



Sezonowy przebieg wskaźnika wykorzystania wody (WUE) w lesie sosnowym

*Klaudia Ziemblińska, Marek Urbaniak, Alina Danielewska,
Marcin Baran, Radosław Juszcak, Bogdan H. Chojnicki*
Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań

Janusz Olejnik
Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań,
Global Change Research Center, AS CR, v.v.i. Brno, Czechy

1. Wstęp

Obecny stan wiedzy o klimacie i zmianach globalnych jest wynikiem wielu lat prac badawczych, zmierzających do weryfikacji hipotezy globalnego ocieplenia oraz wskazania jego przyczyn. Wydaje się, że wiemy coraz więcej, a kolejne doniesienia naukowe z tego zakresu skłaniają się ku potwierdzeniu dwóch hipotez: pierwszej o istnieniu globalnego ocieplenia i tej o znaczącym wpływie Człowieka na obserwowane zmiany (IPCC). Z punktu widzenia biosfery, ważnym pytaniem, na jakie należy odpowiedzieć, jest to, jaka będzie reakcja różnych ekosystemów na zmiany klimatu? Podejmowane na całym świecie wysiłki badawcze skierowane są więc głównie na zrozumienie wpływu wzrostu stężenia gazów szklarniowych, zanieczyszczenia powietrza oraz zmian warunków meteorologicznych na intensywność wymiany masy i energii pomiędzy powierzchnią Ziemi a atmosferą [13, 14]. Badania te opierają się o długoterminowe pomiary wymiany kluczowych gazów szklarniowych: dwutlenku węgla, pary wodnej, czy metanu, pomiędzy różnymi ekosystemami a atmosferą. Biomy na naszej planecie stanowią ogromne rezerwuary węgla, który w wyniku niekontrolowanych zmian klimatycznych może zostać uwolniony do atmosfery, głównie w postaci CO₂ – wymagają one zatem ciągłego

monitoringu. Wiemy, że podstawą funkcjonowania każdej fitocenozy, stanowiącej autotroficzną część ekosystemu, np. lasu jest proces fotosyntezy, w którym pochłonięty z atmosfery węgiel, w postaci CO_2 , jest zmagazynowany zarówno w nadziemnych elementach roślin (pień, gałęzie, liście/igły), jak również w glebie (korzeń). Emisja węgla, z ekosystemu leśnego do atmosfery, odbywa się dzięki procesowi oddychania zarówno auto- (oddychanie roślin), jak i heterotroficznego (głównie oddychanie organizmów glebowych). Tempo i intensywność obu procesów: pochłaniania i emisji uzależnione są przede wszystkim od warunków meteorologicznych (temperatury powietrza, ilości energii słonecznej docierającej do lasu oraz ilości dostępnej wody opadowej) występujących na danym obszarze [19]. Mnogość opisanych wyżej czynników wymaga zastosowania rozbudowanej i zaawansowanej technicznie aparatury pomiarowej podczas badań procesów wymiany w skali ekosystemu. Sam pomiar strumieni masy i energii wymienianych pomiędzy danym ekosystemem a atmosferą może być wykonany przy pomocy różnych metod. Obecnie najczęściej stosowana, w skali ekosystemu, jest metoda kowariancji wirów (z ang. *Eddy Covariance*, EC) [5]. Umożliwia ona pomiar strumienia dowolnego gazu, który przemieszcza się pomiędzy powierzchnią ekosystemu a atmosferą. W przeszłości zastosowanie tej metody ograniczał brak wystarczająco szybkich i dokładnych analizatorów, które mogły mierzyć stężenia gazów śladowych w wolnej atmosferze. Ta bariera techniczna sprawiła, że szerokie wykorzystanie metody EC w praktyce, do pomiaru strumieni netto dwutlenku węgla, nastąpiło dopiero w latach 90-tych w USA i Kanadzie, a nieco później na terenie Europy [1]. W Polsce działa obecnie kilka stacji badawczych wykorzystujące metodę EC.

Metoda EC pomimo wykonywania punktowego pomiaru, umożliwia obszarowe oszacowanie wielkości i kierunku wymiany materii i energii pomiędzy powierzchnią ekosystemu a atmosferą. Aby móc zastosować system kowariancyjny wymagane jest spełnienie następujących warunków: pomiary muszą odbywać się nad odpowiednio dużą, jednorodną powierzchnią (wymóg homogeniczności); przyrządy pomiarowe muszą być umieszczone na odpowiedniej wysokości; powietrze atmosferyczne musi być wymieszane (wymóg turbulencji). Niespełnienie któregoś z w/w warunków może spowodować błędne oszacowania mierzonych strumieni [2].

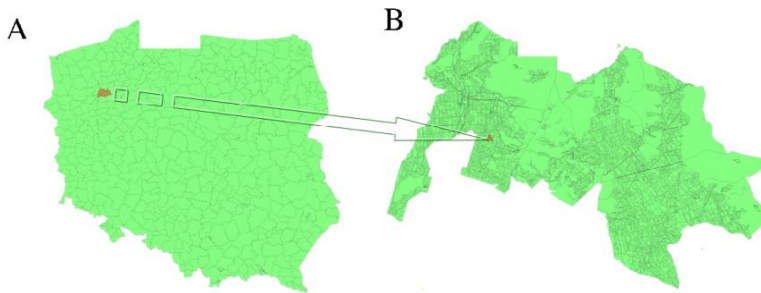
W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań przeprowadzonych w ramach projektu zleconego przez DGLP, którego celem było oszacowanie wymiany netto CO₂ pomiędzy lasem sosnowym a atmosferą. Duże znaczenie ekosystemów leśnych zarówno pod względem ekologicznym, jak i gospodarczym jest niezaprzeczalne. Według szacunków Organizacji Narodów Zjednoczonych do spraw Wyżywienia i Rolnictwa (ang. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, FAO) udział lasów w globalnej powierzchni Ziemi wynosi ok. 30%, co odpowiada obszarowi ok. 3 952 mln ha. W przeliczeniu na jednego mieszkańca naszej planety daje to około 0,62 ha [7]. W Polsce udział lasów w powierzchni kraju wynosi obecnie ok. 29,2% zajmując łączną powierzchnię 9,1mln ha. Obok pól uprawnych w strukturze przestrzennej jest to zatem najczęstsza forma zagospodarowania terenu. W składzie gatunkowym lasów polskich wyraźnie dominuje sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris*) – prawie 70%.

Celem tej pracy jest ukazanie cyklicznych zmian wskaźnika wykorzystania wody (WUE) w lesie sosnowym na przykładzie średniowiekowego (58-letniego) lasu w Tucznie. Badany ekosystem nie jest jednak typowym siedliskiem leśnym, ale efektem zagospodarowania gruntów porolnych. Ewolucyjnie przystosowana do trudnych warunków siedliskowych sosna jest gatunkiem pionierskim, zalesiającym również ubogie pod względem troficznym siedliska. Wskaźnik WUE (jego dobowy i sezonowy przebieg) może stanowić parametr charakteryzujący zdolności adaptacyjne lasu, a przede wszystkim posłużyć do oceny jego produktywności w zmieniającym się środowisku.

2. Opis miejsca pomiarowego

Stacja pomiarowa zlokalizowana jest w północno-zachodniej Polsce (53°11'N, 16°05'E), na terenie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Pile w Nadleśnictwie Tucznno (rys. 1). W składzie gatunkowym badanego lasu dominuje 58-letnia (stan na 2012) sosna zwyczajna (*Pinus Sylvestris*), stanowiąc ok. 99% wszystkich gatunków oraz brzoza brodawkowata (*Betula Pendula*) zajmując około 1%. Taki skład jest charakterystyczny dla lasów nizinnych w Polsce [11, 21, 22].

Przeciętna wartość pierśnicy wynosi tu ok. 25cm, a średnia wysokość drzew na analizowanym obszarze to 26m. Dno lasu porośnięte jest w większości przez buk zwyczajny (*Fagus Sylvatica*) oraz grab pospolity (*Carpinus betulus*) [15]. Gleby na terenie lasu w Tucznie to typowe dla tych środowisk gleby bielcowe (klasyfikacja wg FAO).

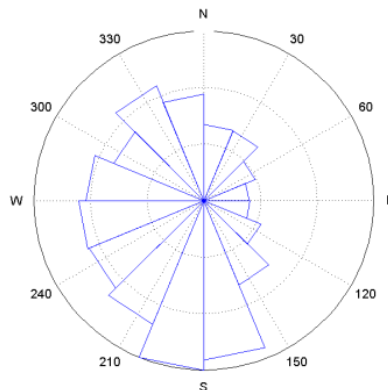


Rys. 1. Lokalizacja wieży pomiarowej na terenie Nadleśnictwa Tuczno (A) na tle podziału administracyjnego Lasów Państwowych Polski (B)

Fig. 1. Location of measuring tower in Tuczno's Forest inspectorate territory (A) against administrative division of Polish National Forests (B)

2.1. Warunki meteorologiczne

Na terenie Tuczna średni roczny opad zmierzony na stacji w okresie 2008–2011 wyniósł 570mm, podczas, gdy średnia opadu skorygowanego z wielolecia na tym terenie wynosi ok. 625mm. Średnia roczna temperatura powietrza z w/w okresu wyniosła $9,7^{\circ}\text{C}$ i jest ona o $1,9^{\circ}\text{C}$ wyższa od średniej wieloletniej ($7,8^{\circ}\text{C}$). Dominujący kierunek wiatru w roku hydrologicznym 2012 na stacji badawczej w Tucznie zawierał się w zakresie od zachodniego do południowego (rys. 2) co jest zgodne z danymi literaturowymi [12]. Średnia długość okresu wegetacyjnego wynosi tu średnio 220 dni.



Rys. 2. Róża wiatrów dla lasu w Tucznie – rok hydrologiczny 2012

Fig. 2. Wind rose of Tuczno forest – hydrological year 2012

3. Materiały i metody

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki pomiarów strumieni netto dwutlenku węgla oraz pary wodnej uzyskane w oparciu o pomiary wykonane na stacji badawczej w Tucznie w roku hydrologicznym 2012 w okresie od 1 listopada 2011 do 31 października 2012.

3.1. System pomiarowy

Do pomiarów strumieni netto dwutlenku węgla (F_C) oraz pary wodnej (F_H) zastosowano system kowariancji wirów (EC), złożony z dwóch przyrządów: spektrometrycznego analizatora gazowego IRGA Li-7500 (Li-Cor, NE, USA) z otwartą ścieżką oraz anemometru ultradźwiękowego CSAT3 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Pierwszy z nich umożliwia pomiar fluktuacji stężenia dwutlenku węgla i pary wodnej w atmosferze, natomiast drugi mierzy fluktuacje wartości pionowej składowej prędkości wiatru oraz temperatury powietrza (T_a). Instrumenty te dokonywały pomiarów z częstotliwością 20 Hz. Za zbieranie, przetwarzanie, oraz transmisję danych do komputera klasy PC, znajdującego się w bezpośrednim sąsiedztwie wieży, odpowiadał rejestrator danych (ang. data logger) CR 5000 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA). Oba przyrządy pomiarowe umieszczone były na szczycie 4-metrowego masztu za instalowanego na ostatniej kondygnacji 34-metrowej ażurowej wieży.

Pomiary wykonane przy pomocy systemu kowariancji wirów zostały uzupełnione o pomiary parametrów meteorologicznych, które stanowiły tło dla procesów wymiany masy i energii mierzonych przez system EC. Takie charakterystyki, jak temperatura i wilgotność względna powietrza, kierunek i prędkość wiatru, ciśnienie atmosferyczne oraz wysokość opadu (tylko mokry opad) mierzone były przez zintegrowany moduł pomiarowy WXT520 (Vaisala, Helsinki, Finlandia).

Wszystkie dane przechowywane były w pamięci komputera poleowego w dwóch formach: pierwsza – dane oryginalne nieprzetworzone (surowe) np. dane z systemu zgromadzone z częstotliwością 20 Hz; druga – wyliczone na bazie danych surowych średnie 30-minutowe (wykorzystano program *Eddy Pro*, Li-Cor, NE, USA). Drugi typ danych poddany został dalszej analizie, a jej wyniki przedstawiono w niniejszej pracy.

3.2. Obliczenia strumieni F_C i F_H

Metoda EC polega na wysokoczęstotliwościowych pomiarach (nad lasem minimum 20Hz) pionowej składowej prędkości wiatru (w) oraz wielkości skalarnej, np. opisującej stężenie danego gazu, którego strumień chcemy zmierzyć (r). Strumień wyliczany jest jako iloczyn gęstości powietrza (ρ_a) oraz średniej z iloczynu odchyleń od średnich wartości w i r [20]:

$$F = \rho_a \overline{w'r'} \quad (1)$$

gdzie:

F – strumień ($\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$);

ρ_a – powietrza (g m^{-3});

w' – odchylenia wartości chwilowej od średniej pionowej składowej prędkości wiatru (m s^{-1});

r' – odchylenia wartości chwilowej od średniej współczynnika zmieszania (miary stężenia) (g g^{-1}).

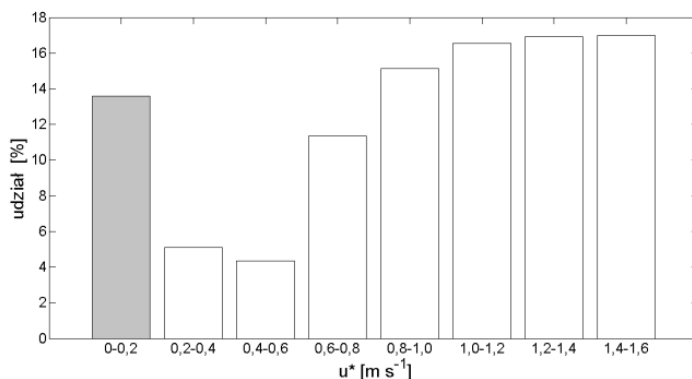
W niniejszej pracy przyjęto następującą konwencję: strumień F_C przyjmuje wartości dodatnie, gdy pochłanianie CO_2 przez ekosystem przeważa nad jego emisją, podczas gdy F_H ma dodatnią wartość, gdy proces parowania przeważa nad kondensacją pary wodnej.

Podczas obliczeń F_C pominięto fakt zalegania CO_2 poniżej systemu kowariancyjnego (magazynowanie). Uznano tę ilość gazu za pomijalną dla oceny wielkości wymiany gazowej zachodzącej w czasie dnia.

Do obliczeń przyjęto stały czas uśredniania równy 30 minut. Średnie półgodzinne poddano następnie procesowi filtracji jakościowej. Jako pierwsze przyjęto kryterium kierunku wiatru. Z uwagi na zastosowany rodzaj anemometru ze zbioru uzyskanych wartości pomiarowych należało usunąć te, które pochodziły z "zakłóconych" przez obudowę instrumentu kierunków. Przyjęto zatem, że dalsze obliczenia prowadzone będą dla wszystkich wartości, z wyłączeniem tych, dla których w przyjętym okresie uśredniania kierunek wiatru zawierał się w zakresie $45\text{--}135^\circ$. Na tym etapie ilość danych, które usunięto, wyniosła ponad 27%.

Aby zapobiec błędom wynikającym z niedostatecznej turbulencji w atmosferze z analizowanego zbioru danych usunięto także te, które zostały zgromadzone w warunkach wartości prędkości tarciovej (u^*) mniejszej niż $0,2 \text{ m s}^{-1}$. Progową wartość prędkości tarciovej dla anali-

zowanego ekosystemu na tym poziomie wyznaczono na podstawie metody opisanej przez Gu [10]. Zastosowanie tego sposobu jakościowej analizy danych doprowadziła do wyeliminowania ponad 13% danych z serii pomiarowej (rys. 3).



Rys. 3. Histogram wartości prędkości tarciovej (u^*) w zbiorze danych zgromadzonych w okresie od 1.11.2011 do 31.10.2012 nad lasem w Tucznie (kolorem szarym zaznaczono udział danych przeznaczonych do eliminacji – poniżej granica „turbulencji”)

Fig. 3. Histogram of friction velocity (u^*) – data collected over Tuczo forest during the period from 1st of November 2011 to 31st of October 2012 (gray color indicates the removed data – under "turbulence" threshold)

Ostatnim etapem jakościowej kontroli danych, jaki przeprowadzono, był test na stacjonarność strumieni [8]. Dane, dla których nie-stacjonarność była większa niż 30% również usunięto ze zbioru poddanego finalnej analizie.

3.3. Wskaźnik wykorzystania wody (WUE)

Wartości F_C i F_H , które pozostały w zbiorze po dokonaniu selekcji, użyto do wyliczenia wartości wskaźnika wykorzystania wody (WUE ang. *ecosystem water-use efficiency*) [4, 16]. W tej pracy przyjęto, że WUE stanowi stosunek ilości pochłoniętego węgla, wyrażonego jako strumień netto dwutlenku węgla, do strumienia pary wodnej [6, 18]:

$$WUE = \frac{F_C}{F_H} \quad (2)$$

gdzie:

F_C – strumień węgla netto w postaci CO_2 ($\text{g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),

F_H – strumień netto pary wodnej ($\text{kg m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

Większość autorów zakłada obliczenie WUE w zgoła odmienny sposób: jako stosunek strumienia brutto CO_2 pochłoniętego przez ekosystem (GEP – *ang* Gross ecosystem productivity) do wielkości transpiracji. Zaproponowana przez autorów niniejszej pracy modyfikacja wynikała z następujących powodów:

1. w takim ujęciu oba strumienie: CO_2 i H_2O są wartościami faktycznie zmierzonymi, a nie wyliczonymi w oparciu o subiektywnie wybrane modele.
2. rozważano produktywność ekosystemu jako całości – jego zdolności do pochłaniania CO_2 z atmosfery w kontekście parującej z niego wody.

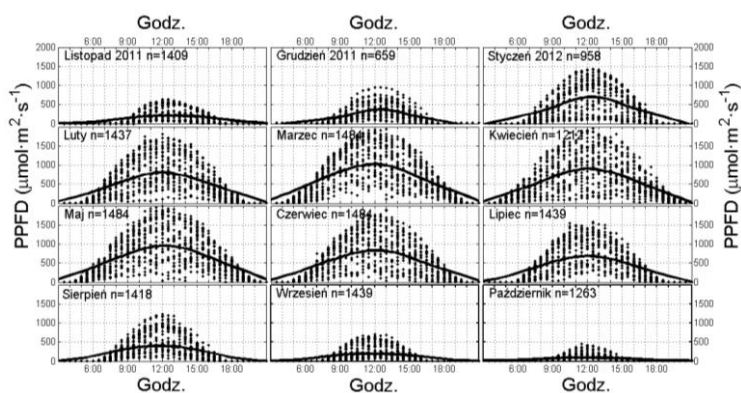
Uzyskane wartości WUE zostały przesortowane i wybrano tylko okresy, w których zarówno wartości F_C jak i F_H były większe od 0 (ilość pochłoniętego CO_2 jest większa od emisji tego gazu, a parowanie H_2O przeważa nad kondensacją). Ze względu na sezonowość parametrów roczny zbiór danych podzielono na miesięczne odcinki czasowe. Ten sposób rozdziału pozwolił uniezależnić wyniki od czynników związanych z roślinnością – stan fazy rozwojowej roślin w skali miesiąca można uznać za stały. Widoczna na przebiegach średnich 30-min. wartości linia trendu została wyznaczona za pomocą techniki wygładzania wg Friedmana, polegającej na doborze odpowiedniego stopnia wygładzenia bazując na krosvalidacji [9].

4. Wyniki i dyskusja

4.1. Gęstość strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (PPFD)

Czynnikiem bezpośrednio warunkującym intensywność pochłaniania CO_2 z atmosfery przez rośliny jest gęstość strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego, docierającego do powierzchni lasu. Uzyskane z pomiarów wartości PPFD są typowe dla szerokości geograficznej, w której znajduje się badany ekosystem. Obserwowane w październiku 2012 wielkości promieniowania były najmniejsze ze wszyst-

kich wartości w badanym roku hydrologicznym (rys. 4). Jednocześnie teoretycznie mniejsze wartości, występujące w listopadzie, grudniu, czy styczniu, były większe od październikowych. Ten stan mógł być wynikiem podwyższonego zachmurzenia w październiku. Największe wartości PPFD zaobserwowano w maju i kwietniu, choć w teorii to czerwiec powinien być miesiącem o najwyższym PPFD. Można zatem przypuszczać, że w tym okresie (IV–V), w porównaniu z VI, było bardziej bezchmurnie. Wydaje się, że zachmurzenie było też przyczyną dużej redukcji wartości PPFD w okresie od sierpnia do października 2012.



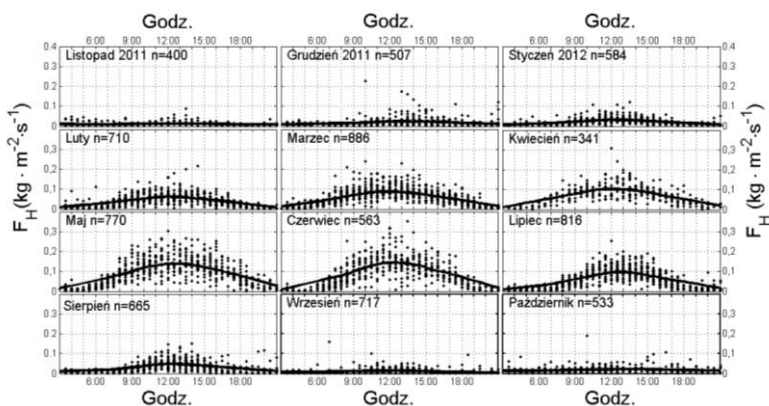
Rys. 4. Dienne przebiegi średnich 30-minutowych wartości gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznie aktywnego (PPFD) zmierzonych nad lasem w Tucznie w roku hydrologicznym 2012. Linia trendu została wyznaczona za pomocą metody Friedmana

Fig. 4. Daily courses of half-hour average values of photosynthetic photon flux density (PPFD) measured over Tucznio during hydrological year of 2012. The trend line was determined with Friedman method

4.2. Parowanie lasu (F_H)

Krzywe, opisujące średnie przebiegi wartości strumieni pary wodnej w ciągu dnia, wykazują wyraźnie paraboliczny charakter w okresie od marca do lipca (rys. 5). Brak tego charakteru jest dobrze widoczny w listopadzie, grudniu, wrześniu i październiku.

Najwyższe wartości strumienia F_H zaobserwowano w maju i czerwcu ($0,25$ i $0,3 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a najniższe w okresie od września do grudnia ($0,02$ – $0,05 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Wartości F_H są skorelowane z wartościami PPFD – strumienia energii, który warunkuje intensywność procesu parowania.



Rys. 5. Dienne przebiegi średnich 30-minutowych wartości parowania (F_H) zmierzonych nad lasem w Tucznie w roku hydrologicznym 2012. Linia trendu została wyznaczona za pomocą metody Friedmana

Fig. 5. Daily courses of half-hour average values of evapotranspiration (F_H) measured over Tuczo during hydrological year of 2012. The trend line was determined with Friedman method

Wyglądzone krzywą dane pomierzonych strumieni pary wodnej wykazują ponadto symetrię względem osiąganego około południa maksimum co sugeruje, że wartość PPFD ma większy wpływ na F_H niż temperatura powietrza, której maksimum następuje po południu.

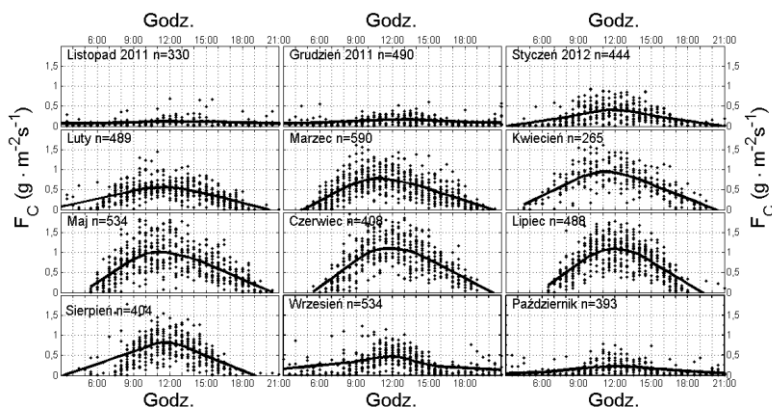
4.3. Produkcja netto dwutlenku węgla lasu (F_C)

Podobnie jak w przypadku strumieni F_H kształt krzywych, opisujących dienne przebiegi strumieni dwutlenku węgla w poszczególnych miesiącach w lesie sosnowym cechuje się dużą zmiennością.

Najmniejsze wartości F_C zmierzono w okresie od października do grudnia i w tym czasie wielkość pochłaniania netto CO_2 nie przekroczyła wartości $0,55 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, natomiast w okresie od kwietnia do lipca produkcja netto ekosystemu była najwyższa ($1,5$ –ok. $2,0 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (rys. 6).

Późną jesienią i zimą krzywa ulega wypłaszczeniu. Wynika to zapewne zarówno z mniejszej ilości dostępnego promieniowania, jak i niższej w tym czasie temperatury otoczenia. Oba czynniki redukują w tym przypadku zarówno aktywność fotosyntetyczną, jak i oddychanie ekosystemu. Podobnie jak w przypadku ewapotranspiracji wartość F_C w ciągu dnia osiąga wartość maksymalną około południa i ten fakt można wyłu-

maczyć podobnie jak w przypadku F_H dominującą rolę promieniowania jako czynnika wpływającego na wartość F_C tym razem poprzez proces fotosyntezy.



Rys. 6. Dienne przebiegi średnich 30-minutowych wartości produkcji netto CO_2 ekosystemu (F_C) zmierzonych nad lasem w Tucznie w roku hydrologicznym 2012. Linia trendu została wyznaczona za pomocą metody Friedmana

Fig. 6. Daily courses of half-hour average values of net CO_2 ecosystem production (F_C) measured over Tuczo during hydrological year of 2012. The trend line was determined with Friedman method

W okresie od marca do lipca 2012r. widoczna jest pewna asymetria średniego dziennego przebiegu F_C względem godziny 12.00 – większe nachylenie krzywej w okresie przedpołudniowym niż popołudniowym. Podobne zjawisko zaobserwowano na terenie podmokłym [18]. Kształt tej krzywej nie potwierdza występowania popołudniowego spadku produktywności ekosystemu obserwowanego np. na terenie świerkowych lasów górskich [17]. Wydaje się, że ta różnica wynika z faktu, że lasy sosnowe dostosowały się do ograniczonego dostępu do wody oraz wysokich temperatur i dlatego nie cierpią z powodu stresu w okresie popołudniowym.

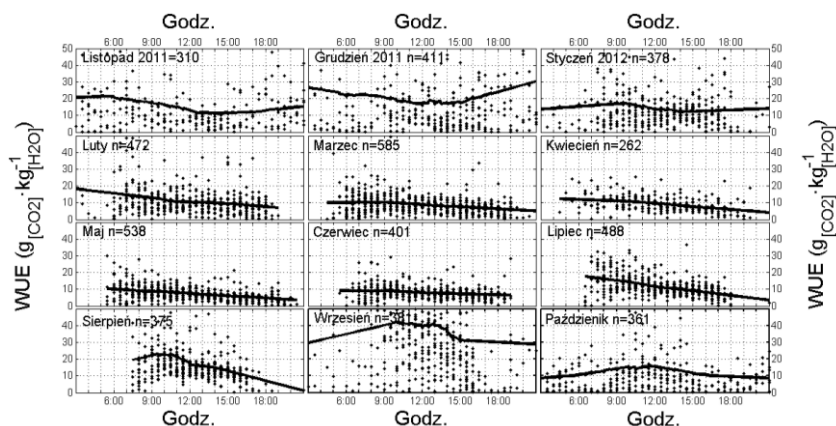
Być może wytłumaczeniem asymetrii krzywych (w miesiącach ciepłych), opisujących średni dobowy przebieg F_C , była większa intensywność procesu fotosyntezy ekosystemu w okresie popołudniowym, przy równoczesnym spadku wydajności procesu oddychania, z uwagi na wyższe temperatury (powietrza, gleby i drzew). Intensywność oddycha-

nia wzrasta proporcjonalnie do temperatury do czasu uzyskania optimum termicznego – po jego przekroczeniu, w przypadku ekosystemu leśnego, warstwa ściółki może ulec przesuszeniu a intensywność respiracji maleje. Obserwowana asymetria pokrywa się z asymetrycznym przebiegiem temperatur, w którym max temp. dobową przypadała na godzinę 14.00–16.00.

4.4. Współczynnik wykorzystania wody WUE

Współczynnik wykorzystania wody to parametr opisujący ilość wody, która jest odparowywana podczas pochłaniania CO_2 przez ekosystem. W miesiącach od lutego do sierpnia w ciągu dnia wyraźnie zaznacza się trend spadkowy wartości WUE. Sytuacja ta najprawdopodobniej wynika z opisanej wcześniej asymetrii krzywych dobowej zmienności strumieni dwutlenku węgla. Większe tempo wzrostu wartości F_C w pierwszej połowie dnia, przy występującej symetrii strumieni F_H , skutkuje uzyskaniem większej wartości WUE. Tę różnicę najlepiej zaobserwować na przykładzie lipca i sierpnia. Interpretacja niższych wartości WUE w okresie popołudniowym może wskazywać na fakt zwiększenia ilości odparowanej wody podczas pochłaniania CO_2 z powietrza, a więc zwiększonej transpiracji (rys. 7). Przypuszczenie to nie potwierdza się jednak z uwagi na symetryczny kształt krzywych dot. strumieni pary wodnej – nie widać zwiększonego ogólnego parowania w tym okresie. Znaczenie może mieć zatem fakt, że, jak już wspomniano, najprawdopodobniej w okresie popołudniowym zwiększa się udział oddychania ekosystemu w wartości netto strumienia F_C , co skutkuje obniżeniem jego wartości, a tym samym spadkiem wartości WUE. Brak wyraźnego trendu WUE w miesiącach chłodnych można wytłumaczyć pojawieniem się temperatury powietrza oscylującej wokół 0°C kiedy możliwe staje się przeprowadzenie fotosyntezy, a tym samym pochłanianie CO_2 i proces ten może być wydajniejszy od procesu parowania z racji niskich wartości niedosytu wilgotności powietrza.

Duża zmienność wartości WUE, a tym samym trudność w ich interpretacji, spowodowana jest również tym, że zarówno wartości F_C , jak i F_H , w tym okresie są niewielkie, a każda, nawet niewielka zmiana warunków atmosferycznych, gwałtownie wpływa na wielkość WUE.



Rys. 7. Dienne przebiegi średnich 30-minutowych wartości współczynnika wykorzystania wody (WUE) obliczonych dla lasu w Tucznio w roku hydrologicznym 2012. Linia trendu została wyznaczona za pomocą metody Friedmana

Fig. 7. Daily courses of half-hour average values of water-use efficiency (WUE) calculated for Tucznio forest during hydrological year of 2012. The trend line was determined with Friedman method.

4.5. Sezonowe przebiegi parametrów środowiska

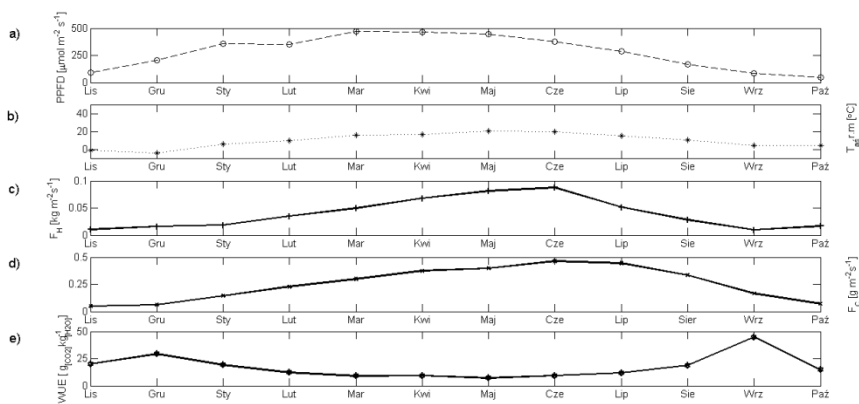
W końcowym etapie porównano sezonowe przebiegi średnich miesięcznych wartości PFD, T_a , F_H , F_C oraz WUE. Zarówno przebiegi temperatury powietrza, jak i gęstości strumieniowania promieniowania fotosyntetycznie aktywnego, mają typowe przebiegi dla tych regionów Europy (rys. 8a i 8b). Maksymalna i minimalna średnia miesięczna wartość PFD została zaobserwowana odpowiednio w marcu ($470 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) i październiku (ok. $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Najniższą wartość T_a zanotowano w grudniu, natomiast najwyższą w maju i wyniosły one odpowiednio: -4°C i 20°C . Zarówno F_C , jak i F_H , osiągnęły swoje maksymalne wartości w czerwcu ($F_C = 0,46 \text{ g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, $F_H = 0,9 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), natomiast F_C osiągnęło swoją minimalną wartość w listopadzie ($0,05 \text{ g m}^{-2} \text{s}^{-1}$), podczas gdy minimalna wartość F_H przypadła we wrześniu (ok. $0,01 \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (rys. 8c i 8d). Minimalne wartości zarówno F_H , jak i F_C , przypadały na okresy, kiedy pojawił się w środowisku brak energii niezbędnej do parowania i fotosyntezy (niskie wartości promieniowania słonecznego). Dodatkowo niskie, w tym czasie, wartości niedosytu wilgotności powietrza również utrudniały proces parowania. Maksymalne wartości F_C i F_H wynikały ze

stosunkowo dużej ilości dostępnej energii promienistej oraz rozwiniętej szaty roślinnej, która w czerwcu osiąga swe apogeum rozwojowe.

Gradient wzrostu F_c jest większy w okresie od stycznia do kwietnia i maleje od kwietnia do czerwca, kiedy to wartość F_c osiąga maksimum, co zdaje się być potwierdzeniem przypuszczenia, że stan szaty roślinnej ma wpływ na wielkość obu procesów wymiany gazowej. Wolniejszy spadek średniej wartości F_c , w porównaniu z F_H , może przypuszczalnie być wywołane wysuszeniem dna lasu, które spowodować mogło redukcje intensywności oddychania ekosystemu, a tym samym zwiększyć udział asymilacji CO_2 w strumieniu netto tego gazu.

Przebieg wartości WUE odzwierciedla proporcje między opisanymi powyżej strumieniami. WUE osiągnął swoje minimum w maju (średnio ok. $7,2 \text{ g}_{[CO_2]} \text{ kg}^{-1}_{[H_2O]}$) co oznacza, że parowanie ekosystemu było najmniej efektywne z punktu widzenia pochłaniania przez las CO_2 z atmosfery (wysoka wartość strumienia okupiona dużą utratą wody). Należy zaznaczyć, że wartości współczynnika były podobnie niskie także w innych miesiącach, podczas których strumień wymiany netto CO_2 ekosystemu był większy od $0,25 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Było to charakterystyczne dla tych miesięcy, w których aparat asymilacyjny lasu działał najintensywniej. Podwyższone wartości WUE obserwowane były w chłodniejszym okresie roku, gdy ilość dostępnej energii promienistej była ograniczona. WUE swoje maksimum osiągnął we wrześniu (prawie $45 \text{ g}_{[CO_2]} \text{ kg}^{-1}_{[H_2O]}$), ale zaznaczyć tutaj należy, że wartość ta jest wynikiem dzielenia małych wartości zarówno strumienia F_H , jak i F_c . Warto również podkreślić, że takie zachowanie WUE pokazuje, że w okresie jesiennym spadek parowania, w stosunku do spadku strumienia wymiany netto CO_2 , jest większy. Powodem tego najprawdopodobniej jest pojawienie się deficytu wodnego, który jest charakterystyczny dla końcówki roku hydrologicznego. Uwidacznia się tu również duża zdolność adaptacyjna sosny zwyczajnej (głównego gatunku porastającego badany ekosystem), do takich właśnie warunków. Pewnym argumentem przemawiającym za takim właśnie stwierdzeniem jest to, że wymiana gazowa ekosystemu pokrytego roślinnością, zarówno CO_2 , jak i H_2O , odbywa się głównie poprzez tę samą drogę (stomaty). Jasno z tego wynika, że wymiana obu gazów pomiędzy badanym ekosystemem, a atmosferą, jest ze sobą silnie powiązana. Pozwala to przypuszczać, że w idealnych warunkach, w których na przepływ obu gazów nie wpływały by inne czynniki takie jak dostępność

energii, niedosyt wilgotności powietrza, jedynym czynnikiem regulującym przepływ obu gazów byłyby aktywność stomat. Z zaprezentowanych rycin wynika jednak, że na tę wymianę wpływa wiele czynników, a w związku z tym wartość WUE silnie fluktuuje w czasie. Odnalezienie i sparametryzowanie choćby najważniejszych z tych czynników powinno być przedmiotem kolejnych studiów, które należy rozszerzyć o dodatkowe pomiary, takie jak np. promieniowanie rozproszone, temperatura drzew.



Rys. 8. Przebiegi średnich miesięcznych wartości: gęstości strumienia promieniowania fotosyntetycznego (PPFD) (a), temperatury powietrza (T_a) (b), parowania (F_H) (c), produkcji netto CO_2 ekosystemu (F_C) (d) oraz współczynnika wykorzystania wody (WUE) (e) lasu w Tucznie w roku hydrologicznym 2012

Fig. 8. Mean monthly values of photosynthetic photon flux density (PPFD) (a), air temperature (T_a) (b), evapotranspiration (F_H) (c), net CO_2 ecosystem production (F_C) (d) and water-use efficiency (WUE) (e) of Tuczno forest for hydrological year 2012

5. Wnioski

Zastosowana technika kowariancji wirów pozwoliła na ilościowy opis (w skali ekosystemu) wymiany CO_2 i H_2O między lasem iglastym a atmosferą. Analiza uzyskanych danych pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wyznaczony na podstawie zmierzonych wartości strumieni netto dwutlenku węgla oraz pary wodnej wskaźnik wykorzystania wody (WUE) stanowi parametr dobrze opisujący aktualną kondycję ekosystemu.

Dzięki znajomości jego wartości można ocenić produktywność badanego ekosystemu w odniesieniu do ilości zużytej w tym czasie wody.

2. W przedstawionej pracy zastosowano nowe podejście do opisanego przez wielu autorów WUE, zakładające wykorzystanie danych pochodzących jedynie z pomiarów bez użycia subiektywnych modeli do uzupełniania braków. Wykorzystując, przetestowane pod względem jakościowym, wartości netto obu strumieni uzyskano w wyniku wskaźnik opisujący zachowanie ekosystemu, jako całości.
3. Analiza sezonowej zmienności WUE w lesie sosnowym na przykładzie Tuczna pozwoliła wysnuć teorię o dobrym przystosowaniu występujących tam gatunków na zmieniające się warunki wodne – w okresie od lutego do lipca średnie miesięczne wartości WUE pozostają względnie stałe.
4. Wysokie wartości wskaźnika w okresie zimowym nie stanowią zaskoczenia z uwagi na rodzaj występujących w analizowanym ekosystemie gatunków iglastych, zdolnych, przy sprzyjających warunkach atmosferycznych, do przeprowadzania procesu fotosyntezy również poza okresem wegetacyjnym. W tych samych warunkach proces parowania jest znacznie ograniczony z uwagi na niewielkie wartości niedosytu pary wodnej, jak i niską temperaturę.
5. Spośród czynników wpływających na kształtowanie się wielkości strumieni F_C i F_H , a tym samym wskaźnika wykorzystania wody, kluczowym okazała się wielkość promieniowania (PPFD) oraz temperatura powietrza.
6. Wymagana jest dalsza, szczegółowa analiza wpływu parametrów meteorologicznych jak i czynników biologicznych na uzyskiwane wartości WUE. Oprócz tych, wymienionych w niniejszej pracy za szczególnie interesujący autorzy uznają niedosyt wilgotności powietrza, wielkość promieniowania rozproszonego jak i temperaturę drzew.

Literatura

1. Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik Ü., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer Ch., Clement R., Elbers J., Granier A., Grünwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T.: *Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology*. Advances in Ecological Research 30, 113–175 (2000).

2. **Aubinet M., Vesala T., Pappale D. (eds.):** *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer Atmospheric Sciences, 2012.
3. **Aurela M.:** *Carbon dioxide exchange in subarctic ecosystems measured by a micrometeorological technique*. Finnish Meteorological Institute Contributions No. 51, 2005
4. **Baldocchi D.D., Verma S.B., Anderson D.E.:** *Canopy photosynthesis and water-use efficiency in a deciduous forest*. *Journal of Applied Ecology*, 24, 251–260 (1987).
5. **Baldocchi D.D.:** *Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future*. *Global Change Biology* 9, 479–492 (2003).
6. **Chen J., Falk M., Euskirchen E., Paw U K.T., Suchanek T.H., Ustin S.L., Bond B.J, Brosofske K.D., Phillips., Bi R.:** *Biophysical controls of carbon flows in three successional Douglas-fir stands based on eddy – covariance measurement*. *Tree physiology*, 22, 169–177 (2002).
7. **FAO:** *Global Forest Resources Assessment 2005, Main Report*. Progress Towards Sustainable Forest Management FAO Forestry paper 147, Rome, 2006.
8. **Foken Th., Wichura B.:** *Tools for quality assessment of surface-based flux measurement*. *Agricultural and Forest Meteorology* 78, 83–105 (1996).
9. **Friedman J.H.:** *A Variable Span Smoother*. Tech. Rep. No. 5, Laboratory for Computational Statistics, Dept. of Statistics, Stanford Univ., California, 1984.
10. **Gu L., Falge E.M., Boden T., Baldocchi D.D, Black T.A., Saleska S.R., Suni T., Verma S.B., Vesala T., Wofsy S.C., Xu L.:** *Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 128, 179–197 (2005).
11. Informacja o stanie lasów oraz realizacji „Krajowego programu zwiększania lesistości” w 2010 r., MŚ, Warszawa, 2011.
12. **Koźmiński C., Michalska B., Czarnecka M.:** *Klimat województwa zachodnio-pomorskiego*. Akademia Rolnicza w Szczecinie, Uniwersytet Szczeciński, 147 (2007).
13. **Olejnik J.:** *Modelowe badania struktury bilansu cieplnego i wodnego zlewni w obecnych i przyszłych warunkach klimatycznych*. *Rocz. AR Pozn.*, z. 266, rozprawa habilitacyjna, 1996.
14. **Olejnik J., Kędziora A.:** *A model for heat and water balance estimation and its application to land use and climate variation*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 601–617 (1991).
15. **Olejnik J. i in.:** *Oszacowanie strumieni netto dwutlenku węgla wymienianymi pomiędzy ekosystemem leśnym a atmosferą*. Raport z projektu badawczego zleconego przez DGLP za okres styczeń 2008–grudzień 2011, 2012.

16. **Rosenberg N.J., Blad B.L. Verma S.B.:** *Microclimate: the biological environment*. John Wiley, New York, 495 (1983).
17. **Urban O., Klem K., Ač A., Havránková K., Holišová P., Navráti M., Zitová M., Kozlová K., Pokorný R., Šprtová M., Tomášková I., Špund V., Grace J.:** *Impact of clear and cloudy sky conditions on the vertical distribution of photosynthetic CO₂ uptake within a spruce canopy*. *Functional Ecology* vol. 26, 46–55 (2012).
18. **Urbaniak M., Chojnicki B.H., Juszczak R., Olejnik J.:** *Seasonal water use efficiency run at Rzecin wetland*. *Acta agrophysica*, 183, 108–126 (2010).
19. **Valentini R. ed.:** *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*. Springer-Verlag, Heidelberg, 2002.
20. **Webb E.K., Pearman G., Leuing R.:** *Correction of flux measurement for density effect due to heat and water vapour transfer*. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 106, 85–100 (1980).
21. **Zajac S., Kwiecień R.:** *Modyfikacja „Krajowego programu zwiększania lesistości”*. [W]: *Rola leśnictwa w ekorozwoju regionalnym* (red. A. Grzywacz). Wyd. Polskie Towarzystwo Leśne, 114–132 (2002).
22. **Zajac S., Kwiecień R.:** *Główne kierunki modyfikacji Krajowego programu zwiększania lesistości*. *Postępy Nauk Rolniczych*, 3, 51–61 (2002).

Seasonal Water Use Efficiency (WUE) Index Course in Pine Forest

Abstract

Assessment of the ecosystem productivity in relation to the amount of water used for such kind of processes have already been investigated for the different ecosystem types by many researchers. Water Use Efficiency (WUE) parameter shows seasonal variation due to changing weather conditions, which determine processes of photosynthesis, respiration and evapotranspiration, and because of biological factors variability.

The analysis of the WUE dynamics in the forest ecosystem in Tuczno research station over the hydrological year 2012 were presented in the paper. WUE was calculated based on the daily CO₂ and H₂O fluxes measured by means of the eddy covariance system (EC) installed over the forest canopy. The fluxes were quality checked in relation to the wind direction, friction velocity values and stationary. The data series used in this investigation were not gap-filled.

By using the net value of both fluxes, a good indicator which describe the behavior of the ecosystem as the whole, was obtained. Among a number of weather condition factors, that affect the value of the tested indicator (WUE),

mainly photosynthetic photon flux density (PPFD) and the air temperature were evaluated. Separate analysis has been done for daily courses of both CO₂ and H₂O fluxes, as well as for WUE for each month of the analyzed period.

The highest values of H₂O fluxes (F_H) were observed in May and June (0.25 and 0.3 kg·m⁻²·s⁻¹) and the lowest in the period from September to December (0.02–0.05 kg·m⁻²·s⁻¹). The daily courses of water vapor fluxes revealed dependence to the measured PPFD fluxes, which determines in turn the intensity of the evapotranspiration process.

The time courses of the daily 30-min average carbon dioxide fluxes (F_C) were also highly variable in each month, similarly to the variances of the F_H fluxes. The lowest values of the net F_C were measured in the period from October to December (net CO₂ fluxes did not exceed 0.55g·m⁻²·s⁻¹), while in the period from April to July the net ecosystem productivity was the biggest (1.5–2.0 g·m⁻²·s⁻¹).

WUE reached its minimum in May (7 g_[CO₂]·kg⁻¹_[H₂O]), what indicates that the evapotranspiration of the ecosystem was the least effective from the point of view of CO₂ absorption from the atmosphere (the ecosystem had a high productivity but it lost a great amount of water at the same time). In contrary, higher WUE values were observed in the colder period of the year, when the amount of available radiant energy was limited. WUE reached its peak in September (nearly 45 g of_[CO₂]·kg⁻¹_[H₂O]) which reveals, that in autumn the decline of evapotranspiration rates were higher than rates of the net CO₂ exchange decrease. It also highlights the high adaptability of Scots pine (main species in studied forest ecosystem – 99%), to described conditions.

The designated water use efficiency (WUE) parameter, may be used as a good indicator of the current condition of the ecosystem.