

**Bogdan H. CHOJNICKI, Marek URBANIAK, Jacek LEŚNY,
Radosław JUSZCZAK, Janusz OLEJNIK**

Katedra Agrometeorologii, Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego w Poznaniu
Agrometeorology Department, The August Cieszkowski Agricultural University of Poznań

Nowoczesne metody pomiaru wymiany masy i energii pomiędzy podłożem a atmosferą The modern techniques applied for mass and heat exchange between ecosystems and atmosphere measurements

Słowa kluczowe: bilans cieplny i masy, metoda akumulacyjna, metoda profilowa, metoda kowariancji wirów

Key words: heat and mass balance, accumulation method, profile method, eddy covariance method

Wprowadzenie

Zmiany globalne, obserwowane obecnie na Ziemi, dotyczą także zmian cech fizycznych i chemicznych atmosfery. Wynikają one głównie z działalności przemysłowej człowieka, która prowadzi do uwalniania się gazów do powietrza.

Wszystkie ekosystemy lądowe pozostają w dynamicznej równowadze z atmosferą. Ekosystemy lądowe cechują się dużą różnorodnością oraz złożonością struktury, co ma wpływ na intensywność procesów wymiany masy i ciepła między ekosystemami a atmosferą.

Różnorodność i złożoność powodują potrzebę parametryzacji procesów wymiany dla różnych środowisk i przewi-

dzenia ich reakcji na zmiany warunków (np. klimatycznych) w przyszłości.

Opracowane dotychczas modele wymiany masy i ciepła dla różnych ekosystemów wymagają parametryzacji, a ta nie odbędzie się bez odpowiedniej liczby danych. Niezbędne do osiągnięcia tego celu jest wykonywanie ciągłych pomiarów nad różnymi ekosystemami w różnych warunkach klimatycznych – powoduje to potrzebę automatyzacji procesów pomiarowych.

Na całym świecie naukowcy utworzyli automatyczne sieci monitorujące wymianę masy i ciepła między powierzchnią globu a atmosferą, szczególną uwagę skupiając na pomiarach wielkości wymiany gazów szklarniowych (CO₂, CH₄, N₂O itd.). Sieci monitorujące na przykład wymianę CO₂ między atmosferą a ekosystemami lądowymi to CARBOEUROPE, AMERIFLUX czy ASIAFLUX (Running i in. 1999, Aubinet i in. 2000, Baldocchi i in. 2001).

W ramach tych sieci wykorzystywane są różne techniki pomiarowe do oceny wielkości wymiany gazowej i cieplnej, takie jak metoda kowariancji wirów czy metody komorowe.

Celem tej pracy jest przegląd oraz omówienie technik pomiarowych stosowanych w Katedrze Agrometeorologii w odniesieniu do tych, które stosowane są na świecie.

Metody pomiarowe

Metody profilowe

Podstawy metody stanowi teoria podobieństwa Monina-Obukhova. Dokonywane są tu pomiary wybranych wielkości skalarnych oraz poziomych składowych prędkości wiatru na co najmniej dwóch wysokościach nad badaną powierzchnią czynną. Równanie wykorzystywane podczas stosowania metod profilowych ma następującą postać (Kędziora 1999):

$$F_x = K_x \Delta x / \Delta z \quad (1)$$

gdzie:

F_x – gęstość strumienia substancji x [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

K_x – współczynnik turbulencyjnego przewodnictwa substancji x , którego wartość jest zależna od wartości ilorazu różnicowego poziomej prędkości wiatru (u) po wysokości (z) – $\Delta u / \Delta z$ [$1 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$],

$\Delta x / \Delta z$ – różniczka stężenia substancji x po wysokości (z) [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-1}$].

Podobne gradientowe pomiary wykonuje się, stosując metody oparte na pomiarach wybranych składowych bilansu cieplnego. Najbardziej popularną jest stosowana do dziś metoda Bowena, w której nie wykonuje się pomiarów

prędkości wiatru, a jedynie pomiary ciśnienia pary wodnej i temperatury powietrza. Dodatkowo wykonywane są pomiary salda promieniowania oraz strumienia ciepła glebowego.

Niewątpliwą zaletą metod gradientowych jest ich prostota. Pomiary wykonywane na dwóch wysokościach nad powierzchnią czynną nie wymagają zastosowania skomplikowanych, na dzisiejsze czasy, czujników pomiarowych. Budowa oraz użytkowanie takiego sprzętu pomiarowego nie należy do kłopotliwych.

Nad szorstkimi powierzchniami roślin gradienty mierzonych wielkości skalarnych są bardzo małe. Wymaga to prowadzenia pomiarów z dużą dokładnością lub zachowania dużej odległości między poziomami pomiarowymi. Duża odległość między czujnikami powoduje wymóg pomiarów nad bardzo dużymi homogenicznymi powierzchniami, które nie występują często w krajobrazie. Stanowi to poważne ograniczenie tej grupy metod.

Pojawienie się nowych technik pomiarowych (np. metoda kowariancji wirów) znacznie ograniczyło zakres stosowania metod profilowych, jednak są one wciąż stosowane ze względu na swoją prostotę i stosunkowo niskie koszty utrzymania systemu (Kędziora i in. 1998, Burba i in. 1999, Rinne i in. 2000, Olejnik i in. 2001).

Metody komorowe

Podczas stosowania tych metod zamyka się porcję powietrza, znajdującą się nad powierzchnią czynną, i mierzy się zmiany stężenia skalara, wynikające z aktywności badanej powierzchni.

Ogólny wzór stosowany w tej metodzie ma następującą postać (Drewitt i in. 2002):

$$F_x = \frac{aPV\delta_x}{RTA} \quad (2)$$

gdzie:

F_x – gęstość strumienia substancji x [$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$];

a – stała empiryczna [-],

P – ciśnienie powietrza w komorze [Pa],

V – objętość komory [m^3],

R – stała gazowa powietrza; $R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,

T – temperatura powietrza w komorze [K],

A – powierzchnia podstawy komory [m^2],

δ_x – zmiana stężenia substancji x w powietrzu znajdującym się w komorze [$\text{mol}_x\cdot\text{mol}^{-1}$ suchego powietrza $\cdot\text{s}^{-1}$].

Wydzielono trzy podstawowe grupy systemów komorowych (Livingston i Hutchinson 1995):

1. Komory zamknięte bez przepływu powietrza – powietrze znajdujące się nad powierzchnią czynną jest zamykane na czas badania w komorze i dokonywany jest pomiar zmian stężenia badanej substancji w powietrzu w komorze (analizator znajduje się wewnątrz komory).
2. Komory zamknięte z przepływem powietrza – powietrze zamykane jest w komorze na czas pomiaru, ale powietrze cyrkuluje w układzie, w którym znajduje się analizator gazowy i komora. Strumień obliczany jest na podstawie zmierzonego wzrostu lub spadku stężenia badanej substancji w czasie.

3. Komory otwarte z przepływem powietrza – w tych systemach powietrze przepływa przez komorę i jest ono pobierane z zewnątrz. Wielkość strumienia określa się na podstawie różnicy między stężeniami zmierzonym na wejściu i na wyjściu z komory oraz wielkości przepływu powietrza.

Do niewątpliwych zalet tej grupy metod zaliczyć można stosunkowo małą skalę badawczą, sięgającą nawet rozmiarów jednego liścia (Gunderson i in. 2002). Dodatkową zaletą jest brak wymogu istnienia turbulencji w atmosferze podczas wykonywania pomiarów (np. nocą w warunkach stałej równowagi atmosfery).

W badaniach wielkoskalowych zastosowanie systemów komorowych może być mocno utrudnione lub niemożliwe, co wynika z faktu dużej zmienności przestrzennej mierzonych strumieni (np. emisja metanu z torfowisk). Drugim poważnym ograniczeniem metody jest wielkość roślin występujących na badanej powierzchni (np. drzew). Sposobem powszechnie stosowanym w przypadku badań strumieni w warunkach ich dużej zmienności przestrzennej jest zastosowanie większej liczby komór pomiarowych w tym samym czasie. Podnosi to jednak koszty i powoduje poważne problemy natury organizacyjnej.

Dodatkowym powodem krytyki stosowania systemów komorowych jest ograniczenie lub całkowita eliminacja turbulentnego przepływu powietrza nad badaną powierzchnią w ciągu dnia w warunkach chwiejnej równowagi atmosfery.

Metody kowariancji wirów (Eddy Covariance – EC)

Podstawy teoretyczne metody kowariancji wirów zostały opracowane w połowie zeszłego stulecia, a równanie stosowane w tej metodzie ma postać (Swinbank 1951):

$$F_x = \overline{\omega' p'_x} \quad (3)$$

gdzie:

F_x – gęstość strumienia substancji x [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

ω' – chwilowe odchylenie pionowej składowej prędkości wiatru (ω) od średniej wartości ($\overline{\omega}$) z okresu pomiarowego [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

p'_x – chwilowe odchylenie stężenia wielkości x od średniej wartości stężenia \overline{x} z okresu pomiarowego [$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Głównym ograniczeniem w stosowaniu tej metody było wymaganie zastosowania szybkich, dokładnych i równoczesnych pomiarów fluktuacji pionowej składowej prędkości wiatru (ω) oraz stężeń badanej wielkości skalarnej (x). Dodatkowe utrudnienie stanowiła potrzeba zastosowania odpowiednio wydajnych systemów obliczeniowych, które pozwalałyby na przetworzenie dużych ilości danych, otrzymanych w wyniku zastosowania metody kowariancji wirów (Handbook..., 2004). Obecnie postęp techniczny (nowoczesne instrumenty pomiarowe oraz wydajne komputery) pozwolił na pokonanie obu opisanych powyżej ograniczeń.

Zaletą tej metody jest brak współczynników empirycznych. Obecnie ta metoda opisywana jest jako najlepsza, dostępna do pomiarów wymiany masy

i ciepła między powierzchnią czynną a atmosferą w skali ekosystemu.

Wadami tej metody są wymogi płaskości, homogeniczności oraz odpowiedniej wielkości badanej powierzchni czynnej. Dodatkowym poważnym ograniczeniem jest konieczność występowania turbulencji w atmosferze (Handbook..., 2004). Ograniczenie natury technicznej stanowi obecnie niemożność budowy analizatorów, pozwalających na szybkie i dokładne pomiary fluktuacji stężeń substancji występujących w atmosferze w małych stężeniach (np. lotne związki organiczne, amoniak)

Metody akumulacji wirów (Eddy Accumulation – EA)

Jak wspomniano wyżej, strumieni wielu substancji wymienianych między powierzchnią ekosystemu a atmosferą nie można pomierzyć za pomocą systemu kowariancji wirów ze względu na zbyt niskie ich stężenie. Konstrukcja analizatorów, mogących zmierzyć szybko i dokładnie fluktuacje tych substancji, nadal jest niemożliwa. Dlatego też pod koniec lat siedemdziesiątych opracowano metodę akumulacji wirów. W metodzie tej gromadzi się powietrze unoszące się do góry ($\omega \uparrow$) i w dół ($\omega \downarrow$) w dwóch oddzielnych zbiornikach, a ilość chwytanego powietrza jest proporcjonalna do wielkości pionowej składowej prędkości wiatru (Desjardins 1977). W praktyce okazało się jednak, że regulacja strumienia przepływu powietrza jest bardzo trudna z technicznego punktu widzenia. Z tego powodu zaproponowano modyfikację EA przez zastosowanie tzw. martwego zakresu (dead band) wartości pionowej skła-

dowej prędkości wiatru (ϖ). Zakresu, w którym powietrze nie jest gromadzone w żadnym ze zbiorników, a wzór na obliczenie wielkości strumienia ma postać (Businger i Oncley 1990):

$$F_x = \beta \sigma_{\varpi} \left(\rho_x^{\varpi \uparrow} - \rho_x^{\varpi \downarrow} \right) \quad (4)$$

gdzie:

F_x – strumień dowolnej wielkości skalarnej x ,

β – współczynnik empiryczny,

σ_{ϖ} – odchylenie standardowe zbioru pionowej składowej prędkości wiatru ϖ ,

$\rho_x^{\varpi \uparrow}$ – stężenie dowolnej wielkości skalarnej x w zbiorniku „górnym”,

$\rho_x^{\varpi \downarrow}$ – stężenie dowolnej wielkości skalarnej x w zbiorniku „dolnym”.

Niewątpliwą zaletą metod akumulacji wirów jest prostota i stosunkowo małe, w porównaniu z metodą kowariancji wirów, wymagania techniczne stawiane przed zastosowanym sprzętem pomiarowym. Dzięki nim możliwe są pomiary strumieni substancji występujących w atmosferze w bardzo małych stężeniach.

Systemy wykorzystujące metodę akumulacji wirów wymagają, tak jak metoda kowariancji wirów, odpowiednich warunków pomiarowych (np. odpowiednich cech powierzchni czynnej i występowania turbulencji w atmosferze). Do tego pomiary wykonane za pomocą tych systemów obciążone są większą niepewnością niż te wykonane za pomocą metody kowariancji wirów.

Podsumowanie opisanych metod

Pomimo niewątpliwych ograniczeń metod komorowych są one bardzo uży-

teczne w badaniach wykonywanych w małych skalach przestrzennych oraz czasowych. Metody te są także użyteczne w warunkach braku turbulencji w atmosferze (np. nocą).

Systemy pomiarowe, które działają na podstawie metody kowariancji wirów, muszą być stosowane nad powierzchniami o odpowiednich rozmiarach oraz cechach fizycznych, niezbędne jest też występowanie turbulencji powietrza. Jest to obecnie najbardziej zaawansowana technicznie metoda pomiarowa, uznawana za standard w pomiarach strumieni dwutlenku węgla nad powierzchniami ekosystemów lądowych na całej Ziemi (Baldocchi i in. 2001). Jej ograniczenie stanowi czasami niemożność konstrukcji odpowiednio szybkiego i dokładnego analizatora gazowego. W metodach akumulacji wirów mogą być zastosowane wolniejsze analizatory, ale jest ona uznana za mniej dokładną niż EC.

Metody stosowane obecnie w Katedrze Agrometeorologii

W Katedrze Agrometeorologii AR w Poznaniu w latach osiemdziesiątych zapoczątkowane zostały prace nad systemami pomiarowymi, służącymi do pomiarów wymiany masy i ciepła. Na początku rozwijano techniki oparte na metodach profilowych, a potem bilansu cieplnego (Olejnik 1989). Zastosowano je z powodzeniem do oceny wielkości oraz czasowych przebiegów strumieni ciepła w krajobrazie rolniczym.

Lata dziewięćdziesiąte przyniosły wzrost zainteresowania strumieniami gazów śladowych, takich jak CO₂. Metoda kowariancji wirów pozwala na bezpośrednie pomiary strumienia tego gazu.

Z tego powodu od 2000 roku w Katedrze rozpoczęto prace nad budową takiego systemu. Pierwsze badanie terenowe wykonano podczas sezonu wegetacyjnego 2002 roku (Józefczyk 2005), a od 2004 roku system działa w ciągły sposób na terenie podmokłym w Rzecinie (Urbania 2006, Chojnicki i in. 2007). Od 2005 roku prowadzone są także prace nad wykorzystaniem w terenie komorowych systemów pomiarowych – wykorzystywane są głównie do pomiaru wielkości emisji metanu z torfowiska w Rzecinie (Paul 2005, Szwejkowski 2006).

Obecnie prowadzone są prace nad automatyzacją systemów komorowych, służących także do pomiarów wymiany CO₂ w warunkach mikroskalowych. Pomiarów wymiany metanu oraz innych gazów, których zbyt niskie stężenie uniemożliwia wykonanie pomiarów metodą kowariancji wirów, możliwe są za pomocą systemów akumulacji wirów EA. W od początku 2007 roku prowadzone są prace nad budową systemu relaxed eddy accumulation (REA) i w połowie 2008 roku spodziewane są pierwsze testy polowe tego systemu.

Podsumowanie

Różnorodność zastosowanych technik wynika zarówno z istnienia różnych teorii pomiarowych, jak i różnych warunków ich stosowania. Choć każda z metod ma swoje zalety i ograniczenia, ich rozwój jest niezbędny w badaniach procesów wymiany masy i ciepła między powierzchnią Ziemi a atmosferą z racji różnych skal przestrzennych i czasowo prowadzonych badań. Dodatkowo meto-

dy te mogą służyć do wzajemnej kontroli dokładności uzyskanych wyników.

Literatura

- AUBINET M., GRELLE A., IBROM A., RAN-
NIK Ü., MONCRIEFF J., FOKEN T., KO-
WALSKI 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., VALENTI-
NI R., VESALA T. 2000: Estimates of the
annual net carbon and water exchange of
forests: the EUROFLUX methodology. *Adv.
Ecol. Res.* 30: 113–175.
- BALDOCCHI D.D., FALGE E., LIANHONG G.,
OLSON R., HOLLINGER D., RUNNING S.,
ANTHONI P., BERNHOFER CH., DAVIS
K., EVANS R., FUENTES J., GOLDSTEIN
A., KATUL G., LAW B., LEE X., MALHI Y.,
MEYERS T., MUNGER W., OECHEL W.,
PAW U K.T., PILEGAARD K., SCHMIDT
H.P., VALENTINI R., VERMA S., VESE-
LAQ T., WILSON K., WOFSY S. 2001:
FLUXNET: A new tool to study the tempo-
ral and spatial variability of ecosystem-scale
carbon dioxide, water vapor, and energy flux
densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82.
- BURBA G.G., VERMA S.B., KIM J. 1999: Sur-
face energy fluxes of *Phragmites australis* in
a prairie wetland. *Agricultural and Forest
Meteorology* 94: 31–51.
- BUSINGER J.A., ONCLEY S.P. 1990: Flux
measurement with conditional sampling.
National Center for Atmospheric Research,
Boulder Colorado.
- CHOJNICKI B.H., URBANIAK M., JÓZEF-
CZYK D., AUGUSTIN J., OLEJNIK J.
2007: Measurements of gas and heat fluxes
at Rzecin wetland. In: *Wetlands: Monitoring,
Modeling and Management*. Eds. T. Okruszko
i in. Taylor i Francis Group, London.
- DESJARDINS R.L. 1977: Description and
evaluation of sensible heat flux detector.
Boundary-Layer Meteorology 11: 147–154.
- DREWITT G.B., BLACK T.A., NESIC Z., HUM-
PHREYS E.R., JORK E.M., SWANSON
R., ETHIER G.J., GRIFFIS T., MORGEN-

- STERN K. 2002: Measuring forest floor CO₂ fluxes in a Douglas-fir forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 299–317.
- GUNDERSON C.A., SHOLTIS J.D., WULLSCHLEGER S.D., TISSUE D.T., HANSON P.J., NORBY R.J. 2002: Environmental and stomatal control of photosynthetic enhancement in the canopy of a sweetgum (*Liquidambar styraciflua* L.) plantation during 3 years of CO₂ enrichment. *Plant, Cell and Environment* 25: 379–393.
- Handbook of Micrometeorology, 2004. Eds. X. Lee, W.J. Massman, B.E. Law. Kluwer Academic Publisher.
- JÓZEFczyk D. 2005: Dobowy przebieg strumieni dwutlenku węgla i pary wodnej w krajobrazie rolniczym. Praca doktorska AR Poznań.
- KĘDZIORA A. 1999: Podstawy agrometeorologii. PWRiL, Poznań.
- KĘDZIORA A., OLEJNIK J., TUCHOŁKA S., LEŚNY J. 1998: Evapotranspiration within Wielkopolska and Cessičres landscapes. In: *L'eau de la cellule au paysage*. Ed. S. Wiche- rek. Elsevier: 93–104.
- LIVINGSTON G.P., HUTCHINSON G.L. 1995: Enclosure-based measurement of trace gas exchange: applications and sources of error. In: *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions from Soil and Water*. Eds. P. Matson, R. Harriss. Blackwell Scientific, Oxford: 14–51.
- OLEJNIK J. 1989: Pomiary wymiany ciepła i pary wodnej w środowisku naturalnym przy zastosowaniu psychrometrów kwarcowych. *Rocz. AR Pozn. 201, Melior*: 8: 75–82.
- OLEJNIK J., EULENSTEIN F., KĘDZIORA A., WERNER A. 2001: Evaluation of water balance model using data for bare soil and crop surfaces in Middle Europe. *Agric. and Forest Meteorol.* 106: 105–116.
- PAUL M. 2005: Zależność emisji metanu od temperatury podłoża na terenie podmokłym w Rzecinie. Praca magisterska. AR Poznań.
- RINNE J., TOUVINEN J-P, LAURILA T., HAKOLA H., AUREOLA M., HYMEN H. 2000: Measurements of hydrocarbon fluxes by a gradient method above northern boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 102: 25–37.
- RUNNING S.W., BALDOCCHI D.D., TURNER D., GOWER S.T., BAKWIN P., HIBBARD K. 1999: A global terrestrial monitoring network, scaling tower fluxes with ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sens. Environ.* 70: 108–127.
- STULL R.B. 2000: Meteorology for scientists and engineers. Brooks/Cole.
- SWINBANK W.C. 1951: Measurements of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *J. Meteorol.* 8: 135–145.
- SZWAJKOWSKI T. 2006: Zmienność czasowa oraz przestrzenna emisji metanu na terenie torfowiska w Rzecinie w 2005 roku. Praca magisterska. AR Poznań.
- URBANIĄK M. 2006: Ocena sezonowej zmienności strumieni dwutlenku węgla i pary wodnej na terenach podmokłych metodą kowariancji wirów. Praca doktorska. AR Poznań.

Summary

The modern techniques applied for mass and heat exchange between ecosystems and atmosphere measurements. The heat and mass exchange measurement techniques are commonly used for environmental studies. Globally we observe rapid increase of greenhouse gases concentration in the atmosphere. This phenomenon causes stronger interest in gas exchange measuring techniques such as eddy covariance, eddy accumulation and chambers. These techniques has been recently developed at Agrometeorology Department for water vapor, carbon dioxide, methane and nitrous dioxide exchange measurements. The measurements of CO₂, CH₄, N₂O and heat fluxes using described above techniques has been carried out at Rzecin wetland since the beginning of 2004. These activities have been realized in the framework of European integrated projects both CARBOEUROPE and NITROEUROPE.

Authors' address:

Bogdan H. Chojnicki, Marek Urbaniak, Jacek Leśny, Radosław Juszcak, Janusz Olejnik
Akademia Rolnicza im. A. Cieszkowskiego
ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań
Poland