

Wpłynęło 16.02.2018 r.  
Zrecenzowano 2.07.2018 r.  
Zaakceptowano 4.07.2018 r.

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

# WYMIANA DITLENKU WĘGLA NA TORFOWISKU WYSOKIM PO NATURALNEJ REGENERACJI ROŚLINNOŚCI TORFOWISKOWEJ

**Janusz TURBIAK<sup>1)</sup> ABCDEF, Paulina ĆWIKLIŃSKA<sup>2)</sup> ABD**

<sup>1)</sup> Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach

<sup>2)</sup> Uniwersytet Gdański, Wydział Biologii

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań z lat 2011–2013 dotyczące wartości strumieni CO<sub>2</sub> na torfowisku wysokim, na którym doszło do naturalnej regeneracji roślinności torfowiskowej. Wartość strumieni CO<sub>2</sub> określano metodą komorową. W okresie badań średnia wartość wymiany ekosystemu netto wynosiła  $-667 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , ogólnej aktywności respiracyjnej  $-872 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , a fotosyntezy brutto  $-1540 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Wartości strumieni CO<sub>2</sub> z ekosystemu bagiennego po jego samoistnej regeneracji były podobne jak w torfowiskach naturalnych. Z torfowiska emitowane było średnio  $39,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  CO<sub>2</sub>, natomiast w procesie fotosyntezy wiązane było  $39,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  CO<sub>2</sub>. Średnie straty CO<sub>2</sub> wynosiły  $0,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ . Regeneracja zbiorowisk roślinnych była związana z poprawą warunków wodnych oraz obecnością w warstwie powierzchniowej torfowiska nasion i zarodników roślinności bagiennej.

**Słowa kluczowe:** fotosynteza brutto, ogólna respiracja ekosystemu, torfowisko wysokie, wymiana CO<sub>2</sub>

## WSTĘP

Eksploracja torfu z torowisk jest związana najczęściej ze zmianą warunków wodnych, polegającą na obniżaniu poziomu wody gruntowej. Zwiększenie natlenienia w złożu torfu powoduje przyspieszenie procesu mineralizacji masy organicznej [BERGLUND, BERGLUND 2011; CARLSON i in. 2015; URAK i in. 2017]. Ponadto eksploatacja torfowisk przyczynia się do całkowitego zniszczenia akrotelmu,

---

**Do cytowania For citation:** Turbiak J., Ćwiklińska P. 2018. Wymiana ditlenku węgla na torfowisku wysokim po naturalnej regeneracji roślinności torfowiskowej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 18. Z. 3 (63) s. 49–63.

czyli powierzchniowej, aktywnej biologicznie warstwy torfu, w której zachodzi proces akumulacji masy torfowej.

Rekultywacja terenów pokopalnianych, szczególnie po zakończonej eksploatacji torfowisk wysokich, jest bardzo trudna. Brak diaspor roślin oraz niekorzystne warunki wodne i troficzne często uniemożliwiają naturalną restytucję zbiorowisk roślinnych. Na niektórych torfowiskach przez wiele lat od zakończenia wydobywania torfu powierzchnie poeksploatacyjne są całkowicie pozbawione roślin, a udział torfowców w odtworzonych zbiorowiskach roślinnych jest bardzo mały [GIRARD i in. 2002; POULIN i in. 2005]. W celu odtworzenia zbiorowisk roślinnych wykonywane są kosztowne zabiegi rekultywacyjne polegające na regulacji stosunków wodnych i umieszczaniu na powierzchniach poeksploatacyjnych fragmentów roślin naczyniowych w celu restytucji zbiorowisk roślinnych [HERBICHOWA i in. 2009; QUINTY, ROCHEFORT 2003; ROCHEFORT i in. 1997].

W zależności od warunków wodnych torfowiska są źródłem emisji lub sekwestracji węgla. Jednym ze sposobów oceny tych procesów jest pomiar wymiany CO<sub>2</sub> między ekosystemem i atmosferą [ALM i in. 1997; LOHILA i in. 2003; MALJANEN i in. 2004; SAKOWSKA i in. 2012; TURBIAK 2015]. W warunkach dopływu energii słonecznej mierzone jest tempo pobierania CO<sub>2</sub> przez rośliny w procesie fotosyntezy, natomiast w warunkach zaciemnienia – emisja powstającego w procesie oddychania organizmów żywych CO<sub>2</sub> z ekosystemu. Badania wymiany CO<sub>2</sub> na torfowiskach mają coraz większe znaczenie ze względu na zwiększające się stężenie gazów cieplarnianych w atmosferze oraz fakt, że torfowiska są ekosystemami, w których zachodzi proces trwałego wiązania węgla [GORHAM 1991; TOLONEN, TURUNEN 1996].

Celem pracy było określenie wartości wymiany CO<sub>2</sub> na przygotowanym do eksploatacji torfowisku wysokim, na którym doszło do naturalnej regeneracji roślinności torfowiskowej.

## OBIEKT I METODY BADAŃ

Badania prowadzono na torfowisku wysokim Czarne Bagno (N: 54°33'42", E: 17°34' 19"), położonym w dolinie Łeby, w odległości około 10 km na zachód od Łęborka (woj. pomorskie). Pierwotna powierzchnia kopuły tego torfowiska wynosiła 226 ha, a miąższość torfu dochodziła do 8 m, z czego około 1,5 m stanowił mszarny torf wysoki. Na torfowisku do końca lat 50. XX w. prowadzono ekstensywną eksploatację torfu, a w latach 1987–1989 na powierzchni 12 ha wydobywano torf na skalę przemysłową metodą frezerową [HERBICHOWA i in. 2007]. Część tego torfowiska (około 8 ha) została przygotowana do eksploatacji poprzez usunięcie zewnętrznej warstwy torfu wraz z roślinnością torfotwórczą, tzw. wierzchnicą. Ze względu na zakończenie działalności kopalni złoża torfu nie było jednak eksploatowane.

W przeciwieństwie do powierzchni po zakończonej eksploatacji torfu, na powierzchni torfowiska przygotowanej do eksploatacji obserwowano naturalną rewitalizację zbiorowisk roślinnych. W okresie badań na powierzchni torfowiska, na której wykonywano pomiary wymiany CO<sub>2</sub>, dominowało zbiorowisko wrzosowiskowo-mszarne z dużym udziałem torfowca Russowa (*Sphagnum russowii* Warnst) i płonnika cienkiego (*Polytrichum strictum* Brid.) – łącznie około 50% pokrycia powierzchni oraz żurawiny błotnej (*Oxycoccus palustris* L.), wrzosu zwyczajnego (*Calluna vulgaris* (L.) Hull), wrzośca bagiennego (*Erica tetralix* L.) i wełnianki pochwowej (*Eriophorum vaginatum* L.). Na przyspieszenie procesu rewitalizacji tej powierzchni wpłynęły działania podjęte w ramach koordynowanego przez Klub Przyrodników projektu LIFE – Nature „Ochrona wysokich torfowisk bałtyckich na Pomorzu”. W trakcie realizacji tego projektu w latach 2003–2008 na torfowisku zainstalowano na rowach odwadniających 105 zastawek piętrzących, które ograniczały odpływ wody z torfowiska [HERBICHOWA i in. 2007].

Pomiary wymiany CO<sub>2</sub> na powierzchni torfowiska po naturalnej regeneracji roślin prowadzono metodą komorową w latach 2011–2013, od połowy kwietnia do końca października w odstępach dekadowych, w dwóch powtórzeniach. Zmiany stężenia CO<sub>2</sub> w komorze były oznaczane za pomocą miernika fotoakustycznego (raz w miesiącu) na zasadzie poboru próbki gazu z komory do miernika w obiegu zamkniętym oraz miernika dyfuzyjnego (2 razy w miesiącu), który był umieszczany wewnątrz komory. Do pomiarów wykorzystywano komorę pleksiglasową o wymiarach 45 × 45 × 35 cm. Komora była wykonana z przezroczystego szkła akrylowego i wyposażona w wentylator w celu utrzymania wewnątrz niej jednorodnego przestrzennie stężenia gazów oraz zawór umożliwiający wyrównanie ciśnienia między wnętrzem komory a atmosferą. Komora była umieszczana w wykonanych z ceownika kwadratowych ramkach, które zostały na stałe zainstalowane na powierzchniach badawczych. Uszczelnienie pomiędzy komorą a ramką uzyskiwano poprzez napełnienie ramki wodą. Ramki na całym obwodzie miały w dolnej części kryzę wysokości 5 cm, którą wbijano w glebę. Pomiary strumieni CO<sub>2</sub> prowadzono w godzinach od 12:00 do 13:00 w warunkach dopływu energii słonecznej, określając chwilowe wartości wymiany ekosystemu netto (*NEE*) oraz w warunkach całkowitego zaciemnienia, po przykryciu komory nieprzepuszczalnym dla światła pokrowcem, w celu określenia ogólnej aktywności respiracyjnej (*TER*). Czas pojedynczego pomiaru *NEE* i *TER* wynosił około 8 minut. Do określenia wartości strumieni CO<sub>2</sub> wykorzystywano pomiar z pierwszych minut, w których zmiany stężenia tego gazu były prostoliniowe. Łącznie w okresie badań wykonano 52 pomiary *NEE* i *TER*.

Zmiany stężenia CO<sub>2</sub> w powietrzu komory w ppm były przeliczane na  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , według wzoru [MOSIER, MACK 1980]:

$$E = \rho \frac{V}{A} \frac{\Delta C}{\Delta t} \frac{273}{T+273} \quad (1)$$

gdzie:

- $E$  = wartość strumienia,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $\rho$  = gęstość gazu,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  
 $V$  = objętość komory,  $\text{m}^3$ ;  
 $A$  = powierzchnia komory,  $\text{m}^2$ ;  
 $\Delta C/\Delta t$  = średnie tempo zmian stężenia gazu w czasie,  $\text{ppmv} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $T$  = temperatura wewnątrz komory,  $^{\circ}\text{C}$ .

Chwilowe wartości fotosyntezy brutto ( $P_{\text{Gm}}$ ) obliczano jako różnicę między kolejnymi parami pomiarów wg wzoru:

$$P_{\text{Gm}} = TER - NEE \quad (2)$$

Wartości fotosyntezy brutto dla całego okresu wegetacyjnego ( $P_{\text{Gw}}$ ) obliczono na podstawie równania MICHAELISA i MENTEN [1913], opisującego zależność między fotosyntezą brutto a promieniowaniem całkowitym według równania:

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

gdzie:

- $\alpha$  = współczynnik wykorzystania radiacji;  
 $R$  = promieniowanie całkowite,  $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $P_{\text{Gmax}}$  = fotosynteza brutto ekosystemu dla „optymalnego” PPFD,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Do obliczenia ogólnej aktywności respiracyjnej w ciągu roku wykorzystano równanie regresji opisujące zależność między aktywnością respiracyjną gleby a temperaturą powietrza według LLOYDA i TAYLORA [1994]:

$$TER = R_{\text{ref}} \exp E_0 \left\{ \left[ 1/(T_{\text{ref}} - T_0) \right] - \left[ 1/(T - T_0) \right] \right\} \quad (4)$$

gdzie:

- $TER$  = ogólna aktywność respiracyjna,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $R_{\text{ref}}$  = oddychanie w temperaturze referencyjnej,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  
 $E_0$  = współczynnik energii aktywacji;  
 $T_{\text{ref}}$  = 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.

Parametry  $R_{\text{ref}}$  i  $E_0$  funkcji uzyskane w obliczeniach  $TER$  oraz współczynniki  $\alpha$  i  $P_{\text{Gmax}}$  w obliczeniach  $P_{\text{Gw}}$  zostały indywidualnie dopasowane do zbiorów danych w kolejnych latach z wykorzystaniem programu Statistica 7.1.

Na podstawie uzyskanych równań regresji modelowano wartości wydajności fotosyntezy brutto w całym roku z wykorzystaniem pomiarów natężenia radiacji

słonecznej, natomiast aktywność respiracyjną – z wykorzystaniem pomiarów temperatury powietrza, mierzonych w kolejnych latach w odstępach godzinowych. Z obliczeń wartości  $TER$  i  $P_G$  wyłączono okresy, w których występowała ujemna temperatura powietrza. Produkcję netto ekosystemu ( $NEP$ ), wyrażoną w  $Mg \cdot ha^{-1}$ , obliczono jako różnicę między fotosyntezą brutto traktowaną jako przychód węgla a respiracją traktowaną jako strata węgla w ekosystemie.

$$NEP = P_G - TER \quad (5)$$

Wartość dodatnia  $NEP$  wskazuje, że w ekosystemie zachodzi proces akumulacji węgla, natomiast wartość ujemna, że w ekosystemie dochodzi do strat netto węgla.

Pomiary promieniowania całkowitego i temperatury powietrza (tab. 1, 2) były prowadzone za pomocą automatycznej stacji meteorologicznej zlokalizowanej w odległości około 400 m od punktu pomiarowego. Dane dotyczące poziomu wód gruntowych na fragmencie torfowiska po eksploatacji torfu uzyskano z funkcjonującej na torfowisku sieci monitoringu hydrologicznego. Wykorzystano średnie dobowe poziomy wody (dla dni pomiarowych) z piezometru położonego w odległości 100 m od stanowiska pomiaru emisji  $CO_2$  (tab. 3). Rzędne terenu odczytano z Numerycznego Modelu Terenu.

**Tabela 1.** Średnie miesięczne i roczne wartości radiacji słonecznej,  $W \cdot m^{-2}$

**Table 1.** Mean monthly and annual values of solar radiation,  $W \cdot m^{-2}$

Rok Year	Wartość w miesiącu Value in month												Średnia Mean
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2011	15	48	115	184	238	259	147	193	152	84	37	17	124
2012	23	50	119	180	239	212	203	166	109	70	23	16	118
2013	19	38	78	155	224	237	223	184	121	66	21	16	115
Średnia Mean	19	45	104	173	234	236	191	181	127	73	27	16	119

Źródło: Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego.

Source: Foundation for the Development of the University of Gdańsk.

**Tabela 2.** Średnie miesięczne i roczne wartości temperatury powietrza,  $^{\circ}C$

**Table 2.** Mean monthly and annual values of air temperature,  $^{\circ}C$

Rok Year	Wartość w miesiącu Value in month												Średnia Mean
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2011	-0,2	-3,9	3,1	10,1	13,0	17,8	18,2	17,6	14,0	8,8	5,1	3,2	8,9
2012	0,1	-4,1	3,8	7,2	12,4	14,4	17,6	16,9	13,6	7,8	5,3	-1,4	7,8
2013	-1,5	-0,2	-1,7	6,2	13,6	15,7	17,5	16,7	11,5	9,7	5,4	2,8	8,0
Średnia Mean	-0,5	-2,7	1,7	7,8	13,0	16,0	17,8	17,1	13,0	8,8	5,3	1,5	8,2

Źródło: Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego.

Source: Foundation for the Development of the University of Gdańsk.

**Tabela 3.** Średni poziom wody gruntowej, cm**Table 3.** Average ground water level, cm

Rok Year	Miesiąc Month												Średnia Mean
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2011	-19	-23	-24	-24	-37	-48	-44	-39	-31	-28	-27	-18	-30
2012	-7	-5	-2	-6	-15	-25	-11	-6	-4	0	0	0	-7
2013	0	0	0	0	-5	-17	-27	-29	-26	-23	-17	-12	-13
Średnia Mean	-5	-6	-7	-10	-19	-30	-27	-25	-20	-16	-12	-7	-15

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Określono także wybrane parametry właściwości fizyczno-wodnych torfu. Popielność próbek glebowych oznaczano metodą żarzenia w temperaturze 550°C, pH gleby w 1 N KCl. Gęstość objętościową i charakterystyki wodne gleby określono zgodnie z metodą ZAWADZKIEGO [1973], pobierając glebę do cylinderków o objętości 100 cm<sup>3</sup>, w czterech powtórzeniach z kolejnych warstw miąższości 10 cm. Wartości tych parametrów przedstawiono w tabeli 4.

**Tabela 4.** Właściwości fizyczno-wodne torfu**Table 4.** Peat physical and water properties

Warstwa Layer cm	Popielność Ash content % s.m. % DM $\bar{x} \pm SD$	Gęstość objętościowa Bulk density Mg·m <sup>-3</sup> $\bar{x} \pm SD$	pH 1 N KCl	Pojemność wodna, gdy pF: Water capacity at pF: cm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup> ·100			
				0,0	2,0	2,7	4,2
				0–10	2,15 ± 0,15	0,174 ± 0,014	2,48
10–20	3,13 ± 0,14	0,176 ± 0,005	2,46	93,2	81,0	56,0	26,0
20–30	5,96 ± 0,34	0,150 ± 0,012	2,60	94,9	77,7	54,0	15,2
30–40	5,01 ± 0,26	0,087 ± 0,005	2,89	97,6	77,0	39,8	8,9
40–50	2,65 ± 0,16	0,099 ± 0,002	2,69	97,4	74,7	39,7	9,8

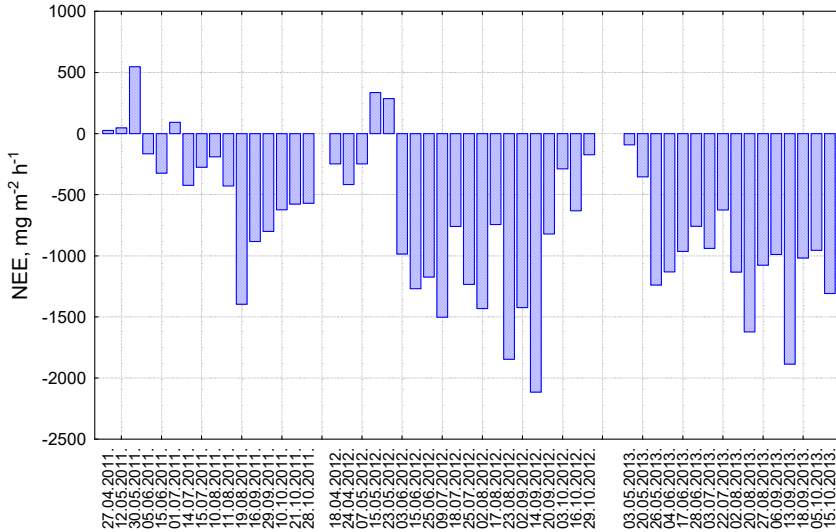
Objaśnienia:  $\bar{x}$  = wartość średnia,  $SD$  = odchylenie standardowe.

Explanations:  $\bar{x}$  = mean value,  $SD$  = standard deviation.

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

## WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Pomiary wymiany ekosystemu netto (*NEE*) prowadzone w warunkach dopływu energii słonecznej wykazały w większości terminów intensywne pobieranie CO<sub>2</sub> przez rośliny (rys. 1). W okresie badań średnia wartość *NEE* wynosiła -667 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>. Maksymalną wartość *NEE* stwierdzono 30.05.2011 r., kiedy wy-



Rys. 1. Wymiana ekosystemu netto (*NEE*) w poszczególnych terminach pomiarów; źródło: wyniki własne

Fig. 1. Net ecosystem exchange (*NEE*) at particular measurement dates; source: own study

niosła ona  $546 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . Emisja  $\text{CO}_2$  z ekosystemu do atmosfery w tym terminie (dodatnia wartość *NEE*) była związana z ograniczeniem aktywności fotosyntetycznej roślin w wyniku ich częściowego zaschnięcia. Wartość minimalną stwierdzono natomiast 14.09.2012 r. ( $-2115 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ). Tak duża intensywność pobierania  $\text{CO}_2$  we wrześniu mogła być związana z obniżeniem temperatury gleby w nocy, co powodowało ograniczenie z niej emisji  $\text{CO}_2$ , oraz występowaniem na powierzchni gleby dużej biomasy roślin. Efektem zmniejszenia emisji  $\text{CO}_2$  z gleby i dużej aktywności fotosyntetycznej roślin było bardzo intensywne pobieranie tego gazu z atmosfery.

Podobne wartości *NEE* stwierdzono w okresie od czerwca do września na torfowisku Rzecin k. Poznania [CHOJNICKI i in. 2010]. Na czterech stanowiskach wartości *NEE* wynosiły od  $-11,82$  do  $7,82 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , tj. od  $-1872$  do  $1239 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

Ogólna aktywność respiracyjna ekosystemu (*TER*), określana na podstawie wartości emisji  $\text{CO}_2$ , odzwierciedla sumarycznie natężenie procesów oddechowych roślin i organizmów glebowych. W okresie badań średnia wartość *TER* wynosiła  $872 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . W latach 2011, 2012 i 2013 wartości *TER* wynosiły odpowiednio 843, 975 i  $798 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (tab. 5). Różnice te były nieznaczne, mimo dużych różnic poziomu wody gruntowej w poszczególnych latach.

Analizując wpływ poziomu wody gruntowej na aktywność respiracyjną, można stwierdzić, że była ona największa w 2012 r., kiedy średni poziom wody gruntowej utrzymywał się najwyżej w okresie badań, tj. na głębokości 7 cm poniżej po-

wierzchni terenu (p.p.t.) – tabela 3. W 2011 r., w którym średni poziom wody gruntowej utrzymywał się na głębokości około 30 cm p.p.t., aktywność respiracyjna była o 13,5% mniejsza niż w 2012 r. Mniejsza aktywność respiracyjna ekosystemu w 2011 r. była związana z częściowym zaschnięciem roślin i zmniejszeniem udziału respiracji autotroficznej.

**Tabela 5.** Ogólna aktywność respiracyjna ekosystemu (*TER*) w kolejnych miesiącach i latach

**Table 5.** Total ecosystem respiration activity (*TER*) in successive months and years

Miesiąc Month	Emisja CO <sub>2</sub> w roku (mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ): CO <sub>2</sub> emission in the year (mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> ):			Średnia Mean
	2011	2012	2013	
	wartość średnia ± odchylenie standardowe mean value ± standard deviation			
IV	765 ± 230	454 ± 21	188 ± 123	469 ± 289
V	1 213 ± 297	1 128 ± 709	644 ± 80	995 ± 307
VI	1 285 ± 46	1 258 ± 125	1 116 ± 490	1 220 ± 91
VII	802 ± 154	1 382 ± 219	1 205 ± 857	1 129 ± 297
VIII	974 ± 319	1 227 ± 21	1 116 ± 869	1 106 ± 127
IX	580 ± 425	981 ± 440	635 ± 275	732 ± 217
X	286 ± 170	393 ± 349	687 ± 254	455 ± 208
Średnia Mean	843 ± 385	975 ± 476	798 ± 538	872 ± 92

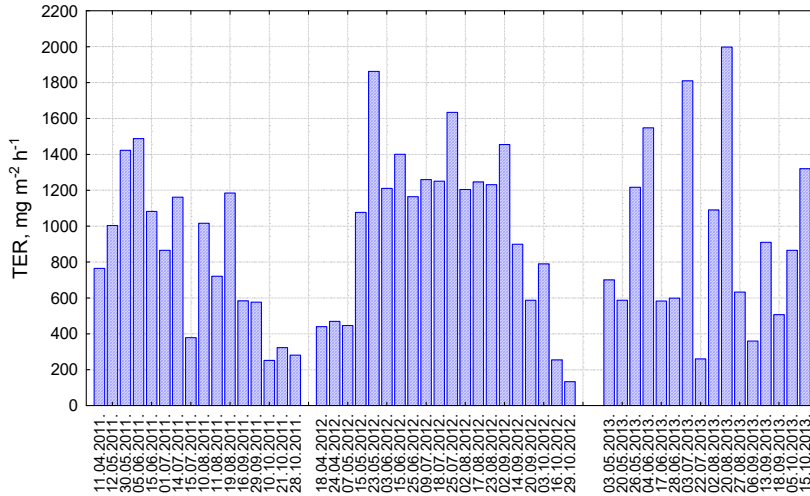
Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Aktywność respiracyjna ekosystemu w poszczególnych miesiącach była zależna od średniej temperatury powietrza. W okresie badań największą aktywność respiracyjną stwierdzono w miesiącach letnich, tj. czerwcu, lipcu i sierpniu – odpowiednio 1220, 1129 i 1106 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>, a najmniejszą w październiku i kwietniu – odpowiednio 623 i 642 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.

Wartości *TER* w poszczególnych terminach wynosiły od 133 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> pod koniec października 2012 r. do 1862 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> w dniu 28.08.2013 r. Wyraźnie mniejsza wartość *TER* stwierdzona 15.07.2011 r. była związana z prowadzeniem pomiarów po intensywnym, krótkotrwałym opadzie. Zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> mogło być związane z ograniczeniem przepływu gazów w porach glebowych w związku z ich wypełnieniem wodą. W 2012 r. aktywność respiracyjna w miesiącach letnich była wyrównana i wynosiła około 1200–1500 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>. W 2013 r. stwierdzono natomiast duże wahania wartości *TER*, co mogło być związane ze zmianami głębokości zalegania poziomu wody gruntowej (rys. 2).

Podobne wartości *TER* stwierdzono w okresie letnim na torfowisku Rzecin k. Poznania [CHOJNICKI i in. 2010]. Na czterech stanowiskach chwilowe wartości *TER* wynosiły od 2,65 do 14,86 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, tj. od 419 do 2354 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>.





Rys. 2. Ogólna aktywność respiracyjna ( $TER$ ) w poszczególnych terminach pomiarów; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Total ecosystem respiration activity ( $TER$ ) at particular measurement dates; source: own study

Fotosynteza brutto ( $P_G$ ) wynosiła średnio w okresie badań  $1540 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . W latach 2011, 2012 i 2013 średnie wartości  $P_G$  wynosiły odpowiednio 1162, 1785 i  $1672 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  (tab. 6). Znacznie mniejsza wydajność fotosyntezy brutto w 2010 r. była związana, jak już wspomniano, z długotrwałym okresem posusznym, który spowodował częściowe zaschnięcie roślin (głównie torfowców), a tym samym ograniczenie procesu fotosyntezy.

**Tabela 6.** Fotosynteza brutto ( $P_G$ ) w kolejnych latach i miesiącach

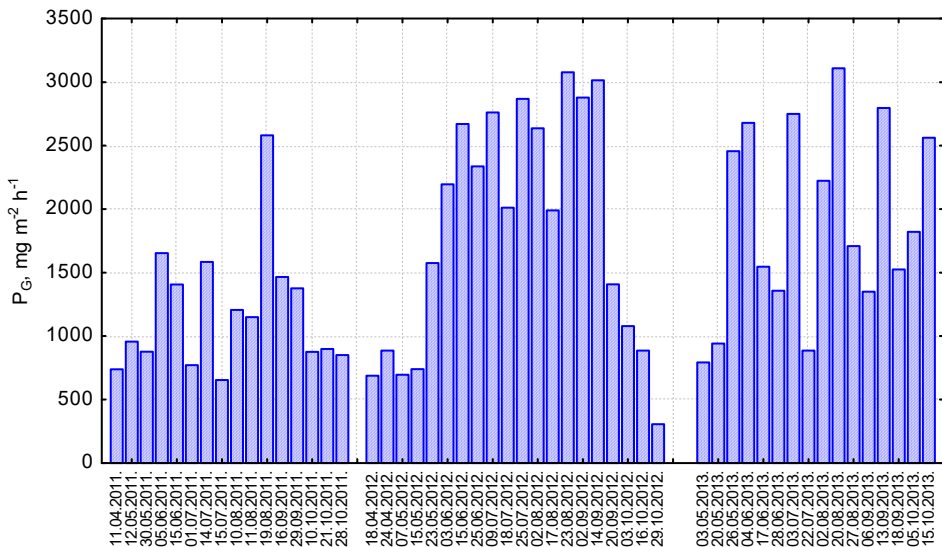
**Table 6.** Gross photosynthesis ( $P_G$ ) in successive years and months

Miesiąc Month	Fotosynteza brutto w roku ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ): Gross photosynthesis in the year ( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ):			Średnia Mean
	2011	2012	2013	
	wartość średnia $\pm$ odchylenie standardowe    mean value $\pm$ standard deviation			
IV	$739 \pm 36$	$787 \pm 140$	$689 \pm 352$	$738 \pm 49$
V	$917 \pm 56$	$1004 \pm 496$	$867 \pm 105$	$929 \pm 69$
VI	$1530 \pm 549$	$2401 \pm 244$	$2227 \pm 600$	$2053 \pm 461$
VII	$1004 \pm 427$	$2546 \pm 467$	$2053 \pm 985$	$1868 \pm 788$
VIII	$1645 \pm 303$	$2568 \pm 547$	$2243 \pm 1368$	$2152 \pm 468$
IX	$1421 \pm 788$	$2434 \pm 891$	$1952 \pm 753$	$1935 \pm 507$
X	$876 \pm 282$	$757 \pm 402$	$1673 \pm 210$	$1102 \pm 498$
Średnia Mean	$1162 \pm 497$	$1785 \pm 932$	$1672 \pm 855$	$1540 \pm 332$

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

W poszczególnych miesiącach największe wartości  $P_G$  stwierdzono w sierpniu –  $2152 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  i czerwcu –  $2053 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Większa wydajność fotosyntezy brutto w sierpniu niż w czerwcu, a więc w miesiącu o mniejszym dopływie energii słonecznej (tab. 1), była związana przypuszczalnie z obecnością w ekosystemie dużej, aktywnej fotosyntetycznie, biomasy roślin. Najmniejsze wartości fotosyntezy brutto stwierdzono w kwietniu –  $738 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , co było związane głównie z niską temperaturą powietrza. Wartość  $P_G$  była w tym miesiącu prawie 3-krotnie mniejsza niż w sierpniu (tab. 6).

W poszczególnych terminach wartości fotosyntezy brutto wynosiły od  $306 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  w dniu 29.10.2012 r. do  $3109 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  w dniu 27.08.2013 r. W 2011 r. tylko w jednym terminie, tj. 19.08., wartość  $P_G$  przekroczyła  $2500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . W pozostałych terminach wartości  $P_G$  nie przekraczały  $1650 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . W 2012 r. od początku czerwca wartości  $P_G$  przekraczały w większości terminów  $2000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . Tak duże wartości  $P_G$  były związane z korzystnymi warunkami siedliskowymi i meteorologicznymi. W okresie lata i jesieni 2013 r. stwierdzono bardzo duże zróżnicowanie wartości  $P_G$  – od  $885 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  w dniu 02.08. do  $3109 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  w dniu 27.08. (rys. 3). Małe wartości fotosyntezy brutto na początku sierpnia były związane z niedoborem opadów.



Rys. 3. Fotosynteza brutto ( $P_G$ ) w poszczególnych terminach pomiarów; źródło: wyniki własne

Fig. 3. Gross photosynthesis ( $P_G$ ) at particular measurement dates; source: own study

Wartości strumieni  $\text{CO}_2$  ( $NEE$ ,  $TER$  i  $P_G$ ) na torfowisku Czarne Bagno były podobne jak w torfowisku naturalnym. Można więc stwierdzić, że nastąpiła naturalna rewitalizacja tego torfowiska. Regeneracja roślin na powierzchni przygoto-

wanej do eksploatacji była związana nie tylko z poprawą warunków wodnych, ale także z częściowym zachowaniem akrotelmu i obecnością w warstwie powierzchniowej nasion i zarodników roślinności bagiennej. W korzystnych warunkach wilgotnościowych ich obecność przyczyniła się odtworzenia zbiorowisk roślinnych.

Powierzchnia torfowiska po zakończonej eksploatacji torfu, mimo upływu ponad 20 lat, była prawie całkowicie pozbawiona roślin. Wartość emisji  $\text{CO}_2$  z tej powierzchni wynosiła  $19,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ , co związane było z mineralizacją około  $9,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  masy organicznej o zawartości 56% C [TURBIAK i in. 2017].

Do obliczenia wymiany  $\text{CO}_2$  w ekosystemie w ciągu roku wykorzystano równania regresji opisujące zależności między wartością fotosyntezy brutto ( $P_G$ ) a promieniowaniem całkowitym oraz między ogólną respiracją ekosystemu ( $TER$ ) a temperaturą powietrza (rys. 4). Wykorzystanie tych zależności umożliwiło oszacowanie przybliżonych wartości wymiany  $\text{CO}_2$  w badanym ekosystemie, a także dokonanie oceny zmian natężenia procesów respiracji i fotosyntezy w czasie.

Z naturalnie zregenerowanego torfowiska Czarne Bagno było emitowane średnio  $39,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$   $\text{CO}_2$ , natomiast średnia wartość fotosyntezy brutto wynosiła  $39,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ . W okresie badań z ekosystemu było emitowane średnio  $0,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$   $\text{CO}_2$ . W 2011 r. i w 2012 r. w ekosystemie wystąpiły straty  $\text{CO}_2$  na poziomie  $-1,7$  i  $-0,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$ , a w 2013 r. stwierdzono akumulację  $\text{CO}_2$ , wynoszącą  $0,2 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  (tab. 7).

**Tabela 7.** Produkcja ekosystemu netto ( $NEP$ ) na torfowisku wysokim,  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$

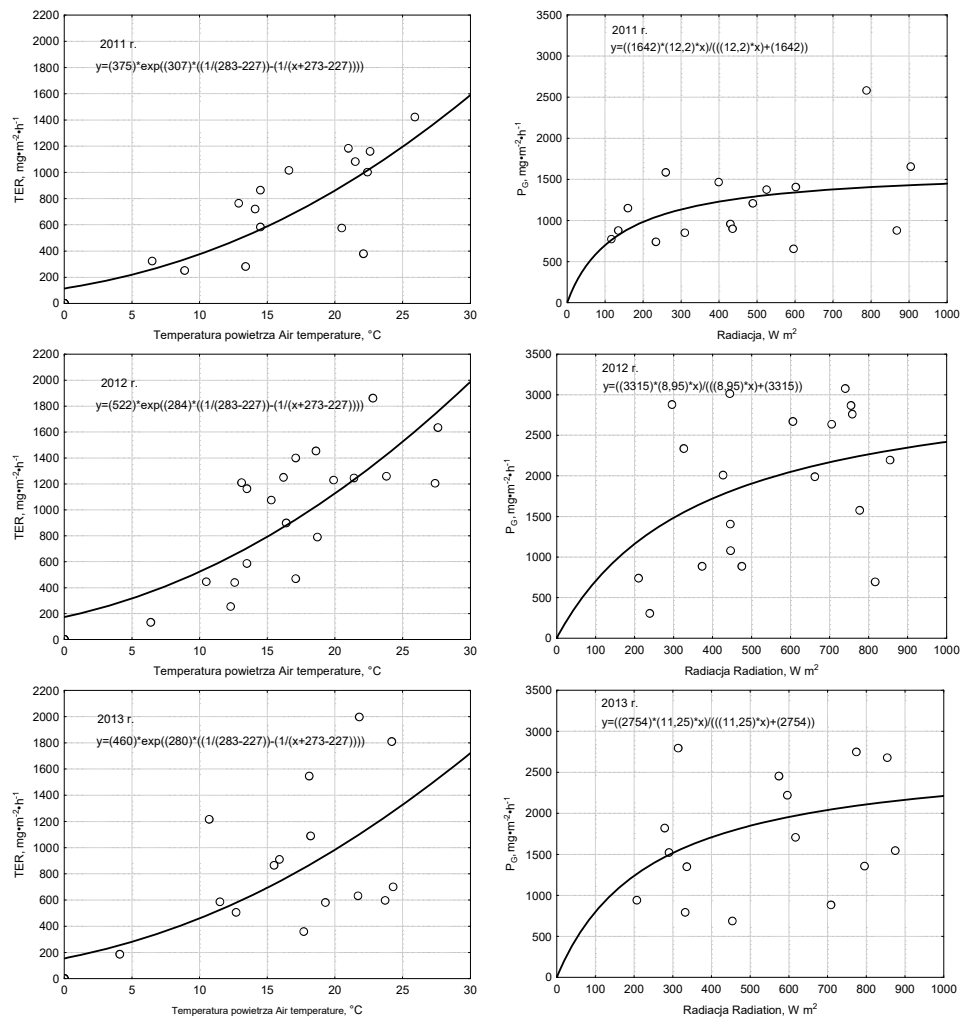
**Table 7.** Net ecosystem production ( $NEP$ ) in a raised bog,  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$

Rok	Year	$P_G$	$TER$	$NEP$
	2011	34,3	36,0	-1,7
	2012	41,0	41,6	-0,6
	2013	42,0	41,8	0,2
Średnia	Mean	39,3	39,8	-0,7

Źródło: wyniki własne. Source: own study.

Wartości  $P_G$  i  $TER$  na naturalnie zregenerowanym torfowisku wysokim były większe niż na naturalnym torfowisku w północnych Niemczech, położonym 20 km od Morza Północnego [BEETZ i in. 2013]. Na tym obiekcie w latach 2007–2009 wartość  $TER$  wynosiła średnio  $607 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$  C- $\text{CO}_2$ , tj.  $22,3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$   $\text{CO}_2$ , natomiast wartość  $P_G$   $656 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$  C- $\text{CO}_2$ , tj.  $24,1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$   $\text{CO}_2$ . Większe wartości  $TER$  i  $P_G$  na torfowisku Czarne Bagno mogły być spowodowane zwiększeniem dostępności składników pokarmowych w wyniku mineralizacji masy organicznej w warunkach długotrwałego odwodnienia.

W Estonii emisja netto  $\text{CO}_2$  na torfowisku naturalnym, zdrenowanym i po zakończonym wydobyciu torfu wynosiły odpowiednio 1509, 1921 i 2845  $\text{kg CO}_2\text{-C ha}^{-1}\text{ rok}^{-1}$ , tj. 5,54; 7,05 i  $10,4 \text{ Mg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$  [SALM i in. 2012].



Rys. 4. Ogólna aktywność respiracyjna ( $TER$ ) i fotosynteza brutto ( $P_G$ ) w kolejnych latach;  
 źródło: wyniki własne

Fig. 4. Total ecosystem respiration activity ( $TER$ ) and gross photosynthesis ( $P_G$ ) in successive years;  
 source: own study

## WNIOSKI

1. Średnia w okresie badań wartość wymiany ekosystemu netto ( $NEE$ ) wynosiła  $-667 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , ogólnej aktywności respiracyjnej ( $TER$ ) –  $872 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , a fotosyntezy brutto –  $1540 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . Wartości strumieni  $\text{CO}_2$  z ekosystemu bagiennego po jego samoistnej regeneracji były podobne jak w torfowiskach naturalnych.

2. Z naturalnie zregenerowanego torfowiska Czarne Bagno średnio w okresie badań było emitowane  $39,8 \text{ Mg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ , natomiast wartość fotosyntezy brutto wynosiła  $39,3 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Średnia wartość produkcji netto ekosystemu wynosiła  $-0,7 \text{ Mg CO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

3. Wartość produkcji netto ekosystemu w danym roku była zależna od przebiegu warunków meteorologicznych. Największe straty  $\text{CO}_2$  stwierdzono w suchym 2011 r., w którym doszło do zaschnięcia roślin i ograniczenia procesu fotosyntezy. W 2012 r., w którym utrzymywał się wysoki poziom wody gruntowej, straty wynosiły  $0,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ , a w 2013 r. stwierdzono akumulację  $\text{CO}_2$ , wynoszącą  $0,2 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

4. Regeneracja roślin na powierzchni przygotowanej do eksploatacji była związana nie tylko ze zmianą warunków wodnych, ale także z zachowaniem w warstwie powierzchniowej nasion i zarodników roślinności bagiennej. W korzystnych warunkach wilgotnościowych ich obecność przyczyniła się odtworzenia zbiorowisk roślinnych.

5. Torf z warstwy powierzchniowej torfowiska przeznaczonego do eksploatacji powinien być składowany, a po zakończeniu eksploatacji złoża wykorzystany do wykonania zabiegów rewitalizacyjnych.

### Podziękowanie

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy N305 3853339.

Dane meteorologiczne i hydrologiczne uzyskano w ramach projektu „Renaturalizacja siedlisk i roślinności na zdegradowanych torfowiskach wysokich woj. pomorskiego” dofinansowanym przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Warszawie, Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku oraz Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko na lata 2007–2013. Udostępniła je Fundacja Rozwoju Uniwersytetu Gdańskiego.

## BIBLIOGRAFIA

- 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.
- BEEZ S., LIEBERSBACH H., GLATZEL S., JURASINSKI G., BUCZKO U., HÖPER H. 2013. Effects of land use intensity on the full greenhouse gas balance in an Atlantic peat bog. *Biogeosciences*. Vol. 10. s. 1067–1082.
- BERGLUND Ö., BERGLUND K. 2011. Influence of water table level and soil properties on emissions of greenhouse gases from cultivated peat soil. *Soil Biology & Biochemistry*. Vol. 43 s. 923–931.
- CARLSON K.M., GOODMAN L.K., TOBI C.C.M. 2015. Modelling relationships between water table depth and peat soil carbon loss in Southeast Asian plantations. *Environmental Research Letters*. Vol. 10. No. 7 074006 ss. 12.

- CHOJNICKI B.H., MICHALAK M., ACOSTA M., JUSZCZAK R., AUGUSTIN J., DROESLER M., OLEJNIK J. 2010. Measurements of carbon dioxide fluxes by chamber method at the Rzecin wetland ecosystem, Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*. Vol. 9(2) s. 283–291.
- GIRARD M., LAVOIE C., THERIAULT M. 2002. The regeneration of a highly disturbed ecosystem: A mined peatland in Southern Québec. *Ecosystems*. Vol. 5. Iss. 3 s. 274–288.
- GORHAM E. 1991. Northern peatlands: Role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*. Vol. 1 s. 182–195.
- HERBICHOWA M., ĆWIKLIŃSKA P., SADOWSKA A. 2009. Restytucja roślinności torfowiskowej po przemysłowym wydobyciu torfu – założenia, dotychczasowe doświadczenia i wyniki [Restoration of bog flora in former peat excavation areas: Assumptions, previous experience and results]. *Przegląd Przyrodniczy*. T. 20. Z. 3–4 s. 43–53.
- HERBICHOWA M., PAWLACZYK P., STAŃKO R. 2007. Ochrona wysokich torfowisk bałtyckich na Pomorzu. Doświadczenia i rezultaty projektu LIFE04NAT/PL/000208 PLBALTBOGS [Conservation of Baltic raised bogs in Pomerania, Poland. Experience and results of the LIFE04NAT/PL/000208 PLBALTBOGS Project]. Świebodzin. Wydaw. Klubu Przyrodników. ISBN 83-87846-94-5 ss. 149.
- LYOYD J., TAYLOR J.A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*. Vol. 8. No. 3 s. 315–323.
- 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., HYTTONEN 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 & 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.
- QUINTY F., ROCHEFORT L. 2003. Peatland restoration guide. St. Albert. Canadian *Sphagnum* Peat Moss Association. ISBN 0-9733016-0-0 ss. 106.
- POULIN M., ROCHEFORT L., QUINTY E., LAVOIE C. 2005. Spontaneous revegetation of mined peatlands in Eastern Canada. *Canadian Journal Botany*. Vol. 83 p. 539–557.
- ROCHEFORT L., QUINTY F., CAMPEAU S. 1997. Restoration of peatland vegetation: The case of damaged or completely removed acrotelm. *International Peat Journal*. Vol. 7 s. 20–28.
- SAKOWSKA K., JUSZCZAK R., UŹDZICKA B., OLEJNIK J. 2012. Zmienność dobową strumieni CO<sub>2</sub> wymienianych między atmosferą a różnymi uprawami rolniczymi [Diurnal variability of CO<sub>2</sub> fluxes exchanged between the atmosphere and various crops]. *Woda-Środowisko-Obszary-Wiejskie*. T. 12. Z. 2 s. 221–244.
- SALM J.-O., MADDISON M., TAMMIK S., SOOSAAR K., TRUU J., MANDER U. 2012. Emissions of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O from undisturbed, drained and mined peatlands in Estonia. *Hydrobiologia*. Vol. 692(1) s. 41–55.
- TOLONEN K., TURUNEN J. 1996. Accumulation rates of carbon in mires in Finland and implications for climate change. *The Holocene*. Vol. 6 s. 171–178.
- TURBIAK J. 2015. Ocena produktywności ekosystemów łąkowych na podstawie pomiarów fotosyntezy brutto [An assessment of the productivity of meadow ecosystems based on gross photosynthesis measurements]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 15. Z. 4(52) s. 57–68.
- TURBIAK J., ĆWIKLIŃSKA P., DUDA F. 2017. Carbon dioxide emission from raised bog surface after peat extraction. *Journal of Water and Land Development*. No. 35 p. 237–242.

- URÁK I., HARTEL T., GALLÉ R., BALOG A. 2017. Worldwide peatland degradations and the related carbon dioxide emissions: The importance of policy regulations. *Environmental Science and Policy*. Vol. 69 p. 57–64.
- ZAWADZKI S. 1973. Laboratoryjne oznaczanie zdolności retencyjnej utworów glebowych [Laboratory determination of retentional properties of soils]. *Wiadomości IMUZ*. T. 11. Z. 2 s. 11–31.

*Janusz TURBIAK, Paulina ĆWIKLIŃSKA*

## **CARBON DIOXIDE EXCHANGE IN A RAISED BOG AFTER NATURAL REGENERATION OF BOG VEGETATION**

**Key words:** *CO<sub>2</sub> exchange, gross photosynthesis, raised bog, total ecosystem respiration*

### **S u m m a r y**

Results of studies from the years 2011–2013 concerning value of CO<sub>2</sub> fluxes in a raised bog where natural regeneration of bog vegetation occurred are presented in the paper. CO<sub>2</sub> fluxes value was determined by the chamber method. During the study period the mean value of net ecosystem exchange was  $-667 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , of total respiration activity  $-872 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ , and of gross photosynthesis  $-1540 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ . The values of CO<sub>2</sub> fluxes from marshy ecosystem after its spontaneous regeneration were similar to those in natural bogs. On average  $39.8 \text{ Mg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$  was emitted from the bog, whereas  $39.3 \text{ Mg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$  was fixed in the photosynthesis process. Mean CO<sub>2</sub> losses amounted to  $0.5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$ . Regeneration of plant communities was related to an improvement in water conditions and the presence of marsh vegetation's seeds and spores in the uppermost layer of the bog.

**Adres do korespondencji:** dr inż. Janusz Turbiak, Kujawsko-Pomorski Ośrodek Badawczy ITP w Bydgoszczy, ul. Glinki 60, 85-174 Bydgoszcz; e-mail: J.Turbiak@itp.edu.pl