

## PRÓBA OCENY DYNAMIKI UWALNIANIA WODY Z GLEBY PRZY POMOCY SPEKTROSKOPII FOTOAKUSTYCZNEJ

Aleksandra Żurawska,  
*Katedra Fizyki, Politechnika Opolska*

Paweł Rochowski, Janusz Szurkowski  
*Instytut Fizyki Doświadczalnej, Uniwersytet Gdański*

**Streszczenie.** W prezentowanej pracy próbowaliśmy zastosować spektroskopię fotoakustyczną do oceny szybkości parowania (ewaporacji) gleby. W pomiarach wykorzystaliśmy aparaturę z dwoma wiązkami światła. Jedna z wiązek oświetlała próbki gleby silnym strumieniem światła niemodulowanego a druga z wiązek, o natężeniu ponad stukrotnie mniejszym, monitorowała zmiany zachodzące w badanych próbkach. Otrzymane rezultaty wskazują na możliwość wykorzystania spektroskopii fotoakustycznej nie tylko do oceny prędkości parowania gleby, lecz również w pomiarach zmian parametrów cieplnych jej wierzchnich warstw.

**Słowa kluczowe:** spektroskopia fotoakustyczna, ewaporacja, współczynnik dyfuzji ciepła gleby

### Wstęp

Ewaporacja to proces, w którym ciekła woda jest zamieniana w parę i usuwana z powierzchni parującej powierzchni. W glebie woda może się znajdować pod różnymi postaciami, które wykazują różny stopień związania z cząstkami glebowymi. Obserwując zjawisko parowania gleby musimy wziąć pod uwagę co najmniej dwa jej rodzaje; wodę kapilarną oraz grawitacyjną. Woda kapilarna jest to woda wypełniająca kapilary glebowe, w których siły wiązania przewyższają siły grawitacyjne. Im średnica kapilar jest mniejsza, tym wiązanie w nich wody silniejsze. Woda kapilarna może poruszać się we wszystkich kierunkach wskutek różnicy potencjałów kapilarnych (z kapilar szerszych do węższych). Woda grawitacyjna (wolna) podlega siłom grawitacji i porusza się w glebie od góry ku dołowi. Jest ona tylko częściowo pobierana przez rośliny wskutek szybkiego przesączania przez glebę.

Do zmiany wody w parę jest potrzebna energia. Energii tej dostarcza promieniowanie słoneczne bezpośrednio oraz przez zmianę temperatury otoczenia. Przyczyną ewaporacji jest różnica ciśnień pary wodnej na parującej powierzchni oraz w otoczeniu. W trakcie parowania stopniowo następuje wyrównanie tej różnicy ciśnień, i jeżeli wilgotne powietrze nie jest odprowadzane do atmosfery proces powoli zamiera. W warunkach naturalnych wiatr powoduje wymianę wilgotnego powietrza na suche i jego prędkość jest jednym z głównych parametrów determinujących ewaporację.

Nasze badania polegały na próbie uwzględnienia wpływu różnych zmian, zachodzących w próbce i jej otoczeniu, na zmiany obserwowanego sygnału fotoakustycznego. W czasie trwania pomiaru (30 minut) sygnał fotoakustyczny potrafił zmienić swoją amplitudę o 60 procent.

## Materiały i metody

Chociaż zasada działania komory fotoakustycznej jest prosta, to matematyczny opis powstawania sygnału akustycznego w komórce fotoakustycznej jest skomplikowany. Powstało szereg teorii [Rosencwaig 1978; Tam 1986] biorących pod uwagę, przy generacji sygnału fotoakustycznego, zarówno rozszerzalność termiczną próbek, zjawisko elektrostrykcji jak i szereg innych efektów, w których zaabsorbowana energia jest dezaktywowana, takich jak drgania powierzchni próbki, ogrzewanie otaczającego ją gazu („thermal piston model”), desorpcję molekuł gazu z powierzchni próbki oraz jego wydzielanie i pobieranie wskutek zachodzących w próbce reakcji fotochemicznych. W przypadku naszych próbek, szereg z tych efektów możemy zaniedbać.

Interpretując sygnał fotoakustyczny gleby musimy wziąć pod uwagę dwa składniki. Jednym z nich jest część zaabsorbowanej energii wzbudzenia, która ulega dezaktywacji na drodze ciepła. Nazywamy ją sygnałem fototermicznym. Do opisu powstawania tego sygnału wystarcza model tłoka cieplnego („thermal piston model”) stworzony przez Rosencwaiga i Gersho [Rosencwaig 1978]. Zakłada się w nim, że światło jest absorbowane w próbce zgodnie z prawem Beera-Lamberta. Następnie z pewną wydajnością jest ono zamieniane na ciepło. Ciepło to, zgodnie z równaniem dyfuzji, dyfunduje do powierzchni próbki, gdzie ogrzewa cienką warstwę gazu przylegającą do próbki. Warstwa ta, działając jak tłok na pozostałą część gazu, powoduje, w przypadku oświetlenia próbki światłem modulowanym, powstawanie modulowanych z tą samą częstością zmian ciśnienia gazu [Szurkowski 2004; Żurawska i Szurkowski 2006].

Drugim źródłem sygnału fotoakustycznego jest sygnał fotobaryczny [Malkin i Canaani 1994; Szurkowski 2004], będący skutkiem zachodzącej pod wpływem światła wymiany gazowej pomiędzy próbka a gazem wypełniającym komorę pomiarową.

Pomiary przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch źródeł światła [Szurkowski 2004]. Pierwsze oświetlało próbkę światłem białym, niemodulowanym. Strumień światła padający na próbkę (ok.  $350 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) odpowiada strumieniowi światła padającego na ziemię w letni, bezchmurny dzień. Drugie ze źródeł wytwarzało pomiarową wiązkę światła (680 nm) o szerokości widmowej 20 nm. Była ona modulowana z częstotliwością 20 Hz i powodowała ponad sto razy mniejszą irradiację próbki niż pierwsza z wiązek.

Przy tak dużej różnicy strumienia światła w obu wiązkach możemy przyjąć, że jedynie światło niemodulowane powodowało parowanie wody zawartej w próbkach gleby i zmianę jej parametrów cieplnych. Pomiarowa wiązka światła mierzyła jedynie zmiany zachodzące w komorze pomiarowej pod wpływem światła niemodulowanego. Amplituda sygnału fotoakustycznego w prowadzonych przez nas pomiarach zależała od trzech parametrów; zmiany wilgotności powietrza w komorze pomiarowej, zmiany stopnia rozwinięcia powierzchni próbki, oraz naszym zdaniem najbardziej znaczącego – zmiany parametrów cieplnych próbki wskutek parowania.

Ponieważ gleba należy do próbek nieprzezroczystych i termicznie grubych możemy amplitudę sygnału fotoakustycznego ( $S$ ) przedstawić jako proporcjonalną do;

$$S \sim \frac{1}{a_g} \left( \frac{\mu_s}{k_s} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- $a_g$  – współczynnik dyfuzji ciepła gazu zawartego w komorze,
- $\mu_s$  – droga dyfuzji cieplnej („thermal diffusion length”) badanej próbki,
- $k_s$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego badanej próbki.

Zmiana wilgotności powietrza w komorze pomiarowej, pierwszy z rozważanych czynników, wpływa na sygnał fotoakustyczny poprzez zmianę parametrów cieplnych gazu. W trakcie parowania próbki rośnie stopień nasycenia powietrza zawartego w komorze pomiarowej, zmienia się  $a_g$  i sygnał fotoakustyczny powinien maleć. Jednak zmiany amplitudy sygnału, w temperaturze pokojowej, związane ze stopniem nasycenia powietrza w komorze nie przekraczają zwykle 10%. W naszych pomiarach nadmiar wilgoci skraplał się na ścianach komory, których temperatura, w trakcie pomiarów, nie ulegała zmianom.

Drugi z czynników (stopień rozwinięcia powierzchni) w przypadku gleb może mieć większe znaczenie tylko wtedy, kiedy woda grawitacyjna nie zdąży jeszcze opuścić powierzchni próbki. Dla większości próbek, pobieranych z wierzchniej warstwy gleby, kilka godzin po podlaniu, nie powinien on mieć istotnego wpływu na sygnał.

Wydaje się, że dominujący wpływ w naszych pomiarach miał trzeci z parametrów, czyli zmiana stosunku drogi dyfuzji cieplnej badanej próbki do jej współczynnika przewodnictwa cieplnego. Przez drogę termicznej dyfuzji, w spektroskopii fotoakustycznej rozumiemy wielkość, którą możemy wyrazić wzorem:

$$\mu = \sqrt{\frac{2\beta}{\omega}}, \quad (2)$$

gdzie

- $\beta$  – współczynnik dyfuzji ciepła [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $\omega$  – częstość modulacji wiązki światła [ $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Współczynnik dyfuzji ciepła jest równy:

$$\beta = \frac{k}{\rho c}, \quad (3)$$

gdzie

- $k$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],
- $\rho$  – gęstość [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],
- $c$  – ciepło właściwe [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

W trakcie pomiarów stosowano tylko jedną częstotliwość modulacji (20 Hz). Możemy, więc przyjąć, że zmiany sygnału fotoakustycznego ( $S$ ) były proporcjonalne do:

$$S \sim \frac{\mu_s}{k_s} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_s c_s k_s}}, \quad (4)$$

gdzie symbol  $s$  oznacza odpowiednie parametry badanych próbek.

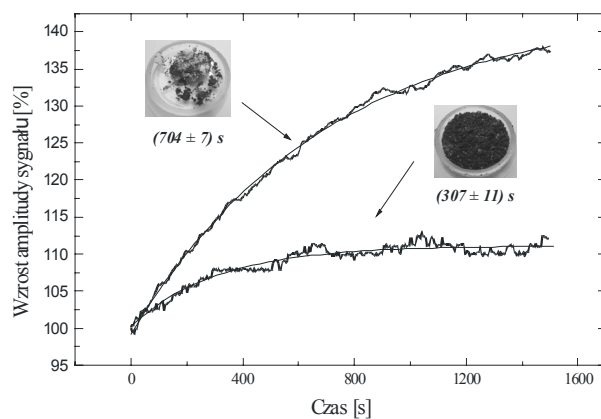
Do pomiarów wykorzystano próbki gleby z doniczek roślin rosnących w laboratorium. Zawierały one dużą ilość próchnicy w górnej warstwie. Jeżeli nie zaznaczono inaczej roślina była podlewana około godziny 8.00 a próbki pobierano, tego samego dnia, pomiędzy 13.00 a 14.00. W pomiarach wykorzystywaliśmy tylko wierzchnią warstwę gleby, o grubości nieprzekraczającej 2 mm. Masa próbek wynosiła  $(55 \pm 6)$  mg.

## Wyniki badań

Wyniki pomiarów przedstawione na rysunku 3 dotyczą próbek znajdujących się początkowo w stanie równowagi. Próbki te pobierano parę godzin po podlewaniu, kiedy woda grawitacyjna dotarła do głębszych warstw gleby. Możemy tę sytuację scharakteryzować przy pomocy równania;

$$\nabla(\phi + \psi) = 0 \quad (5)$$

co oznacza, że siły związane z napięciem powierzchniowym i krzywizną powierzchni międzyfazowej woda-powietrze ( $\psi$ ), równoważą działanie siły ciężkości ( $\phi$ ). Prędkość i przyspieszenie wody zawartej z kapilarach wynoszą wtedy wszędzie zero.



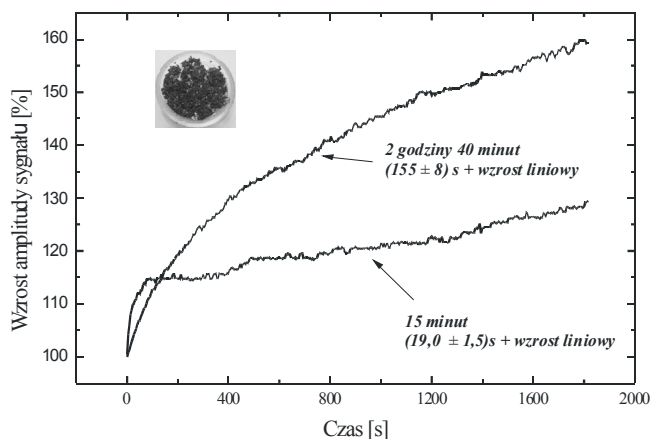
Rys. 1. Zmiana w czasie amplitudy sygnału fotoakustycznego próbek przedstawionych na fotografiach. Wartości pod fotografiami oznaczają czasy charakteryzujące wzrost sygnału, przy założeniu jego jedno-eksponencjalnego charakteru

Fig. 1. Change of photoacoustic signal amplitude in time for samples shown in photographs. Values under photographs indicate times that characterise signal increase, assuming its one-exponential character

Silna wiązka światła niemodulowanego padając na próbkę częściowo jest zamieniana na ciepło powodujące zarówno parowanie wody jak i nagrzewanie się gleby. Zjawisko wyparowywania wody z gleby zależy od bardzo wielu czynników. Jednym z najważniejszych regulatorów jest zdolność podsiąkania wody. Wraz ze wzrostem temperatury spada napięcie powierzchniowe, a wraz z nim wysokość wznoszenia kapilarnego i prędkość wody w kapilarze.

Uzyskane przez nas zależności amplitudy sygnału fotoakustycznego od czasu z rysunku 1 udało się nam przybliżyć dość dobrze przy pomocy funkcji eksponencjalnych z jednym czasem charakterystycznym. W zależności od stopnia rozdrobnienia próbki otrzymaliśmy  $(704 \pm 7)$  s dla nierozdrobnionej próbki gleby oraz  $(307 \pm 11)$  s dla próbki rozkruszonej. Obie próbki były bogate w próchnicę, bardzo porowate, o dużej liczbie kapilar.

Inną sytuację mamy dla zależności amplitudy sygnału fotoakustycznego od czasu przedstawionych na rysunku 2.



Rys. 2. Zmiana w czasie amplitudy sygnału fotoakustycznego próbki z fotografii. Zmiany amplitudy były badane po 15 minutach, oraz prawie trzech godzinach po podlaniu. Wartości oznaczają czasy charakteryzujące wzrost sygnału, przy założeniu jego jednoeksponencjalnego charakteru

Fig. 2. Change of photoacoustic signal amplitude in time for sample from photography. Amplitude changes were examined after 15 minutes, and almost three hours after watering. These values indicate times that characterise signal increase, assuming its one-exponential character.

Próbka gleby ze zdjęcia na tym rysunku została pobrana 15 minut po podlewaniu. Choć pobierana warstwa gleby nie przekraczała 2 mm woda grawitacyjna nie zakończyła jeszcze przesiąkania do głębszych warstw. Nie mamy w tym przypadku do czynienia ze stanem równowagi, lecz sytuacją dynamiczną, zmieniającą się z minuty na minutę. Dla takiej próbki funkcja opisująca zmiany amplitudy jest bardziej skomplikowana i składa się

z dwóch członów; wzrostu eksponencjalnego oraz liniowego. Próbka pobrana kilkanaście minut po podlaniu rośliny posiada czas charakterystyczny niewiele większy do stałej czasowej pomiaru, odpowiednio 19 i 10 sekund. Możemy, więc przyjąć, że mamy do czynienia w tym przypadku, prawie wyłącznie ze wzrostem liniowym sygnału. Sytuacja ulega zmianie, jeżeli zmierzmy sygnał takiej próbki po prawie trzech godzinach. Poza składową liniową zależności amplitudy sygnału fotoakustycznego od czasu obecna jest również składowa eksponencjalna. Czas ją charakteryzujący jest kilkanaście razy większy od stałej czasowej naszych pomiarów i wynosi  $(155 \pm 8)$  s.

## Podsumowanie

Spektroskopia fotoakustyczna powinna być pożyteczną techniką pomiarową dla badań dotyczących wierzchniej warstwy gleby. Pozwala na uzyskanie informacji o dynamice zmian parametrów termicznych gleby i pośrednio o dynamice ewaporacji wody do atmosfery. Dalsze badania przy użyciu tzw. otwartej komórki fotoakustycznej powinny pozwolić na rozseparowanie tych dwóch zjawisk. W ośrodku porowatym, jakim jest gleba bardzo trudno jest zmierzyć przewodnictwo cieplne a tym bardziej wyznaczyć przestrzennie-czasowy rozkład przewodnictwa. Spektroskopia fotoakustyczna pozwala na ciągły monitoring zachodzących zmian.

Uzyskane przez nas zależności przypominają kształtem zależności opisujące odpływ wody z gleby oparte na modelu van Genuchtena [van Genuchten 1978] uzyskane przez Koola i innych [Kool i in. 1985]. Ich zależności dotyczą innej skali czasowej, są opisane innymi funkcjami, ale podobieństwo ich kształtów jest zastanawiające.

## Bibliografia

- Kool J.B., Parker J.C., van Genuchten M. Th.** 1985. Determining Soil Hydraulic Properties from One-step Outflow Experiments by Parameter Estimation: I. Theory and Numerical Studies. Soil Science Society of America Journal. (49). s. 1348-1354.
- Malkin S., Canaani O.** 1994. The use and characteristics of the photoacoustic method in the study of photosynthesis, Annual Review of Plant Molecular Biology. (45). s. 493-526.
- Rosencwaig A.** 1978. Photoacoustic Spectroscopy. Advances in Electronics and Electron Physics (46). s. 207-311.
- Szurkowski J.** 2004. Wpływ stopnia zanieczyszczenia środowiska na sygnał fotoakustyczny roślin. Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego. Gdańsk. ISBN 83-7326-263-6.
- Tam A.C.** 1986. Applications of photoacoustic sensing techniques, Reviews of *Modern Physics*. (58). s. 381-431.
- van Genuchten M. Th.** 1978. Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-forms analytical model. Res. Rep. 78-WR-08, Dep. Of Civil Engineering, Princeton University. Princeton. NJ.
- Żurawska A., Szurkowski J.** 2006. Wykorzystanie metody spektroskopii fotoakustycznej do badania starzenia materiałów elektroizolacyjnych. Prace Naukowe Instytutu Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Nr 18 (44). s. 195-199.

## **AN ATTEMPT TO EVALUATE DYNAMICS OF WATER RELEASE FROM SOIL USING PHOTOACOUSTIC SPECTROSCOPY**

**Abstract.** In presented paper we have attempted to use photoacoustic spectroscopy to assess soil evaporation rate. We used equipment with two light beams in the measurements. One of the beams was illuminating soil samples with strong stream of non-modulated light and the second beam, with over one hundred times lower intensity, was monitoring changes proceeding in the tested samples. Obtained results indicate possibility to use photoacoustic spectroscopy not only for assessing soil evaporation rate, but also for measurements of changes in thermal parameters of its top layers.

**Key words:** photoacoustic spectroscopy, evaporation, soil heat diffusion coefficient

**Adres do korespondencji:**

Aleksandra Żurawska, e-mail: a.zurawska@po.opole.pl  
Katedra Fizyki  
Politechnika Opolska  
ul. Ozimska 75  
45-370 Opole