

Wpłynęło 12.03.2015 r.
Zrecenzowano 26.08.2015 r.
Zaakceptowano 03.09.2015 r.

A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

OCENA PRODUKTYWNOŚCI EKOSYSTEMÓW ŁĄKOWYCH NA PODSTAWIE POMIARÓW FOTOSYNTEZY BRUTTO

Janusz TURBIAK ABCDEF

Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy
w Bydgoszczy

Streszczenie

Celem pracy było określenie produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiarów fotosyntezy brutto. Badania prowadzono w latach 2008–2013 na sześciu stanowiskach zaliczonych do czterech kompleksów wilgotnościowo-glebowych. Fotosyntezę brutto określano metodą komorową. W okresie badań rośliny pobierały średnio w okresie wegetacyjnym od 1,08 kg C-CO₂·m⁻² na ekstensywnie użytkowanym kompleksie mokrym do 1,76 kg C-CO₂·m⁻² na intensywnie użytkowanym kompleksie wilgotnym. Stopień wykorzystania, pobranego w procesie fotosyntezy, węgla w plonie roślin był zależny od intensywności użytkowania łąk. Największy stopień wykorzystania węgla stwierdzono na kompleksie wilgotnym użytkowanym intensywnie jako łąka trzykośna – 20,7%, a najmniejszy na kompleksie mokrym użytkowanym ekstensywnie – 12,5%. Stwierdzono, że metoda oceny produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiaru fotosyntezy umożliwiała porównywanie ich względnej produktywności niezależnie od intensywności użytkowania.

Słowa kluczowe: ekosystem łąkowy, fotosynteza brutto, nawożenie mineralne, warunki wodne

WSTĘP

Produktywność ekosystemów określa się na podstawie ilości wytworzonej biomasy w jednostce czasu przez rośliny występujące na określonej powierzchni, a w agrocenozach na podstawie zebranego plonu. Wytwarzanie biomasy przez rośliny jest skorelowane z sumarycznym promieniowaniem pochłoniętym przez rośliny w ciągu całego okresu wegetacji i z wydajnością zamiany energii świetlnej

Do cytowania For citation: Turbiak J. 2015. Ocena produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiarów fotosyntezy brutto. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 15. Z. 4 (52) s. 57–68.

w energię chemiczną [KOWALSKA i in. 2013; PARZYCH, SOBISZ 2010; STARCK 2005]. Określanie produktywności ekosystemów w czasie umożliwia parametryzację modeli symulujących przebieg tego procesu w zależności od zmiennych czynników klimatyczno-glebowych, a tym samym uzyskanie wiedzy o efektywnym użytkowaniu badanych ekosystemów.

Istotną kwestią jest porównywanie produktywności ekosystemów w zależności od intensywności ich użytkowania i przebiegu warunków meteorologiczno-glebowych. W przypadku ekosystemów łąkowych porównywanie ich rzeczywistej produktywności jest możliwe tylko w przypadku regularnego zbioru plonu [WASIŁEWSKI 2014]. Trudno jest natomiast określić rzeczywistą produktywność ekosystemów użytkowanych ekstensywnie, np. koszonych tylko jeden raz w okresie wegetacyjnym lub nieużytkowanych. W takich przypadkach ocena produktywności na podstawie zebranego plonu jest zaniżana, ponieważ część lub całość wytworzonego plonu pozostaje na powierzchni gleby. Dlatego też przeprowadzono ocenę produktywności łąk położonych w siedliskach o zróżnicowanych warunkach wodnych i różnej intensywności ich użytkowania na podstawie ilości CO₂ pobranego w procesie fotosyntezy. Całkowita ilość węgla pobranego przez rośliny w procesie fotosyntezy jest określana jako fotosynteza brutto. Fotosynteza brutto jest oznaczana najczęściej z wykorzystaniem metody komorowej, która polega na określeniu zmian stężenia CO₂ w powietrzu szczelnej komory, instalowanej na powierzchni gleby [ALM i in. 1997; CHOJNICKI i in. 2012; ELSGAARD i in. 2012; LOHILA i in. 2003; MALJANEN i in. 2004; TURBIAK 2013].

Celem pracy było określenie produktywności ekosystemów łąkowych w zależności od warunków wodnych i intensywności ich użytkowania na podstawie pomiarów fotosyntezy brutto.

OBIEKT I METODY BADAŃ

Badania prowadzono w latach 2008–2013 na glebach pobagiennych w Dolinie Noteci na czterech prognostycznych kompleksach wilgotnościowo-glebowych: mokrym (A), wilgotnym (B), posuszonym (C) i okresowo suchym (CD), według klasyfikacji OKRUSZKI [1976]. Kompleksy te były położone na dwóch obiektach o zróżnicowanej intensywności użytkowania. Na średnio intensywnie użytkowanym obiekcie Frydrychowo (F) badania prowadzono na trzech kompleksach: wilgotnym (F/B), posuszonym (F/C) i okresowo-suchym (F/CD), natomiast na ekstensywnie użytkowanym obiekcie Minikowo (M) na kompleksach: mokrym (M/A), wilgotnym (M/B) i okresowo-suchym (M/CD). Nawożenie mineralne na obiekcie użytkowanym średnio intensywnie wynosiło: N – 50, P₂O₅ – 40 i K₂O – 60 kg·ha⁻¹. Na kompleksach użytkowanych ekstensywnie nie stosowano nawożenia mineralnego.

W obrębie kompleksu mokrego (M/A) badania prowadzono na glebie torfowo-murszowej Mtlaa, o miąższości warstwy murszowej 14 cm, wytworzonej ze słabo

rozłożonych torfów mechowiskowych. W obrębie kompleksu wilgotnego na dwóch stanowiskach (F/B i M/B) – na glebie MtIIbb, o miąższości warstwy murszowej 30 cm, wytworzonej ze średnio rozłożonego torfu turzycowiskowego i na glebie MtIIaa, o miąższości warstwy murszowej 25 cm, wytworzonej ze słabo rozłożonego torfu mechowiskowego. W obrębie kompleksu posusznego (F/C) – na płytkiej (60 cm) glebie torfowo-murszowej MtIIIc1, o miąższości warstwy murszowej 40 cm, wytworzonej z silnie rozłożonego torfu turzycowiskowego. W obrębie kompleksów okresowo suchego (CD) na dwóch stanowiskach: F/CD na glebie murszowatej (Me11), o miąższości warstwy murszowatej 23 cm, zalegającej na piasku luźnym i M/CD na glebie murszowatej (Me22), zalegającej na piasku gliniastym.

Na wszystkich kompleksach wilgotnościowo-glebowych występowały zbiorowiska trawiaste. Na kompleksach użytkowanych intensywnie F/B i F/C gatunkami dominującymi były wiechlina łąkowa (*Poa pratensis* L.) i wyczyniec łąkowy (*Alopecurus pratensis* L.), a na kompleksie F/CD rajgras wyniosły (*Arrhenatherum elatius* L.). Na kompleksie użytkowanym ekstensywnie M/A gatunkiem dominującym była kostrzewa trzcinowa (*Festuca arundinacea* Schreb.), na kompleksie M/B – mietlica rozłogowa (*Agrostis stolonifera* L.), a na kompleksie M/CD – rajgras wyniosły (*Arrhenatherum elatius* L.).

Pomiary strumieni CO₂ wykonywano metodą komór zamkniętych statycznych trzy razy w miesiącu, z wykorzystaniem miernika dyfuzyjnego CO₂ (SenseAir), który był umieszczany wewnątrz komory pomiarowej. Komora o wymiarach 40 × 40 × 35 cm była wyposażona w wentylator oraz zamykany otwór umożliwiający wyrównanie ciśnienia między komorą a atmosferą. W trakcie pomiaru przezroczystą komorę pleksiglasową umieszczano w stalowych ramkach osadzonych na powierzchni gleby. Czas pomiaru wymiany ekosystemu netto (*NEE*), określanej w warunkach dopływu światła i ogólnej aktywności respiracyjnej (*TER*), określanej w warunkach zaciemnienia, wynosił łącznie ok. 10–12 min. Do określenia wartości strumieni CO₂ wykorzystywano pomiar z pierwszych 1–2 min., w których zmiany stężenia CO₂ były prostoliniowe. Pomiary prowadzono w godzinach od 10:00 do 15:00, od połowy kwietnia do końca października. Zmiany stężenia CO₂ w ppmv były przeliczane na mg·m⁻²·h⁻¹, według wzoru [MOSIER, MACK 1980]:

$$E = \rho \cdot V/A \cdot \Delta C/\Delta t \cdot 273/(T + 273) \quad (1)$$

gdzie:

- E = gęstość strumienia CO₂, mg·m⁻²·h⁻¹;
- ρ = gęstość gazu, mg·m⁻³;
- V = objętość komory, m³;
- A = powierzchnia pomiarowa, m²;
- $\Delta C/\Delta t$ = średnie tempo zmian stężenia gazu w czasie, ppmv·h⁻¹;
- T = temperatura wewnątrz komory, °C.

Wartość fotosyntezy brutto (P_G – gross photosynthesis), która oznacza całkowitą ilość CO_2 pochłoniętego przez rośliny, obliczano jako różnicę ogólnej aktywności respiracyjnej ekosystemu (TER) i wymiany ekosystemu netto (NEE), według równania:

$$P_G = TER - NEE \quad (2)$$

Pomiary fotosyntezy brutto prowadzono na wszystkich obiektach w stałej kolejności. Średnie godziny pomiaru przedstawiono w tabeli 1. Średnie w okresie badań natężenie radiacji słonecznej na poszczególnych obiektach wynosiło odpowiednio: 0,506; 0,554; 0,560; 0,513; 0,475 i 0,444 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. Maksymalne natężenie radiacji słonecznej stwierdzono o godzinie 12:00 – 0,562 $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$. W celu wyeliminowania wpływu zróżnicowanego natężenia radiacji słonecznej na wydajność fotosyntezy brutto zastosowano współczynniki przeliczeniowe obliczone jako stosunek wartości maksymalnej P_G o godzinie 12:00 do wartości P_G dla średniej godziny prowadzenia pomiaru na danym kompleksie. Wartości tych współczynników dla kompleksów F/B, F/C, F/CD, M/A, M/B i M/CD wynosiły odpowiednio: 1,041; 1,006; 1,000; 1,014; 1,034 i 1,073. Wartości P_G obliczono za pomocą równania MICHAELISA i MENTEN [1913], dla zależności między natężeniem promieniowania słonecznego a fotosyntezą brutto na danym kompleksie wilgotnościowym dla całego okresu badań, według równania:

$$P_G = \frac{\alpha R P_{Gmax}}{\alpha R + P_{Gmax}} \quad (3)$$

gdzie:

- α = współczynnik wykorzystania radiacji;
- R = radiacja, $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;
- P_{Gmax} = fotosynteza brutto ekosystemu w warunkach optymalnej radiacji słonecznej, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$.

Tabela 1. Średnie godziny prowadzenia pomiarów

Table 1. Mean hours of measurements

Rok Year	Godziny prowadzenia pomiarów na kompleksie Hours of measurements on a complex					
	F/B	F/C	F/CD	M/A	M/B	M/CD
2008	10:19	11:26	12:10	13:32	14:07	14:33
2009	10:01	11:09	11:53	13:53	14:35	15:07
2010	10:16	11:13	11:55	13:27	14:16	14:45
2011	10:11	11:03	11:42	13:16	14:02	14:20
2012	10:07	10:48	11:26	13:11	13:36	13:57
2013	10:18	11:03	11:36	13:03	13:35	14:04
Średnia Mean	10:12	11:07	11:47	13:24	14:02	14:28

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Współczynniki α i $P_{G_{\max}}$ podczas obliczania wartości P_G zostały indywidualnie dopasowane do zbiorów danych w kolejnych latach z wykorzystaniem programu Statistica 7.1. Równanie 3. wykorzystano także do obliczenia wartości fotosyntezy w całym okresie wegetacyjnym na podstawie godzinowych pomiarów promieniowania słonecznego, prowadzonych na stacji meteorologicznej we Frydrychowie.

Po zakończeniu pomiarów rośliny znajdujące się wewnątrz ramek były ścinane w celu określenia wielkości biomasy. Ścięte rośliny suszono w temperaturze 40°C, do uzyskania stałej masy. Przyjęto, że sucha masa zawierała 44% węgla [ELSGARD i in. 2012]. Zawartość węgla w roślinach przeliczono na CO₂, mnożąc jego zawartość przez współczynnik 3,67.

Średnią głębokość poziomu wody gruntowej na poszczególnych stanowiskach pomiarowych przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Średni poziom wody gruntowej w okresie wegetacyjnym, cm

Table 2. Mean ground water level in the growing season, cm

Rok Year	Poziom wody gruntowej na kompleksie Ground water level in a complex					
	F/B	F/C	F/CD	M/A	M/B	M/CD
2008	64	66	122	39	79	136
2009	61	63	119	26	74	146
2010	48	54	110	15	33	124
2011	62	59	115	27	51	129
2012	61	60	110	19	29	124
2013	49	59	106	41	39	128
Średnia Mean	58	60	114	28	51	131

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

WYNIKI BADAŃ

Zasadniczym czynnikiem różnicującym wartość fotosyntezy brutto na kompleksach użytkowanych ekstensywnie były warunki wodne. Na tych kompleksach największą wartość fotosyntezy brutto (P_G) stwierdzono na kompleksie wilgotnym (M/B) – 2,29 g CO₂·m⁻²·h⁻¹. W okresie badań średni poziom wody gruntowej na tym kompleksie utrzymywał się na głębokości 51 cm (tab. 2). Korzystne warunki tlenowe w powierzchniowej warstwie profilu glebowego sprzyjały intensyfikacji procesu mineralizacji masy organicznej, a tym samym zwiększały dostępność składników pokarmowych. Wartość fotosyntezy brutto na kompleksie wilgotnym była o 8,0 i 18,7% większa niż na kompleksach okresowo suchym (M/CD) i mokrym (M/A), na których wartości P_G wynosiły odpowiednio 2,12 i 1,93 g CO₂·m⁻²·h⁻¹ (tab. 3). Mniejsza wartość fotosyntezy na kompleksie okresowo suchym CD była związana z występującym okresowo niedoborem wody, natomiast na kompleksie

Tabela 3. Wartości fotosyntezy brutto na poszczególnych kompleksach wilgotnościowych**Table 3.** Gross photosynthesis on particular moisture complexes

Rok Year	Fotosynteza brutto ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) na kompleksach Gross photosynthesis ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) on complexes											
	F/B		F/C		F/CD		M/A		M/B		M/CD	
	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>	\bar{x}	<i>SD</i>
2008	2,83	1,21	2,81	1,16	2,16	0,96	2,04	0,94	2,04	1,31	1,82	0,86
2009	3,51	1,56	3,11	1,64	2,24	1,33	2,33	1,07	2,38	1,14	2,05	1,11
2010	2,95	1,26	2,90	1,18	2,35	1,26	2,11	0,87	2,55	1,30	2,27	1,53
2011	3,40	1,64	3,67	1,60	2,09	1,12	1,79	0,72	2,45	1,05	2,28	1,14
2012	3,24	1,75	2,79	1,32	1,99	1,50	1,39	1,07	1,99	1,14	2,18	1,16
2013	3,01	1,53	2,89	1,37	2,32	1,36	1,90	0,76	2,30	1,00	2,12	1,06
Średnia Mean	3,16	1,52	3,03	1,42	2,19	1,27	1,93	0,96	2,29	1,17	2,12	1,18

Objaśnienia: \bar{x} – wartość średnia, *SD* – odchylenie standardowe.

Explanations: \bar{x} – mean value, *SD* – standard deviation.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

mokrym – z mniejszą dostępnością składników pokarmowych, w związku z ograniczoną mineralizacją masy organicznej w warunkach dużego uwilgotnienia gleby. Dodatkowym czynnikiem powodującym ograniczenie fotosyntezy brutto na kompleksie mokrym była także mała intensywność użytkowania. Brak koszenia lub wykonanie tylko jednego pokosu w okresie wegetacyjnym powodowały, że wiosną na powierzchni gleby występowały częściowo zaschnięte rośliny, które zacieniały glebę. Powodowało to wyraźne opóźnienie rozpoczęcia okresu wegetacyjnego, a tym samym ograniczenie tempa pochłaniania CO_2 .

Na kompleksach użytkowanych intensywnie największą wartość fotosyntezy brutto stwierdzono na kompleksie wilgotnym (F/B) – $3,16 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Nieznacznie mniejszą wartość P_G stwierdzono na kompleksie posuszonym (F/C) – $3,03 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$. Na obu kompleksach poziom wody gruntowej utrzymywał się na podobnej głębokości, tj. 58 i 60 cm (tab. 2). Nieznacznie mniejsza wartość P_G na kompleksie posuszonym była związana z okresowym niedoborem wody dla roślin, występującym w okresach, gdy poziom wody gruntowej obniżał się poniżej warstwy organicznej. Na podobnie użytkowanym kompleksie okresowo suchym (F/CD) fotosynteza brutto wynosiła $2,19 \text{ g CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ i była o 30,7% mniejsza niż na kompleksie F/B (tab. 3). Znacznie mniejsza wartość fotosyntezy brutto na tym kompleksie była związana głównie z niedoborem wody dostępnej dla roślin, w związku z ich zasilaniem tylko wodą opadową. W warunkach niedoboru wody dochodzi do zamykania aparatów szparkowych roślin, które powoduje ograniczenie dopływu CO_2 do chloroplastów i zmniejszenia wydajności fotosyntezy [SAKOWSKA i in. 2012; STĘPNIEWSKA i in. 2004].

Na obu poziomach intensywności użytkowania łąk, tj. ekstensywnym i intensywnym, największe wartości fotosyntezy stwierdzono na kompleksie wilgotnym (B), na którym utrzymywały się najkorzystniejsze dla rozwoju roślin warunki wilgotnościowe. Na kompleksach, na których zawartość wody w glebie była zbyt duża lub występowały niedobory wody wydajność fotosyntezy była mniejsza. Z kolei większa wydajność fotosyntezy na kompleksach użytkowanych intensywnie była związana głównie ze stosowaniem nawożenia mineralnego, które stymulowało tempo pobierania CO₂ przez rośliny.

Porównując metody oceny produktywności łąk na podstawie pomiarów wartości fotosyntezy i plonu siana stwierdzono, że między obiema metodami występowały duże różnice. Na trzech kompleksach użytkowanych intensywnie wartość fotosyntezy brutto wynosiła średnio w okresie badań 2,11 g·m⁻²·h⁻¹, natomiast na kompleksach użytkowanych ekstensywnie – 2,79 g·m⁻²·h⁻¹ (tab. 3). Na kompleksach użytkowanych intensywnie wartość ta była o 32,2% większa niż na kompleksach użytkowanych ekstensywnie. Z kolei średni plon siana na kompleksach użytkowanych ekstensywnie wynosił 362 g·m⁻², natomiast na kompleksach użytkowanych intensywnie 706 g·m⁻² (tab. 4) i był o 95,0% większy niż na kompleksach użytkowanych ekstensywnie. Duża różnica między wynikami oceny produktywności kompleksów użytkowanych intensywnie i ekstensywnie na podstawie plonów siana i fotosyntezy brutto była związana przede wszystkim z niedoszacowaniem produktywności na kompleksach użytkowanych ekstensywnie w związku ze znacznie mniejszą liczbą pokosów zbieranych na tych kompleksach. Na kompleksach użytkowanych ekstensywnie zbierano w okresie wegetacyjnym przeciętnie od 0,5 do 1,8 pokosu, natomiast na użytkowanych intensywnie – od 2,2 do 3,0 (tab. 4). Na

Tabela 4. Plony siana (g·m⁻²) na poszczególnych kompleksach wilgotnościowych

Table 4. Hay yields (g·m⁻²) on particular moisture complexes

Rok Year	Plon siana na kompleksach Hay yields on complexes												Średnia Mean
	F/B		F/C		F/CD		M/A		M/B		M/CD		
	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	
2008	939	3	736	2	867	3	0	0	367	1	522	2	572
2009	709	3	755	2	474	2	0	0	473	2	561	2	495
2010	684	3	685	2	392	2	240	1	699	2	540	2	540
2011	885	3	595	2	461	2	0	0	248	1	439	2	438
2012	880	3	792	2	572	2	326	1	690	2	318	1	596
2013	874	3	761	3	639	3	353	1	176	1	570	2	562
Średnia Mean	829	3,0	721	2,2	568	2,3	153	0,5	442	1,5	492	1,8	534

Objaśnienia: \bar{x} – wartość średnia, *n* – liczba pokosów.

Explanations: \bar{x} – mean value; *n* – number of cuts.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że ocena potencjalnej produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiaru fotosyntezy umożliwia bardziej obiektywne porównywanie ich względnej produktywności niż na podstawie zebranego plonu siana.

Istotnym zagadnieniem było określenie, jaka część pochłoniętego przez rośliny węgla została wykorzystana do wytworzenia plonu na poszczególnych kompleksach wilgotnościowych. Na kompleksach użytkowanych intensywnie stopień wykorzystania węgla, pobranego w procesie fotosyntezy, był bardzo podobny i wynosił od 18,6% na kompleksie posuszonym do 20,7% na kompleksie wilgotnym. Na kompleksach użytkowanych ekstensywnie stwierdzono większe zróżnicowanie. W plonie siana znajdowało się od 12,5% C-CO₂ na kompleksie mokrym do 18,0% na kompleksie wilgotnym (tab. 5). Mniejszy stopień wykorzystania węgla na kompleksach użytkowanych ekstensywnie, w szczególności na kompleksie mokrym, był związany przede wszystkim z mniejszą liczbą pokosów i pozostawianiem części wytworzonej biomasy na powierzchni gleby. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że największe wykorzystanie węgla pobranego w procesie fotosyntezy stwierdzono na łące użytkowanej jako łąka trzykośna.

Tabela 5. Udział węgla zawartego w biomase w stosunku do pobranego w procesie fotosyntezy

Table 5. The proportion of biomass carbon in relation to taken up in the photosynthesis process

Parametr Parameter	Fotosynteza brutto P_G i plon roślin na kompleksach: Gross photosynthesis P_G and plant yield on complexes:							średnia mean
	F/B	F/C	F/CD	średnia mean	M/A	M/B	M/CD	
P_G , kg·m ⁻²	1,76	1,70	1,25	1,57	1,08 ¹⁾	1,31	1,20	1,19
C w plonie kg·m ⁻² C in yield, kg·m ⁻²	0,36	0,32	0,25	0,31	0,13 ¹⁾	0,19	0,22	0,18
%	20,7	18,6	20,0	19,8	12,5	14,9	18,0	15,1

¹⁾ Średnie z lat, w których wykonano zbiór siana.

¹⁾ Means of the years in which hay was harvested.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Podobne wartości akumulacji węgla stwierdzono w badaniach prowadzonych w zbiorowisku turzycy sztywnej. W biomase części nadziemnych zostało zakumulowane ok. 15% węgla związanego w procesie fotosyntezy. Pozostała część węgla była akumulowana w korzeniach lub została wykorzystana w procesie autotroficznej respiracji roślin [CHOJNICKI i in. 2012].

Ograniczona liczba pokosów na kompleksach użytkowanych ekstensywnie powodowała, że średnia biomasa roślin na tych kompleksach była większa niż na kompleksach użytkowanych intensywnie. Na kompleksach użytkowanych ekstensywnie M/B, M/A i M/CD średnia biomasa roślin w okresie wegetacyjnym wyno-

siła odpowiednio 202, 194 i 178 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$. Wartości te były średnio o 21,1% większe niż na kompleksach użytkowanych intensywnie F/B, F/C i F/CD, na których wynosiły one odpowiednio 173, 159 i 142 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (tab. 6).

Tabela 6. Średnia biomasa roślin ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) na poszczególnych kompleksach wilgotnościowych

Table 6. Mean plant biomass ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) on particular moisture complexes

Rok Year	Średnia biomasa roślin na kompleksach Mean plant biomass on complexes												Średnia Mean
	F/B		F/C		F/CD		M/A		M/B		M/CD		
	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>N</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	\bar{x}	<i>n</i>	
2008	221	14	181	14	168	12	260	12	229	13	202	12	210
2009	173	17	182	17	134	18	201	16	200	18	187	18	180
2010	154	20	131	20	118	20	145	20	193	20	165	20	151
2011	148	19	133	19	144	19	188	15	186	18	160	19	160
2012	166	20	161	20	144	20	185	20	183	20	156	20	166
2013	177	16	167	16	145	16	183	16	220	15	196	16	181
Średnia Mean	173	18	159	18	142	18	194	17	202	17	178	18	175

Objaśnienia: \bar{x} – wartość średnia, *n* – liczba pokosów.

Explanations: \bar{x} – mean value; *n* – number of cuts.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Pomimo większej biomasy roślin na kompleksach użytkowanych ekstensywnie, średnie wartości fotosyntezy na jednostkę biomasy były na tych kompleksach znacznie mniejsze niż na kompleksach użytkowanych intensywnie. Stwierdzono, że na kompleksach nawożonych F/B i F/C fotosynteza brutto w każdym przedziale wagowym biomasy roślin była większa niż na kompleksach użytkowanych ekstensywnie. W przedziałach 0–100; 101–200; 201–300 i ponad 300 $\text{g s.m.} \cdot \text{m}^{-2}$ wydajność fotosyntezy brutto na kompleksach użytkowanych intensywnie była odpowiednio o 64,5; 60,3; 37,1 i 58,2 % większa niż na kompleksach nienawożonych – średnio o 53,2% (tab. 7).

Intensywniejsze tempo pochłaniania CO_2 przez rośliny na kompleksach nawożonych powodowało, że osiągały one biomasę powyżej 300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ znacznie szybciej niż na kompleksach nienawożonych. W wyniku tego, tempo pobierania CO_2 na tych kompleksach było większe, gdy biomasa wynosiła powyżej 300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ niż gdy biomasa mieściła się w przedziale od 200 do 300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ (tab. 7). Na kompleksach nienawożonych tempo pobierania CO_2 , gdy biomasa wynosiła powyżej 300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ było natomiast mniejsze niż gdy biomasa mieściła się w przedziale od 200 do 300 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$, głównie w związku z występowaniem w runi częściowo zaschniętych roślin.

Tabela 7. Wartość fotosyntezy brutto w zależności od biomasy roślin**Table 7.** Gross photosynthesis in relation to plant biomass

Kompleks Complex	Wartość fotosyntezy ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) przy biomase roślin ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) w przedziale: Value of photosynthesis ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) at plant biomass ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) in the range:				
	0–100	101–200	201–300	>301	średnia mean
F/B	2,23	3,42	3,48	3,53	3,17
F/C	2,42	3,11	3,40	3,60	3,13
F/CD	1,24	2,65	3,11	2,39	2,35
M/A	1,33	1,90	2,22	2,07	1,88
M/B	1,58	2,04	2,90	2,30	2,21
M/CD	1,33	2,17	2,41	2,39	2,08
Średnia Mean	1,69	2,55	2,92	2,71	2,47

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

W okresie badań rośliny pobierały średnio w okresie wegetacyjnym od 1,08 kg C-CO₂·m⁻² na ekstensywnie użytkowanym kompleksie mokrym do 1,76 kg C-CO₂·m⁻² na intensywnie użytkowanym kompleksie wilgotnym (tab. 5). Wartości te były mniejsze niż prezentowane w pracach innych autorów. ELSGAARD i in. [2012] na trwałych użytkach zielonych uzyskali wartości fotosyntezy brutto w zakresie od 2,2 do 2,5 kg C-CO₂·m⁻²·rok⁻¹, natomiast GÖRRES i in. [2014] w zakresie od 1,8 do 2,5 kg C-CO₂·m⁻²·rok⁻¹. Mniejsze wartości fotosyntezy stwierdzone w prowadzonych badaniach były związane z niskim poziomem intensywności użytkowania. Podobne wartości P_G uzyskał natomiast TANKA i in. [2013] w uprawie mozgi trzcinowatej (*Phalaris arundinacea* L.) na glebie torfowej – 1,88 kg C-CO₂·m⁻²·rok⁻¹.

WNIOSKI

1. Największe wartości fotosyntezy, niezależnie od intensywności użytkowania, stwierdzono na kompleksie wilgotnym (B), na którym utrzymywały się najkorzystniejsze do rozwoju roślin warunki wilgotnościowe. Na kompleksach, na których występowało nadmierne uwilgotnienie gleby lub niedobory wody wydajność fotosyntezy brutto była wyraźnie mniejsza.

2. W ekosystemach użytkowanych ekstensywnie średnia biomasa roślin w okresie wegetacyjnym była o 21,1% większa niż w ekosystemach użytkowanych intensywnie.

3. W okresie badań rośliny pobierały średnio w okresie wegetacyjnym od 1,08 kg C-CO₂·m⁻² na ekstensywnie użytkowanym kompleksie mokrym do 1,76 kg C-CO₂·m⁻² na intensywnie użytkowanym kompleksie wilgotnym.

4. Stopień wykorzystania węgla pobranego w procesie fotosyntezy w plonie roślin był zależny od intensywności użytkowania łąk. Największy stopień wykorzy-

stania węgla stwierdzono na kompleksie wilgotnym użytkowanym jako łąka trzykośna – 20,7%, a najmniejszy na kompleksie mokrym użytkowanym ekstensywnie – 12,5%.

5. Metoda oceny produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiaru fotosyntezy brutto umożliwia porównywanie ich względnej produktywności niezależnie od intensywności użytkowania.

LITERATURA

- ALM J., TALANOV A., SAARNIO S., SILVOLA J., IKKONEN E., AALTONEN H., NYKÄNEN H., MARTIKAINEN P. 1997. Reconstruction of the carbon balance for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*. Vol. 110 s. 423–431.
- CHOJNICKI B.H., MICHALAK M., KONIECZNA N., OLEJNIK J. 2012. Sedge community (*Caricetum elatae*) carbon dioxide exchange seasonal parameters in a wetland. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 21 No 3 s. 579–587.
- ELSGAARD L., GÖRRES C.M., HOFFMANN C.CH., BLICHER-MATHIESEN G., SCHELDE K., PETERSEN S.O. 2012. Net ecosystem exchange of CO₂ and carbon balance for eight temperate organic soils under agricultural management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 162 s. 52–67.
- GÖRRES C.-M., KUTZBACH L., ELSGAARD L. 2014. Comparative modeling of annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 186 s. 64–76.
- KOWALSKA N., CHOJNICKI B.H., JÓZEFczyk D., URBANIAK M., JUSZCZAK R., OLEJNIK J. 2013. Próba oceny produktywności ekosystemu w warunkach połowich Wielkopolski. *Rocznik Ochrona Środowiska*. T. 15 s. 2481–2495.
- LOHILA A., AURELA M., REGINA K., LAURILA T. 2003. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: effect of soil and crop type. *Plant and Soil*. Vol. 251 s. 303–317.
- MALJANEN M., KOMULAINEN V.M., HYTONEN J., MARTIKAINEN P.J., LAINE J. 2004. Carbon dioxide, nitrous oxide and methane dynamics in boreal organic agricultural soils with different soil characteristics. *Soil Biology and Biochemistry*. Vol. 36. Iss. 11 s. 1801–1808.
- MICHAELIS L., MENTEN M.L. 1913. Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemistry Zeitung*. Vol. 49 s. 333–369.
- MOSIER A.R., MACK L. 1980. Gas-chromatographic system for precise, rapid analysis of nitrous oxide. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44 s. 1121–1123.
- OKRUSZKO H. 1976. Zasady rozpoznawania i podziału gleb hydrogenicznych z punktu widzenia potrzeb melioracji. W: *Materiały pomocnicze do badań gleboznawczych przy projektowaniu melioracji*. Pr. zbior. Red. H. Okruszko. Biblioteczka Wiadomości IMUZ. Nr 52 s. 7–54.
- PARZYCH A., SOBISZ Z. 2010. Biomasa i produkcja pierwotna netto roślin runa w wybranych zespołach leśnych Słowińskiego Parku Narodowego. *Ochrona Środowiska i Zasobów*. Nr 42 s. 72–83.
- STĘPNIEWSKA Z., PRZYWARA G., BENNICELLI R.P. 2004. Reakcja roślin w warunkach anaerobiozy. *Acta Agrophysica. Rozprawy i Monografie*. Nr 7. Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie. ISSN 1234-4125 ss. 86.
- STARCK Z. 2005. Fizjologiczne podstawy produktywności roślin. W: *Fizjologia roślin*. Pr. zbior. Red. J. Kopcewicz, S. Lewak. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN s. 679–706.
- SAKOWSKA K., JUSZCZAK R., UŹDZICKA B., OLEJNIK J. 2012. Zmienność dobową strumieni CO₂ wymienianych między atmosferą a różnymi uprawami rolniczymi. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 12. Z. 2(38) s. 221–244.

- TANKA P., ELSGAARD L., LÆRKE E.P. 2013. Measurement and modelling of CO₂ flux from a drained fen peatland cultivated with reed canary grass and spring barley. GCB Bioenergy. Vol. 5 s. 548–561.
- TURBIAK J. 2013. Ocena ubytku masy organicznej w glebie murszowatej na podstawie pomiarów strumieni emisji CO₂. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 13. Z. 2(42) s. 147–159.
- WASILEWSKI Z. 2014. Wielkość i jakość plonów z łąk ekstensywnie użytkowanych i koszonych w dwóch terminach. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 14. Z. 1(45) s. 101–109.

Janusz TURBIAK

**AN ASSESSMENT OF THE PRODUCTIVITY OF MEADOW ECOSYSTEMS
BASED ON GROSS PHOTOSYNTHESIS MEASUREMENTS**

Key words: *gross photosynthesis, meadow ecosystem, mineral fertilisation, water conditions*

S u m m a r y

The aim of the paper was to determine the meadow ecosystem productivity based on gross photosynthesis measurements. The studies were carried out in the years 2008–2013 on four soil-moisture complexes. The gross photosynthesis was determined by a chamber method. During the study period, plants absorbed on average from 1.08 kg C-CO₂ m⁻² on extensively used wet complex to 1.76 kg C-CO₂ m⁻² on intensively used moist complex in the growing season. The utilisation of photosynthetically absorbed carbon in plant yield depended on the intensity of grassland use. The highest degree of carbon utilisation (20.7%) was found on the moist complex used intensively as a thrice-cut meadow and the lowest (12.5%) – on the wet complex used extensively. The method of assessment of grassland ecosystem productivity based on photosynthesis measurement enables comparison of their productivity regardless of the intensity of management.

Adres do korespondencji: dr inż. J. Turbiak, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy ITP w Bydgoszczy, ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz; tel. +48 52 375-01-07, e-mail: j.turbiak@itp.edu.pl