potato plants; source: own studies

wodny (ograniczenie intensywności fotosyntezy spowodowane zamykaniem się aparatów szparkowych).

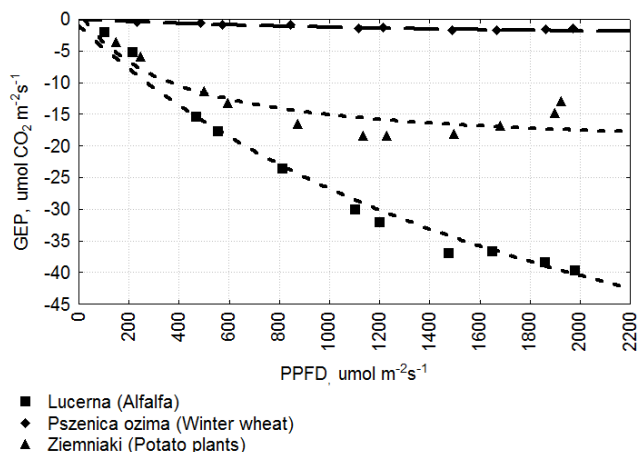
Na stanowisku z lucerną, która ma bardzo głęboko sięgający system korzeniowy i w związku z tym większą zdolność pobierania wody z głębszych warstw gleby, nie zaobserwowano problemu stresu wodnego, przejawiającego się ograniczeniem intensywności procesu fotosyntezy pomimo wzrostu gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (*PPFD*) [HEJCMAN, SMRŻ 2010].

Hipotezę tę potwierdza zestawienie siły ssącej gleby, zmierzonej w dniu pomiarów (76 kPa), z wartościami siły ssącej korzeni poszczególnych gatunków roślin uprawnych (lucerna, pszenica ozima i ziemniaki, odpowiednio 150, 67–110 i 30–50 kPa) [MOCEK i in. 2010; TAYLOR, ASHCROFT 1972; DAM i in. 1997]. W dniu 29.06.2011 r. wartość siły ssącej gleby przewyższyła siłę ssącą korzeni ziemniaka.

Pomiary komorowe umożliwiają określenie, czy dany ekosystem jest pochłaniaczem czy emiterym atmosferycznego dwutlenku węgla. Krzywe zależności produkcji pierwotnej ekosystemu (*GEP*) od *PPFD* przedstawiono na rysunku 10.

Parametry α (wartość współczynnika wykorzystania *PPFD*) oraz GP_{max} (maksymalna produkcja brutto ekosystemu) funkcji MICHAELISA i MENTENA [1913], opisującej zależność między *GEP* a *PPFD*, wykorzystano następnie do modelowania wymiany netto ekosystemu (*NEE*) (tab. 3).

Porównanie wartości wymodelowanej i rzeczywistej wymiany netto ekosystemu (*NEE*) wskazuje, że wybrany model [MICHAELIS, MENTEN 1913] sprawdził się



Rys. 10. Zależność produkcji pierwotnej ekosystemu (*GEP*) od promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (*PPFD*) dla poszczególnych stanowisk roślinnych w dniu 29.06.2011 r., z dopasowaną krzywą hiperboli trójkątnej MICHAELISA i MENTENA [1913]; źródło: wyniki własne

Fig. 10. The relationship between ecosystem primary production (*GEP*) and photosynthetically active radiation (*PPFD*) for particular crops on 29. 06. 2011 with fitted MICHAELIS and MENTEN curve [1913]; source: own studies

Tabela 3. Wartości współczynnika wykorzystania $PPFD - \alpha$ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) oraz maksymalnej produkcji brutto ekosystemu – GP_{max} ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) dla poszczególnych stanowisk roślinnych w dniu 29.06.2011 r.

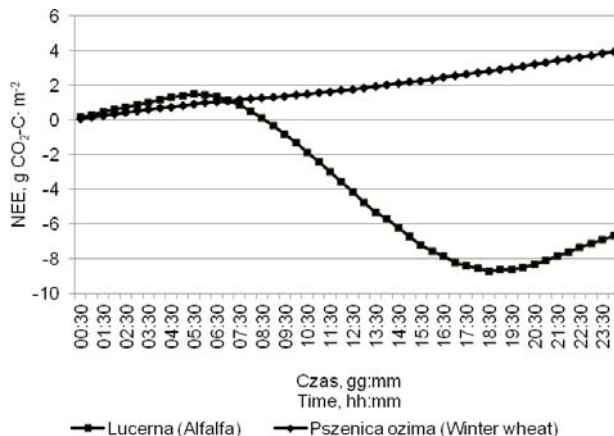
Table 3. The values of light use efficiency coefficient – α ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} / \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and the maximum rate of carbon fixation at “optimum” $PPFD - GP_{\text{max}}$ ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) for particular plant plots on 29. 06. 2011

Rodzaj uprawy Plant	Parametr funkcji MICHAELISA i MENTENA [1913] Parameters of the MICHAELIS and MENTEN [1913] function	
	α	GP_{max}
Lucerna Alfalfa	-0,049	-76,795
Pszenica ozima Winter wheat	-0,003	-2,863
Ziemniaki Potato plants	-0,063	-22,209

Źródło: wyniki własne. Source: own studies.

dla stanowiska z uprawą pszenicy ozimej i lucerny (średni bezwzględny błąd procentowy – $MAPE$ równał się, odpowiednio, 7,3 i 25,0%); z kolei prognozy NEE dla stanowiska z ziemniakami różniły się w znacznym stopniu ($MAPE$ równy 98,5%) od wartości pomierzonych.

Zakładając, że wartości oddychania ekosystemu R_{eco} zostały wymodelowane poprawnie (dla prognoz dotyczących ziemniaka $MAPE = 3,1\%$) przesłanką do dalszych badań jest poszukiwanie modelu, który uwzględniałby, oprócz $PPFD$, także inne czynniki środowiska, mogące mieć wpływ na proces fotosyntezy (np. wpływ wilgotności siedliska i dostępności wody fizjologicznej na przebieg procesów fotosyntezy i turgor roślin).



Rys. 11. Krzywe kumulacyjne wymiany netto ekosystemu (NEE) dla stanowisk z lucerną i pszenicą ozimą w dniu 29.06.2011 r.; źródło: wyniki własne

Fig. 11. Cumulative curves of net ecosystem exchange (NEE) for alfalfa and winter wheat plots on 29.06.2011; source: own studies

Ze względu na duże niedopasowanie modelu wymiany netto (*NEE*) dla ziemniaka, na rysunku 11. przedstawiono jedynie krzywe kumulacyjne węgla, który został zasymilowany bądź uwolniony z uprawy lucerny oraz pszenicy. W dniu 29.06.2011 r. stanowisko z uprawą lucerny pochłonęło sumarycznie 6,69 g·m⁻² węgla, natomiast w przypadku pszenicy odnotowano wyemitowanie 3,93 g·m⁻² węgla.

WNIOSKI

Z analizy materiału badawczego zebranego w dniu 29 czerwca 2011 r. wynikają następujące wnioski:

1. Dobowy przebieg oddychania ekosystemu (*R_{eco}*) był uzależniony od przebiegu temperatury powietrza oraz wierzchniej warstwy gleby.

2. Dobowa zmienność wymiany netto ekosystemu (*NEE*) jest uzależniona od kompleksu czynników środowiskowych, m.in. od przebiegu promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (*PPFD*) w ciągu dnia oraz dostępności wody, przy czym zasadniczy wpływ na wielkość tych strumieni ma faza rozwojowa roślin.

3. Wyniki modelowania oddychania ekosystemu (*R_{eco}*) dla poszczególnych upraw, uzyskane za pomocą modelu LLOYDA i TAYLORA [1994], nie różniły się średnio od wartości zmierzonych o więcej niż 4%, co świadczy o dużej dokładności predykcji modelu.

4. Wyniki modelowania wymiany netto ekosystemu (*NEE*), uzyskane za pomocą modelu MICHAELISA-MENTENA [1913] wskazują, że wybrany model sprawdził się dla stanowiska z lucerną i pszenicą (średni bezwzględny błąd procentowy – *MAPE* – równał się odpowiednio 7,3 i 25,0%). Z kolei prognozy *NEE* dla stanowiska z ziemniakami różniły się w znacznym stopniu (*MAPE* równy 98,5%) od wartości pomierzonych. Duże niedopasowanie zastosowanego modelu stanowi przesłankę do dalszych badań oraz poszukiwań modelu, który uwzględniłby, oprócz *PPFD*, także inne czynniki środowiska, mogące mieć wpływ na proces fotosyntezy.

LITERATURA

- BALDOCCHI D., FALGE E., GU L., OLSON R., HOLLINGER D., RUNNING S., ANTHONI P., BERNHOFER CH., DAVIS K., EVANS R., FUENTES J., GOLDSTEIN A., KATUL G., LAW B., LEE X., MALHI Y., MEYERS T., MUNGER W., OECHEL W., U PAW K.T., PILEGAARD K., SCHMID H.P., VALENTINI R., VERMA S., VESALA T., WILSON K., WOFSY S. 2001. FLUXNET. A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 82. No. 11. s. 2415–2434.
- BALDOCCHI D.D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*. Vol. 9. Iss. 4 s. 479–492.
- BELLISARIO L.M., MOORE T.R., BUBIER J.L. 1998. Net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland, northern Manitoba. *Ecoscience*. Vol. 5(4) s. 534–541.

- BLECHARCZYK A. 2002. Reakcja żyta ozimego i jęczmienia jarego na system następstwa roślin i nawożenie w doświadczeniu wieloletnim. Roczniki AR w Poznaniu. Rozprawy Naukowe. Nr 326. ISSN 0208-8436 ss. 127.
- BURBA, G.G., ANDERSON D.J. 2010. A brief practical guide to eddy covariance flux measurements: principles and workflow examples for scientific and industrial applications. Version 1.01. Lincoln, USA. LI-COR Biosciences. ISBN 0-6154-3013-9 ss. 211.
- CHOJNICKI B.H., MICHALAK M., ACOSTA M., JUSZCZAK R., AUGUSTIN J., DRÖSLER M., OLEJNIK J. 2010. Measurement of carbon dioxide fluxes by chamber method at Rzecin wetland ecosystem. Polish Journal of Environmental Studies. Vol. 19. No. 2 s. 283-291.
- COGLIATI S. 2011. Development of automatic spectrometric systems for proximal sensing of photosynthetic activity of vegetation [online]. PhD dissertation. Milan. Faculty of Mathematical, Physical and Natural Sciences, Department of Environmental Sciences, University of Milano-Bicocca. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://boa.unimib.it/handle/10281/19798>
- DAM J.C., HUYGEN J., WESSELING J.G., FEDDES R.A., KABAT P., VAN WALSUM P.E.V., GROENENDIJK P., VAN DIEPEN C.A. 1997. Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the soil-water-atmosphere-plant environment. Report 71. Wageningen, Netherlands. Department of Water Resources, Wageningen Agricultural University. ISSN 0928-0944 ss. 167.
- DAVIDSON E.A., BELK E., BOONE R.D. 2006. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*. Vol. 4. Iss. 2 s. 217-227.
- DAVIDSON E.A., SAVAGE K., VERCHOT L.V., NAVARRO R. 2002. Minimizing artifacts and biases in chamber – based measurements of soil respiration. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 113. Iss. 1-4 s. 21-37.
- DAVIDSON E.A., VERCHOT L.V., CATTANIO J.H., ACKERMAN I.L., CARVALHO J.E.M. 2000. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*. Vol. 48. Iss. 1 s. 53-69.
- DRÖSLER M. 2005. Trace gas exchange and climatic relevance of bog ecosystem, Southern Germany [online]. PhD Dissertation. Lehrstuhl für Vegetationsökologie, Department für Ökologie, Technische Universität München. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://mediatum2.ub.tum.de/doc/603619/603619.pdf>
- FANG C., MONCRIEFF J.B. 2001. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 33. Iss. 2 s. 155-165.
- FLANAGAN L.B., JOHNSON B.G. 2005. Interacting effects of temperature, soil moisture and plant biomass production on ecosystem respiration in a northern temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 130. Iss. 3-4 s. 237-253.
- FROLKING S. E., BUBIER J. L., MOORE T. R., BALL T., BELLISARIO L. M., BHARDWAJ A., CARROLL P., CRILL P. M., LAFTLEUR P. M., MCCAUGHEY J. H., ROULET N. T., SUYKER A. E., VERMA S. B., WADDINGTON J. M., WHITING G. J. 1998. Relationship between ecosystem productivity and photosynthetically active radiation for northern peatlands. *Global Biogeochemical Cycles*. Vol. 12. No. 1 s. 115-126.
- FUENTES D.A., GAMON J.A., CHENG Y., CLAUDIO H.C., QIU H., MAO Z., SIMS D.A., RAHMAN A.F., OECHEL W.C., HONGYAN L. 2006. Mapping carbon and water vapor fluxes in a chaparral ecosystem using vegetation indices derived from AVIRIS. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 103. Iss. 3 s. 312-323.
- GAMON J.A., RAHMAN A.F., DUNGAN J.L., SCHILDHAUER M., HUENNRICH K.F. 2006. Spectral network (SpecNet) – what is it and why do we need it? *Remote Sensing of Environment*. Vol. 103. Iss. 3 s. 227-235.

- GIFFORD R.M. 2003. Plant respiration in productivity models: conceptualisation, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. *Functional Plant Biology*. Vol. 30(2) s. 171–186.
- GITELSON A.A., VIÑA A., MASEK J.G., VERMA S.B., SUYKER A.E. 2008. Synoptic monitoring of gross primary productivity of maize using Landsat data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol. 5. No. 2 s. 133–137.
- HEJCMAN M., SMRŽ Z. 2010. Cropmarks in stands of cereals, legumes and winter rape indicate sub-soil archeological features in the agricultural landscape of Central Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 138. Iss. 3–4 s. 348–354.
- HUTCHINSON G.L., LIVINGSTON G.P. 2001. Vents and seals in non-steady state chambers used for measuring gas exchange between soil and the atmosphere. *European Journal of Soil Science*. Vol. 52 s. 675–682.
- JASSAL R.S., BLACK T.A., NOVAK M. D., GUAY G., NESIC Z. 2008. Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand. *Global Change Biology*. Vol. 14. Iss. 6 s. 1305–1318.
- JIN X., WANG S., ZHOU Y. 2008. Microbial CO₂ production from surface and subsurface soil as affected by temperature, moisture, and nitrogen fertilization. *Australian Journal of Soil Research*. Vol. 46. No 3 s. 273–280.
- JUSZCZAK R., ACOSTA M., MICHALAK M., CHOJNICKI B.H., URBANIAK M., DRÖSLER M., AUGUSTIN J., OLEJNIK J. 2010. Night-time CO₂ chamber measurements in peatland ecosystem in Poland. *Acta Agrophysica*. Vol. 179(2) s. 113–131.
- JUSZCZAK R., ACOSTA M., OLEJNIK J. 2012. Comparison of daytime and nighttime ecosystem respiration measured by the closed chamber technique on a temperate bog in Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 21. No. 3 s. 643–658.
- KEELING C.D., WHORF T.P. 1994. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. W: *Trends '93: a compendium of data on global change* [online]. Pr. zbior. Red. T.A. Boden. ORNL/CDIAC-65. Tennessee. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=10106351
- KETTUNEN R. 2007. N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from agricultural organic and mineral soils grown with Phleum pratense and mixed Trifolium pratense/P. pratense under elevated CO₂ concentration [online]. PhD Dissertations. Joensuu. University of Joensuu. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-219-007-9/urn_isbn_978-952-219-007-9.pdf.
- KIRSCHBAUM M.U.F., EAMUS D., GIFFORD R.M., ROXBURGH S.H., SANDS P.J. 2001. Definitions of some ecological terms commonly used in carbon accounting. In: *Net Ecosystem Exchange* [online]. Pr. zbior. Red. M.U.F Kirschbaum, R. Mueller. Canberra, Australia. Cooperative Research Centre for Greenhouse Accounting. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.kirschbaum.id.au/definitions.pdf>.
- KOZŁOWSKA M. (red.) 2007. *Fizjologia roślin*. Wyd. I. Poznań. PWRiL. ISBN 978-83-09-01023-4 ss. 544.
- LAW B.E., FALGE E., GU L., BALDOCCHI D.D., BAKWIN P., BERBIGIER P., DAVIS K., DOLMAN A.J., FALK M., FUENTES J.D., GOLDSTEIN A., GRANIER A., GRELE A., HOLLINGER D., JANSSENS I.A., JARVIS P., JENSEN N.O., KATUL G., MAHLI Y., MATTEUCCI G., MEYERS T., MONSON R., MUNGER W., OECHEL W., OLSON R., PILEGAARD K., PAW U K.T., THORGEIRSSON H., VALENTINI R., VERMA S., VESALA T., WILSON K., WOFSY S. 2002. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 113. Iss. 1–4 s. 97–120.

- LIVINGSTON G.P., HUTCHINSON G.L. 1995. Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. W: *Methods in ecology. Biogenic trace gases: measuring emissions from soil and water*. Pr. zbior. Red. P.A. Matson, R.C. Harris. Wyd. 1. Cambridge. Blackwell Science s. 14–51.
- LLOYD J., TAYLOR J.A. 1994. On the Temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*. Vol. 8. No. 3 s. 315–323.
- LOVETT G.M., COLE J.J., PACE M.L. 2006. Is net ecosystem production equal to ecosystem carbon accumulation? *Ecosystems*. Vol. 9. Iss. 1 s. 152–155.
- MAYEUX H., DUGAS W.A., SVEJCAR T., JOHNSON D., FRANK A., ANGELL A., MORGAN J., SIMS P., EMERICH B., HAFERKAMP M. 2002. Rangeland CO₂ fluxes: implications of results from the USDA-ARS FLUX NETWORK [online]. 25th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. American Meteorological Society [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.tucson.ars.ag.gov/unit/publications/PDFfiles/1546.pdf>
- MICHAELIS L., MENTEN M.L. 1913. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemistry Zeitung*. Vol. 49 s. 333–369.
- MICHALAK M., JUSZCZAK R., ACOSTA M., CHOJNICKI B.H., AUGUSTIN J., DRÖSLER M., OLEJNIK J. 2010. Comparison of observed and modeled daily ecosystem respiration (R_{eco}) and net ecosystem exchange (NEE). *Acta Agrophysica*. Vol. 179(2) s. 41–70.
- MICHALAK-GALCZEWSKA M. 2011. Dobowa i sezonowa zmienność strumieni CO₂ torfowiska w Rzećcinie. Praca doktorska. Poznań. Katedra Meteorologii, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu. Maszynopis ss. 112.
- MOCEK A., DRZYMAŁA S., MASZNER P. 2010. Geneza, analiza i klasyfikacja gleb. Wyd. 5. Poznań. Wydaw. AR. ISBN 978-8-3716-0586-4 ss. 418.
- MÜNCHMEYER U. 2000. Zur N-Umsetzung in degradierten Niedermoorböden Nordostdeutschlands unter besonderer Berücksichtigung der N-Mineralisierung und des Austrages gasförmiger N-Verbindungen. Dissertation. Universität Greifswald. Verlag Grauer. ISBN 3-86186-394-4 ss.118.
- NORMAN J.M., KUCHARIK C.J., GOWER S.T., BALDOCCHI D.D., CRILL P.M., RAYMENT M., SAVAGE K., STRIEGL R.G. 1997. A comparison of six methods for measuring soil-surface carbon dioxide fluxes. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 102. No. D24. s. 28,771–28,777.
- PUMPANEN J., KOLARI P., ILVESNIEMI H., MINKKINEN K., VESALA T., NIINISTÖ S., LOHILA A., LARMOLA T., MORERO M., PHILATIE M., JANSSENS I., YUSTE J. C., GRÜNZWEIG J.M., RETH S., SUBKE J., SAVAGE K., KUTSCH W., ØSTRENG G., ZIEGLER W., ANTHONI P., LINDROTH A., HARI P. 2004. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 123. Iss. 3–4 s. 159–176.
- ROCHETTE P., HUTCHINSON G.L. 2005. Measurement of soil respiration in situ: chamber techniques. *Micrometeorology in Agricultural Systems. Agronomy Monograph*. No. 47 s. 247–286.
- ROGIERS N. 2006. Impact of site history and land-management on CO₂ fluxes at a grassland in the Swiss Pre-Alps [online]. PhD dissertation. Bern, Switzerland. Institute of Geography, University of Bern. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: http://www.psi.ch/lac/ProjectDetailEuCarbomontEN/Diss_RogiersNele.pdf
- SIMS D.A., HONGYAN L., HASTINGS S., OECHEL W.C., RAHMAN A.F., GAMON J.A. 2006. Parallel adjustments in vegetation greenness and ecosystem CO₂ exchange in response to drought in a Southern California chaparral ecosystem. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 103. Iss. 3 s. 289–303.
- SMITH W.N., ROCHETTE P., MONREAL C., DESJARDINS R.L., PATTEY E., JAQUES A. 1997. The rate of carbon change in agricultural soils in Canada at the landscape level. *Canadian Journal of Soil Science*. Vol. 77(2) s. 219–229.

- SMITH P., MARTINO D., CAI Z., GWARY D., JANZEN H., KUMAR P., MCCARL B., OGLE S., O'MARA F., RICE C., SCHOLLES B., SIROTENKO O. 2007. Agriculture [online]. W: Climate change 2007: mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pr. zbior. Red. B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer. Cambridge. New York. Cambridge University Press. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg3/ar4-wg3-chapter8.pdf>.
- TAYLOR S.A., ASHCROFT G.M. 1972. Physical edaphology: the physics of irrigated and non-irrigated soils. San Francisco. W.H. Freeman and Company. ISBN 978-0-7167-0818-6 ss. 533.
- TEBRÜGGE F., EPPERLEIN J. 2011. Position paper: the importance of the conservation agriculture within the framework of the climate discussion [online]. Brussels. ECAF. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: <http://www.ecaf.org/docs/ecaf/positionpaperco2ecaf.pdf>
- URBANIAK M. 2006. Ocena sezonowej zmienności strumieni dwutlenku węgla i pary wodnej na terenach podmokłych metodą kowariancji wirów. Praca doktorska. Poznań. Katedra Agrometeorologii, Wydział Melioracji i Inżynierii Środowiska, AR. Maszynopis ss. 103.
- WEISKE A. 2007. Potential for carbon sequestration in european agriculture [online]. Specific targeted research project n°SSPE-CT-2004-503604. Impact of environmental agreements on the common agricultural policy. MEACAP WP3 D10a appendix. [Dostęp 20.10.2011]. Dostępny w Internecie: http://www.ieep.eu/assets/311/D10a_appendix_carbon_sequestration.pdf
- WHITING G.J. 1994. CO₂ exchange in the Hudson Bay lowlands: community characteristics and multispectral reflectance properties. Journal of Geophysical Research, Atmospheres. Vol. 99. No. D1 s. 1519–1528.
- YUAN W., LIU S., ZHOU G., ZHOU G., TIESZEN L.L., BALDOCCHI D., BERNHOFFER CH., GHOLZ H., GOLDSTEIN A.H., GOULDEN M.L., HOLLINGER D. Y., HU Y., LAW B.E., STOY P.C., VESALA T., WOFSY S.C. 2007. Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. Agricultural and Forest Meteorology. Vol. 143. Iss. 3–4 s. 189–207.
- ZHOU X., WAN S., LOU Y. 2007. Source components and interannual variability of soil CO₂ efflux under experimental warming and clipping in a grassland ecosystem, Global Change Biology. Vol. 13. Iss. 4 s. 761–775.

Karolina SAKOWSKA, Radosław JUSZCZAK, Bogna UŹDZICKA, Janusz OLEJNIK

DIURNAL VARIABILITY OF CO₂ FLUXES EXCHANGED BETWEEN THE ATMOSPHERE AND VARIOUS CROPS

Key words: chamber methods, CO₂ fluxes, ecosystem respiration, net ecosystem exchange, primary ecosystem production,

Summary

One of the methods to study the exchange of mass and energy between the atmosphere and the surface of various terrestrial ecosystems is direct measurement of the fluxes of greenhouse gases. Particular attention is focussed on carbon dioxide whose concentration in the atmosphere dramatically increases [URBANIAK 2006].

The paper presents results of the measurements of carbon dioxide exchange conducted on 29th of June 2011 on three experimental plots (alfalfa, winter wheat and potato crops) situated in Agricultural Experimental Station in Brody (Wielkopolskie Province) and modeled values of ecosystem respiration (R_{eco}), net ecosystem exchange (NEE) and gross ecosystem production (GEP). Measurements were carried out by means of closed dynamic chamber system.

R_{eco} measured on 29th of June 2011 ranged from 3.61 to 16.62 $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and measured NEE – from 4.22 to $-24.08 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.

Modeled values of the ecosystem respiration (R_{eco}) for particular crops obtained with the LLOYD and TAYLOR [1994] function did not differ from measured values by more than 4% on average.

The results of NEE modeling indicate that selected model [MICHAELIS, MENTEN 1913] worked well for sites with alfalfa and winter wheat crops (mean absolute percentage error – $MAPE$ was 25.0 and 7.3%, respectively). NEE predictions for the site with potato crop differed largely ($MAPE = 98.5\%$) from measured values and hence there is a need for looking for a model that would consider, apart from $PPFD$, also other environmental factors driving photosynthesis.