

## Nowa metoda pomiaru wilgotności gleby z wykorzystaniem neutronów kosmogenicznych

Marek Zreda<sup>1</sup>, Jerzy Nitychoruk<sup>2</sup>, Marta Chodyka<sup>3</sup>,  
Katarzyna Świerczewska-Pietras<sup>4</sup>, Łukasz Zbucki<sup>4</sup>



M. Zreda



J. Nitychoruk



M. Chodyka

K. Świerczewska-  
-Pietras

Ł. Zbucki

**New method for measuring soil moisture using cosmogenic neutrons.** *Prz. Geol.*, 63: 239–246.

*Abstract.* Taking advantage of the relation between the intensity of cosmic-ray neutrons measured in air above land surface and soil moisture, a new method was developed for measuring soil moisture at the scale of tens of hectares. The American-based project COSMOS produced and installed sensors to measure soil moisture and used them to monitor soil moisture across the USA. Sensors have also been installed in Europe, including Poland. The purpose of this paper is to bring this new method to the Polish readers and to prepare the foundation for a fast introduction of this new technology to monitoring environmental moisture in Poland and adjacent areas.

**Keywords:** soil moisture, cosmic-ray neutrons, measuring method

Gleby występujące na granicy atmosfery i powierzchni ziemi są środowiskiem, w którym gromadzi się wilgoć wpływająca na bilans biomasy i energii wymienianej pomiędzy powierzchnią ziemi i atmosferą. Mają one ogromny wpływ na wiele biologicznych i fizycznych procesów, takich jak: odpływ powierzchniowy, infiltracja, parowanie, transpiracja, wegetacja roślin, a także na pogodę i klimat. Stworzono wiele metod punktowego pomiaru wilgotności gleby, które jednak są mało reprezentatywne dla otoczenia punktu pomiarowego, z powodu przestrzennych różnic w wilgotności gleby wynikających z jej niejednorodności (ryc. 1). Pomiary punktowe mogą być wykorzystane do uśrednionej oceny wilgotności gleby, jeżeli zebrano wystarczającą liczbę punktów, żeby uzyskać pożądaną dokładność. Np. dla pomierzonego rozkładu wilgotności gleby widocznego na rycinie 1, potrzeba więcej niż 40 punktów pomiarowych, żeby uzyskać dokładność do trzech punktów procentowych (niebieskie linie na ryc. 1). Nowe czujniki mierzące promieniowanie kosmiczne w celu określenia wilgotności gleby badają obszar w promieniu ok. 300 m (Desilets & Zreda, 2013), zastępując tym samym sieć kilkudziesięciu punktów pomiarowych niezbędnych do uzyskania wiarygodnego pomiaru średniej wilgotności gleby na takim samym obszarze.

Promieniowanie kosmiczne zostało odkryte przez Wiktora Hessa (1912), za co otrzymał on Nagrodę Nobla w

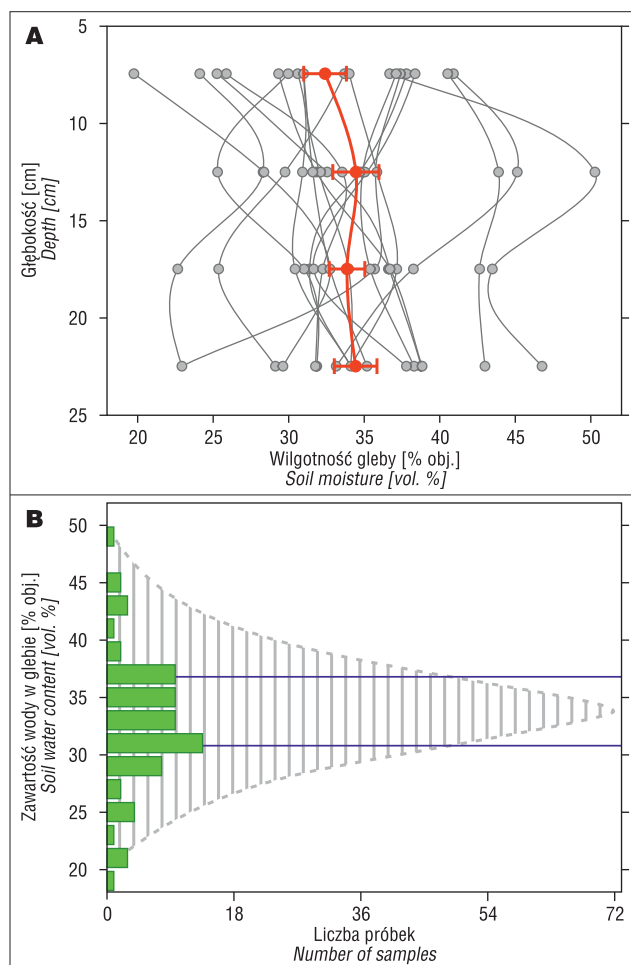
dziedzinie fizyki w 1936 r. (Carlson, 2012). Eksperymentując z elektroskopem umieszczonym w balonie, Hess odkrył, że intensywność jonizacji promieniotwórczej wzrasta wraz z wysokością nad powierzchnią Ziemi, co oznacza, że źródło tego promieniowania jest poza Ziemią, a nie w niej, jak wcześniej sądzono. To promieniowanie Robert Millikan nazwał w latach 20. XX w. „promieniowaniem kosmicznym”. Nasilone badania w następnych kilku dekadach wykazały, że intensywność niskoenergetycznych neutronów promieniowania kosmicznego zależy głównie od zawartości wodoru w środowisku (np. Fermi, 1938; Bethe i in., 1940). Hendrick & Edge (1966) wykonali pomiary, które wykazały, że intensywność „szybkich” neutronów nad powierzchnią ziemi zależy od zawartości wilgoci w glebie, co dla fizyków badających wysokoenergetyczne neutrony kosmiczne było zakłóceniem pomiaru, ale przez hydrologów zostało wykorzystane do pomiaru wilgoci zawartej w glebie. Hydrologowie postanowili zmierzyć wodę zawartą w pokrywie śnieżnej (Kodama i in., 1979) i wilgotność gleby (Kodama i in., 1985) za pomocą detektorów neutronów promieniowania kosmicznego zakopanych w ziemi i śniegu, które pozwalają na pomiar punktowy. Umieszczenie czujników ponad powierzchnią ziemi umożliwiło pomiar średniej wilgotności gleby (Zreda i in., 2008) oraz wody zawartej w śniegu (Desilets & Zreda, 2010) na obszarze o średnicy ok. 600 m (Desilets & Zreda,

<sup>1</sup> Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.

<sup>2</sup> Zakład Geologii, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; e-mail: jerzy.nitychoruk@pswbp.pl.

<sup>3</sup> Zakład Informatyki, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska.

<sup>4</sup> Zakład Gospodarki Przestrzennej, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska.



**Ryc. 1. A** – zmiany wilgotności gleby w polu  $400 \times 400$  m w stanie Iowa, USA (osiemdziesiąt cztery punkty – szare kropki połączone liniami – ich wartości uśredniono, w celu uzyskania reprezentatywnego obrazu wody w glebie – czerwone punkty połączone liniami). **B** – średni rozkład natężenia wilgotności gleby, jako funkcja liczby punktów pomiaru użytych do uśrednienia. Linie niebieskie wskazują na trzy procentowe odchylenie od wielkości średniej (potrzeba 48 pomiarów punktowych do uzyskania średniej wilgotności gleby, pozostającej w obrębie trzyprocentowego odchylenia od założonej „prawdziwej” wilgotności opartej na 72 próbkach)

**Fig. 1. A** – variations in soil moisture profiles in a  $400 \times 400$  m field in Iowa. Eighty four-point profiles (gray symbols connected by lines) were averaged to give the representative profile (red symbols connected by line). **B** – spread of average soil moisture values as a function of the number of point measurements used in averaging. Blue lines indicate a three percent deviation from the mean; 48 point measurements are needed for the average to always remain within three percent from the “true” mean based on all 72 samples

2013), co stanowi znaczący postęp. Metoda, w której używa się czujników umieszczonych nad powierzchnią ziemi, jest opisana w tym artykule.

## NEUTRONY KOSMOGENICZNE I ICH INTERAKCJE Z WODOREM

Pierwotne promieniowanie kosmiczne to głównie protony i cząsteczki alfa, które przez kolizje z atomami azotu i tlenu wytwarzają w atmosferze wysokoenergetyczne neutrony wtórne. Te z kolei tworzą jeszcze więcej cząstek, formując w ten sposób kaskadę nukleonów. Niektóre kolizje między neutronami wtórnymi a cząsteczkami w atmosf-

rze i w ziemi (gleba, woda, szata roślinna, itd.) prowadzą do powstania neutronów szybkich. Te neutrony są łatwo spowalniane przez atomy wodoru, co doprowadza do ich usunięcia z rezerwuaru neutronów w środowisku. Proces spowalniania neutronów zależy od trzech czynników:

- siły rozproszenia neutronów przez różne cząsteczki obecne w środowisku (wodór ma jeden z najwyższych współczynników rozproszenia);
- logarytmicznego ubytku energii podczas kolizji, który określa, jak skuteczna jest kolizja (wodór jest najbardziej skutecznym elementem kolizji);
- liczby atomów w pierwiastku na jednostkę masy materiału, która jest wprost proporcjonalna do stężenia pierwiastka w materiale i odwrotnie do liczby masowej (wodór stanowi dużą część wszystkich atomów w większości gleb).

Wodór posiada największą siłę hamowania i usuwania neutronów (Zreda i in., 2008, 2012), co stanowi podstawę pomiaru wilgotności gleby metodą neutronów kosmogenicznych.

Szybkie neutrony, które są wytwarzane w powietrzu i w glebie, przemieszczają się we wszystkich kierunkach, tworząc rezerwar neutronów, który jest dobrze wymieszany i w którym intensywność neutronów pozostaje w równowadze z koncentracją wodoru w glebie, a w mniejszym stopniu w innych przypowierzchniowych częściach środowiska naturalnego (powietrze, roślinność, skały, materia organiczna, itp.). Dodanie wody do gleby skutkuje większym wyhamowaniem neutronów, powodując zmniejszenie ich ilości nad powierzchnią gleby. Usunięcie wody z gleby ma efekt przeciwny. Przez pomiar natężenia szybkich neutronów w powietrzu, wilgotność gleby może być obliczona, np. wg wzoru (Desilets i in., 2010):

$$W = a_0 / (N/N_0 - a_1) - a_2$$

gdzie:

- $W$  – wilgoć mierzona w glebie, jako pochodna natężenia neutronów,
- $N$  – zmierzone natężeniem neutronów,
- $N_0$  – natężenie neutronów w powietrzu nad suchą glebą (jest to parametr kalibracji uzyskany z niezależnego pola danych wilgotności gleby),
- $a_0, a_1, a_2$  – stałe określające kształt funkcji kalibracji.

Modelowanie transportu neutronów wskazuje, że kształt funkcji kalibracji jest podobny dla różnych składów chemicznych gleby i jej tekstury (Zreda i in., 2008; Desilets i in., 2010), sugerując, że ta sama funkcja kalibracji może zostać użyta do przetworzenia zmian intensywności neutronów na zmiany wilgotności gleby.

Obszar pomiaru, określony jako teren wokół czujnika z  $86\% (1 - e^{-2})$  zliczonych neutronów, jest kołem o średnicy ok. 600 m na poziomie morza (Desilets & Zreda, 2013) i jest niemal niezależny od zawartości wilgotności gleby, ale zależny od ciśnienia atmosferycznego. Głębokość pomiaru, zdefiniowana jako warstwa gleby, z której pochodzi  $86\% (1 - e^{-2})$  zliczanych neutronów, jest silnie uzależniona od wilgotności gleby opartej na symulacjach transportu neutronów (Zreda i in., 2008). Teoretycznie, obniża się ona nieliniowo, z ok. 70 cm w bardzo suchych glebach (bez wodoru), do 12 cm w gruntach wilgotnych; praktyczny zasięg jest mniejszy – od ok. 40 cm w glebach suchych do 10 cm w nasyconych wodą. Głębokość pomiaru jest niez-

leżna od ciśnienia atmosferycznego. Poziomy ślad został potwierdzony przez pomiary w terenie, natomiast ślad pionowy nie został jeszcze potwierdzony empirycznie.

### SYSTEM OBSERWACJI WILGOTNOŚCI GLEBY ZA POMOCĄ NEUTRONÓW KOSMOGENICZNYCH (COSMOS)

Sieć COSMOS (*COsmic-ray Soil Moisture Observing System*), zainstalowana na terenie USA, jest w tej chwili wyposażona w 56 stacjonarnych czujników, z docelową ilością 500 czujników w przyszłości (patrz ryc. 2). Dodatkowe czujniki są w Kenii (2), Brazylii (1), Francji (1), Szwajcarii (1) i Polsce (1). Wszystkie są opisane na stronie internetowej [cosmos.hwr.arizona.edu](http://cosmos.hwr.arizona.edu), gdzie również znajdują się dane pomiarowe, dostępne dla każdego bez żadnych ograniczeń.

Każdy czujnik posiada dwa liczniki neutronów – licznik z osłoną polietylenową do pomiaru szybkich neutronów (o energii  $>10$  eV; eV = elektronowolt) oraz nieosłonięty licznik do pomiarów neutronów termicznych (o energii  $<0,025$  eV). Dane z licznika szybkich neutronów są wykorzystywane do pomiaru wilgotności gleby, podczas gdy dane z licznika neutronów termicznych mogą być przydatne do pomiaru ilości wody na powierzchni gruntu, w śniegu, w roślinach itp. Każdy licznik posiada własne wysokonapięciowe źródło zasilania i moduł impulsów do analizy sygnału generowanego przez instrument. Zasilanie jest uzupełniane przez akumulator podłączony do paneli słonecznych lub do innego źródła zasilania, jeśli jest to możliwe.

Dane są wysyłane w ustalonych przez użytkownika odstępach czasowych, przez modem satelitalny (używane są satelity sieci Iridium) do centralnego serwera systemu COSMOS, gdzie są przetwarzane i umieszczane na ogólnie dostępnej stronie w czasie rzeczywistym (<http://cosmos.hwr.arizona.edu/>). Dane te zawierają między innymi liczbę zmierzonych neutronów szybkich, liczbę neutronów termicznych, ciśnienie atmosferyczne, względną wilgotność i temperaturę wewnątrz urządzenia.

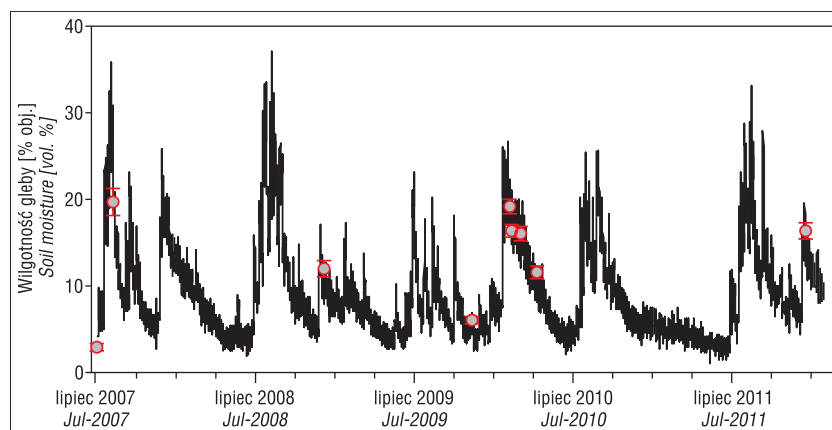
### CZUJNIK RUCHOMY – COSMOS ROVER

Ocena wahań wilgotności jest możliwa za pomocą systemu stacjonarnych czujników neutronów kosmogenicznych systemu COSMOS lub czujników ruchomych systemu COSMOS Rover. Dokładne pomiary wymagają bardzo dużej ilości obliczeń (Zreda i in., 2012), które w systemie stacjonarnym są osiągnięte przez wydłużony czas liczenia (przynajmniej 1 godz.). W systemie ruchomym dużą ilość obliczeń można osiągnąć przez użycie jednego dużego lub wielu mniejszych liczników, co jednak powoduje, że instrumenty pomiarowe stają się ciężkie i nieporęczne, a przez to muszą być instalowane na pojeździe. Pomiary mogą być wykonywane z pojazdu będącego w ruchu lub pozostającego w stanie spoczynku. Dla terenów, które są trudnodostępne dla pojazdów (lasy, stoki, itp.), wymagana jest mniejsza wersja, plecakowa, systemu COSMOS Rover.

W ciągu ostatnich trzech lat przeprowadzono kilkanaście badań z wykorzystaniem stacjonarnych czujników promieniowania kosmicznego, począwszy od doliny rzeki San Pedro, gdzie metoda została po raz pierwszy użyta i potwierdzona przez niezależne pomiary wilgotności (Zreda i in., 2008), przez różne badania pod kątem metodologii (Desilets i in., 2010; Desilets & Zreda, 2013; Franz i in., 2012a, b, 2013a, b; Rosolem i in., 2013; Shuttleworth i in., 2013), do zastosowań w hydrologii (Rivera Villarreyes i in., 2011; Bogena i in., 2013) i ekologii (Franz i in., 2013c). Pierwszy zestaw badań przy użyciu czujnika mobilnego przeprowadzono od wschodniego do zachodniego krańca wyspy Hawa'i, największej wyspy w archipelagu Hawajów (Desilets i in., 2010), ponadto dokonano badań wilgotności gleby w Oklahomie – dla porównania z pomiarami satelitalnymi systemu SMOS (opisane w tym artykule), w Basenie Tucson, w Arizonie – do obliczenia bilansu wodnego na przestrzeni roku (Chrisman & Zreda, 2013) i ponownie w Oklahomie – w celu wykazania, że kalibracja w terenie jest możliwa (Dong i in., 2014).



Ryc. 2. Umiejscowienie elementów projektu COSMOS na terenie USA, zainstalowanych do roku 2013  
Fig. 2. COSMOS sites in the U.S. that were installed as of 2013



**Ryc. 3.** Zmiany wilgotności gleby na podstawie pomiarów neutronów kosmogenicznych (linia) i próbek grawimetrycznych pobranych na obszarze mierzonym przez czujnik neutronów (kółka; każde kółko to średnia z kilkudziesięciu próbek gleby), San Pedro River Valley, Arizona. Średnia z ośmiu bezwzględnych różnic między tymi dwoma pomiarami wynosi 1,1% obj. (wg Zredy i in., 2012)

**Fig. 3.** Soil moisture from cosmic-ray neutron measurements (line) compared to that of gravimetric samples collected within the cosmic-ray footprint (circles; each circle is an average of several tens of soil samples), San Pedro River Valley, Arizona. The mean of eight absolute differences between the two is 1.1 percent by volume (after Zreda et al., 2012)

### DOLINA RZEKI SAN PEDRO, ARIZONA

Czujnik San Pedro działa stale od momentu instalacji w lipcu 2007 r. Nie wymagał on obsługi, oprócz wymiany baterii po czterech latach, co wskazuje na jego niezawodność w długoterminowym monitorowaniu intensywności neutronów. Na rycinie 3 zilustrowano zmiany wilgotności gleby obliczone ze znormalizowanej (Zreda i in., 2012) intensywności szybkich neutronów ( $N$  w równaniu 1). Wilgotność gleby, mierzona za pomocą czujnika neutronów w lecie 2010 r., waha się od 2% objętościowych (objętość wody podzielona przez objętość pobranej próby gleby  $\times 100$ ) w czasie letnich okresów suszy, do ponad 38% w okresach monsunu. Dwa wilgotne sezony są wyraźnie widoczne, jeden w czasie letnich monsunów, drugi w czasie zimowych opadów deszczu, oddzielonych od siebie dwoma okresami pory suchej, wiosną i jesienią. Trendy osuszeń, po tych dwóch sezonach, różnią się od siebie; wysychanie wiosenne jest wolniejsze niż jesienne, co jest spowodowane chłodniejszym klimatem i związanym z nim wolniejszym wiosennym parowaniem.

Zgodność pomiędzy wilgotnością gleby obliczoną z intensywności neutronów i średnią wilgotnością z wielu próbek gleby wysuszonych w piecu jest bardzo duża i nie zależy ani od wilgotności gleby, ani od tego, kiedy były pobrane próbki (ryc. 3). Średnia bezwzględnych różnic wynosi ok. 1% obj. Wynik ten wskazuje na długookresową stabilność czujników systemu COSMOS. Jednorazowo skalibrowany czujnik, przy konkretnej zawartości wilgoci, daje poprawne wartości wilgotności gleby w każdym przypadku przez kolejny czteroletni okres badań.

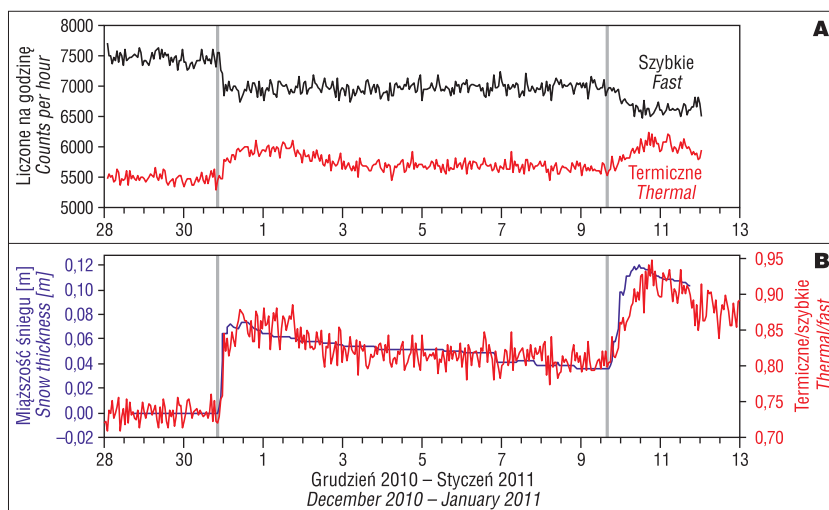
Na podstawie tego wyniku można oczekiwać długoterminowej niezawodności systemu.

### LAS EKSPERYMENTALNY MANITOU, COLORADO

W październiku 2009 r. czujnik systemu COSMOS został zainstalowany w lesie sosnowym w pobliżu Woodland Park w stanie Colorado. Ponieważ zmiany szybkich i termicznych neutronów odzwierciedlają zarówno wilgotność gleby, jak i obecność śniegu, skoncentrowano się na okresie zimowym 2010/2011, który charakteryzowały dwukrotne opady śniegu, zauważone w sygnale neutronów (ryc. 4)

Po opadach śniegu zauważalny jest gwałtowny spadek ilości szybkich neutronów, podczas gdy w tym samym czasie wzrosła intensywność neutronów termicznych, co sugeruje, że przy użyciu obu typów neutronów można odróżnić

śnieg od wody w glebie i być może obliczyć też ilość śniegu. Efekt wytapiania śniegu nie przekłada się na gwałtowne zmiany, tak jak jego akumulacja, ponieważ okres topnienia i sublimacji jest dłuższy i bardziej stopniowy. Zliczona ilość szybkich neutronów po opadzie śniegu pozostaje niemal bez zmian, podczas gdy ilość neutronów termicznych powoli maleje. Stosunek neutronów szybkich do termicznych jest dobrym wskaźnikiem pojawienia się pokrywy śnieżnej i koreluje się z jej głębokością mierzona za pomocą czujnika laserowego. Wykorzystanie niezależnych pomiarów ilości wody zawartej w śniegu pozwala na kalibrację czujników systemu COSMOS, przeznaczonych do jego pomiarów.



**Ryc. 4.** Rejestracja śniegu za pomocą czujników promieniowania kosmicznego. Pionowe linie wskazują początek dwóch nawałnic śnieżnych. Grubość pokrywy śnieżnej na dolnym panelu pochodzi z pomiarów laserowych (dzięki uprzejmości Dave'a Gochisa z NCAR)

**Fig. 4.** Snow detection with the cosmic-ray probe. Vertical bars indicate the onset of two snow events. Snow thickness in the bottom panel is from laser measurements (courtesy of Dave Gochis, NCAR)

## BADANIA NA HAWAJACH

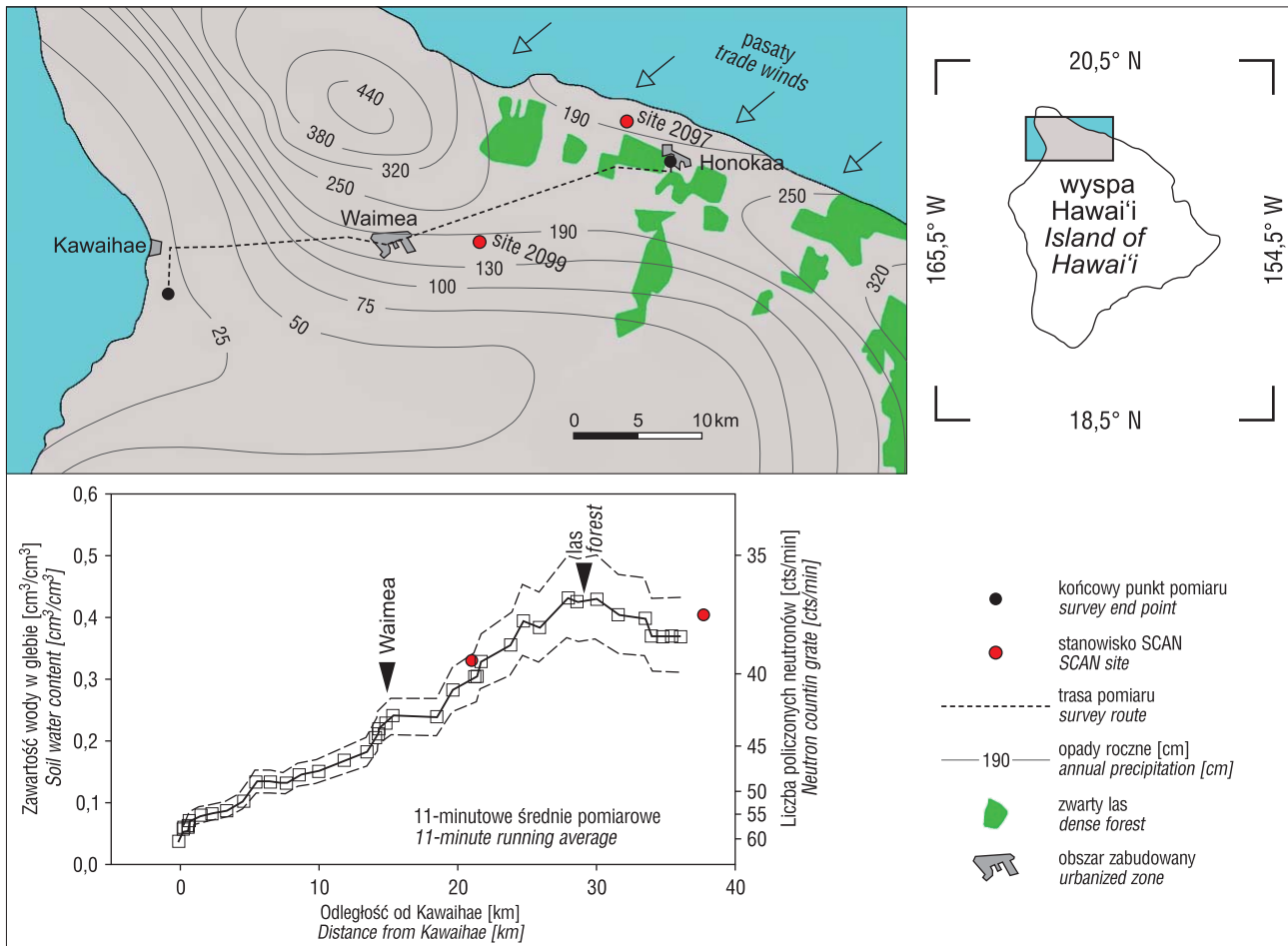
W styczniu 2010 r. przeprowadzono badania wzdłuż największej wyspy w archipelagu Hawajów, od wybrzeża wschodniego, gdzie wilgotne powietrze przynoszą passaty, poprzez przełęcz pomiędzy górami Mauna Kea i Kohala, aż po zachodnie, suche wybrzeże (Desilets i in., 2010). Dwa liczniki systemu COSMOS Rover umieszczono na pojeździe poruszającym się ze średnią prędkością 57 km/h na dystansie 37 km. Intensywność szybkich neutronów i ciśnienie atmosferyczne były mierzone w odstępach minutowych. Wyniki (ryc. 5) wskazują na dużą wilgotność gleby na wschodnim wybrzeżu i małą na zachodzie.

Wyniki te zgadzają się z sumą rocznych opadów waha-ających się od 2000 mm na wschodnim wybrzeżu do 250 mm na zachodnim. Wartości wilgotności gleby z pomiarów neutronów są również zgodne z dwoma pomiarami wilgotności gleby przy użyciu punktowych pomiarów, prowadzonych przez Sieci Analizy Gleby i Klimatu (*Soil and Climate Analysis Network, SCAN*). Wyniki tych badań pokazały, że ruchomy system pomiarów wilgotności gleby jest możliwy i zachęciły do prowadzenia dalszych badań, z których jedno opisano poniżej, a dalsze są opisane w innych pracach (Walker i in., 2012; McJannet i in., 2013; Chrisman & Zreda, 2013; Dong i in., 2014).

## OZNACZANIE WILGOTNOŚCI GLEBY NA OBSZARZE WIELKOŚCI PIXELA SMAP

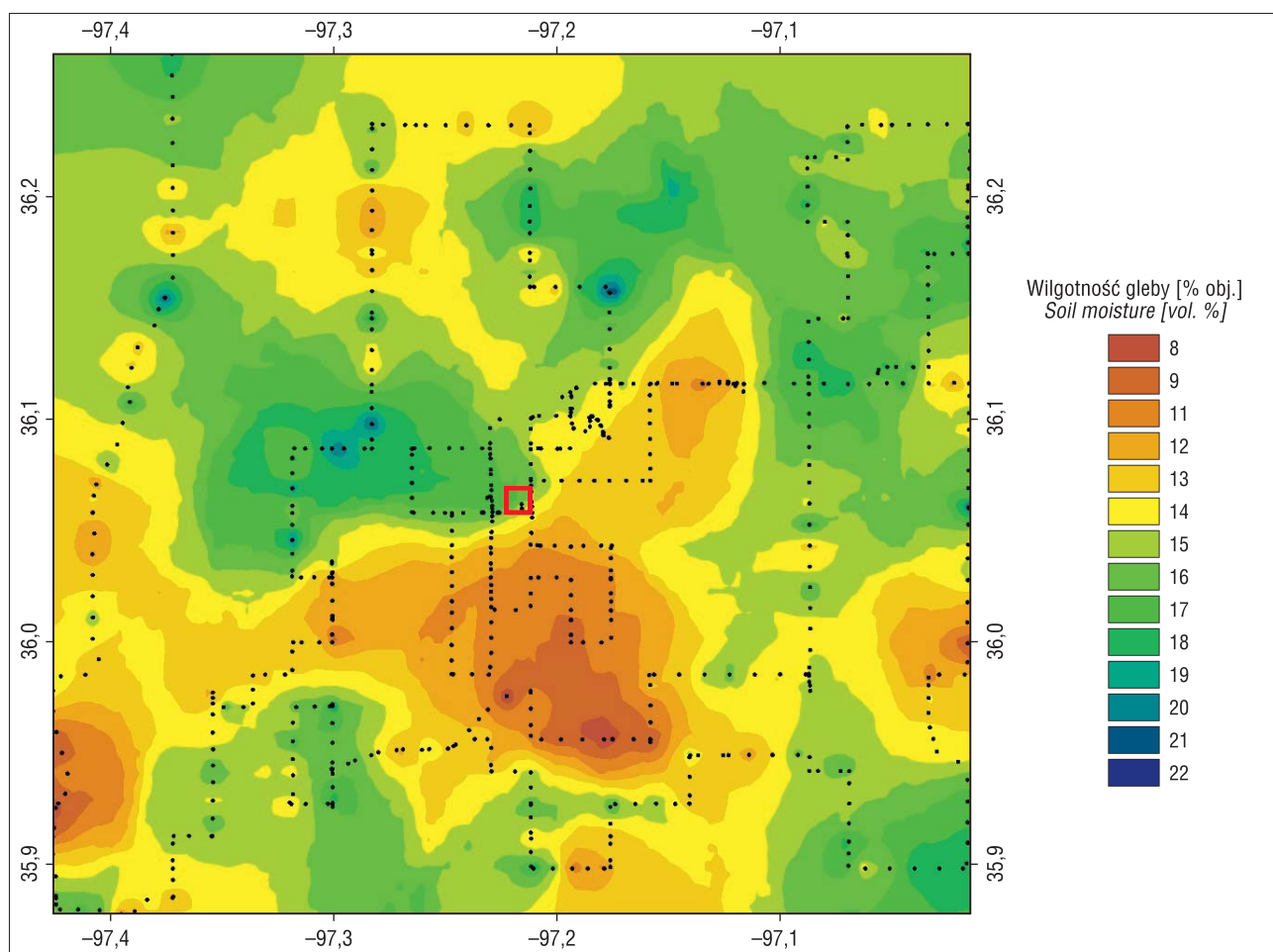
W trakcie przeprowadzonych badań satelitarnych SMAP automatycznie mierzono: czas, wysokość nad poziomem morza, długość i szerokość geograficzną, ciśnienie atmosferyczne oraz wilgotność powietrza. Intensywność neutronów była przeliczona na wilgotność gleby, przy użyciu przedstawionego wcześniej równania, po czym wartości te posłużyły do wykonania mapy wilgotności gleby, na której wartości wahały się od 6 do 24% objętościowych, a średnia wynosiła  $14,2 \pm 1,8\%$  (patrz ryc. 6).

Wyniki te sugerują, że system ruchomy COSMOS Rover może być wykorzystany do szybkiego mierzenia wilgotności gleby na dużych obszarach. Mapa wilgotności gleby na obszarze porównywalnym z obszarem objętym pikelem systemu SMOS (*Soil Moisture Ocean Salinity*, francuski/europejski satelita wykorzystujący pasywne promieniowanie mikrofalowe do pomiaru wilgotności gleby) została wykonana w ciągu jednego dnia. Szybsze przemieszczanie aparatury oraz mniejsza gęstość dróg mogłyby pozwolić na pomiar wilgotności na większych obszarach, oczywiście kosztem dokładności pomiarowej.



**Ryc. 5.** Zmiany wilgotności gleby na wyspie Hawajii od nawietrznej, wilgotnej strony wschodniej, przez przełęcz Muana Kea i Kohala do zachodniego suchego wybrzeża (Desilets i in., 2010). Wyniki wykazują jasny trend od gleb o niskiej wilgotności na zachodzie do bardzo wilgotnych gleb na wschodzie wyspy

**Fig. 5.** Measurements of soil moisture on the Island of Hawaii from the moist, windward eastern side, through the saddle between the Kohala and Mauna Kea mountains, to the dry, western coast (Desilets et al., 2010). The results show a clear trend from dry soils on the west to wet ones in the east side of the island



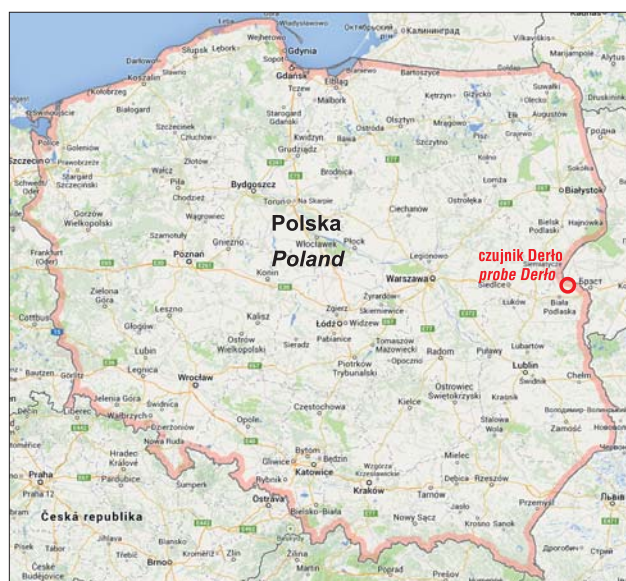
**Ryc. 6.** Wilgotność gleby na obszarze porównywalnym z obszarem pikselu SMAP ( $37 \times 42$  km) w stanie Oklahoma z pomiarów neutronów wykonanych systemem COSMOS Rover. Czarne kropki wyznaczają trasę pokonana samochodem z systemem COSMOS Rover. Czerwony kwadrat w środku mapy oznacza miejsce, gdzie jest zainstalowany stacjonarny czujnik COSMOS

**Fig. 6.** Soil moisture over an SMAP-sized area ( $37 \times 42$  km) in Oklahoma derived from cosmic-ray neutron measurements taken with the COSMOS rover. Black dots mark the route. The red square is the location of the stationary COSMOS probe

### CZUJNIK DERŁO NA POŁUDNIOWYM PODLASIU

15 kwietnia 2013 r. został zainstalowany pierwszy czujnik do pomiaru wilgotności gleby w Polsce (ryc. 7 i 8). Próbnik ulokowano w miejscowości Derło na południowym Podlasiu, 30 km na NE od Białej Podlaskiej. Został on skalibrowany przy użyciu 95 próbek gleby, dla których wykonano oznaczenie wilgotności metodą suszenia w piecu. Roczny cykl pomiarowy (ryc. 9) można ściśle korelować z obserwowanymi opadami deszczu i śniegu. Za pomocą tego czujnika bardzo dobrze zostały odwzorowane opady śniegu i zaleganie pokrywy śnieżnej w okresie zimy 2013/2014. Na wykresie wilgotności gleby z czujnika Derło, obecność śniegu pokrywa się z wartościami w ponad 45% (ryc. 9).

Obszar Polski wschodniej, położony w strefie wpływów klimatu kontynentalnego i morskiego jest szczególnie ciekawy do prowadzenia pomiarów wilgotności gleby. Po wstępnej serii pomiarowej, która zakończyła się sukcesem, przewiduje się rozszerzenie systemu czujników i objęcie nim większych obszarów kraju.

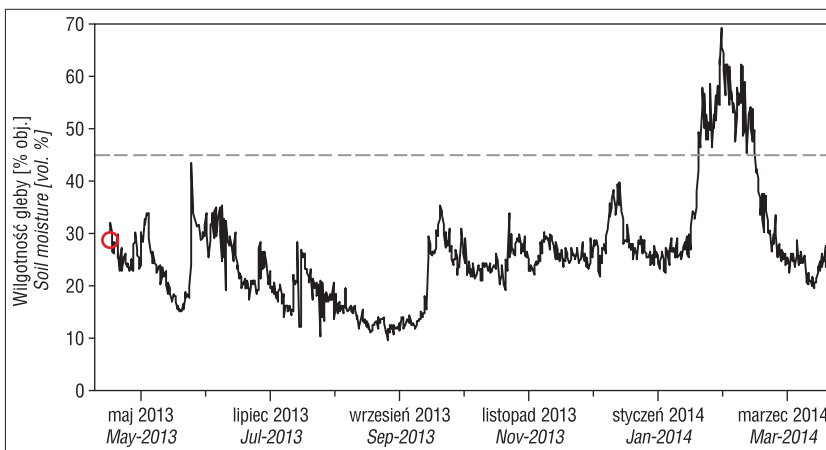


**Ryc. 7.** Lokalizacja czujnika Derło we wschodniej Polsce  
**Fig. 7.** Location of the probe Derło in eastern Poland



**Ryc. 8.** Czujnik Derło. Biała skrzynka po prawej stronie zawiera dwa liczniki neutronów, każdy z własnym modułem impulsów, rejestrator danych, modemem satelitarnym i akumulatorem (połączonym z panelem słonecznym, który jest na osobnym paliku po lewej stronie). Na pudle jest antena satelitarna (ścięty stożek z tyłu) i osłona mieszcząca czujniki temperatury i wilgotności względnej powietrza

**Fig. 8.** Probe Derło. The white box on the right side contains two neutron counters with a neutron pulse module each, a data logger, a satellite modem and a rechargeable battery (connected to a solar panel, on a separate pole on the left side). On the top of the box is a satellite antenna (truncated cone in the back) and a weather shield containing sensors measuring temperature and relative humidity of air



**Ryc. 9.** Średnie, 12-godzinne wartości wilgotności gleby, zmierzone przez czujnik Derło w okolicach Białej Podlaskiej od 04.2013 do 03.2014. Czerwone koło oznacza czas pobrania próbek do kalibracji. Linia przerywana (na 45%) oznacza porowatość gleby, wilgotność powyżej 45% oznacza obecność śniegu

**Fig. 9.** 12-hour moving average values of soil moisture at the COSMOS site Derło near Biała Podlaska, between April 2013 and March 2014. The red circle marks the date of calibration. The dashed line at 45% marks soil porosity; moisture in excess of 45% indicates the presence of snow on the ground

## WNIOSKI I PERSPEKTYWY

Metoda badania wilgotności gleby za pomocą neutronów kosmogenicznych posiada wiele użytecznych cech. Może ona być wykorzystywana przy różnorodnych glebach oraz na częściowo zabudowanych terenach miejskich. Wyniki pomiarów wilgotności gleby nie są uzależnione od jej składu, pomiary mogą być też dokonywane w gruncie kamienistym. Metoda jest nieinwazyjna i pozwala na powtarzające się w wybranym czasie pomiary bez naruszenia struktury gleby. Wyniki pomiarów są niezależne od

temperatury, zasolenia, składu chemicznego i mineralnego gleby. Czujnik typu COSMOS Rover, może być użyty do pomiarów w ruchu, na samochodzie, co pozwala na ocenę zmian wilgotności gleby na większym obszarze.

Zalety te umożliwią systemowi COSMOS pomiar wilgotności gleby w miejscach o różnym położeniu, morfologii i na dużym obszarze, co dotychczas było bardzo trudne lub niemożliwe. W obszarach pomiędzy stacjonarnymi czujnikami pomiary mogą być uzupełniane przez mobilne elementy systemu COSMOS Rover. Nowa metoda pomiaru wilgotności gleby daje szansę na podjęcie badań w wielu dziedzinach: meteorologii, klimatologii, hydrologii, ekologii, teledetekcji, rolnictwie i leśnictwie, co może się stać podstawą do rozwoju nowej dyscypliny naukowej – hydrometeorologii.

Rozbudowa systemu COSMOS w Polsce będzie pomocna dla badaczy atmosfery – konstruktorów map pogody, twórców koncepcji zmian klimatu; hydrometeorologów, którzy badają wpływ wilgotności (w tym wilgotności gleby) na zmiany w środowisku; ekologów – badających zmiany biomasy w wodzie i w glebie, które wpływają na poziom wchłaniania węgla, stres wodny roślin, oraz dostępność wody dla działalności człowieka; hydrologów – kontrolujących susze i ochronę przeciwpowodziową, przez szacowanie ewapotranspiracji, sezonowości właściwości hydraulicznych (hydrologicznych gleby). Również inni badacze gleby, agronomowie, inżynierowie od tworzenia wodnych struktur retencyjnych na terenach miejskich, geolodzy,

którzy przewidują zagrożenia osuwiskowe, będą mogli korzystać z sieci czujników.

Autorzy dziękują za wsparcie finansowe prac badawczych, które doprowadziły do powstania niniejszego artykułu, w ramach grantu wewnętrznego Państwowej Szkoły Wyższej im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, z wykorzystaniem sprzętu z Centrum Badawczego Eko-Agro-Tech tej Uczelni. Podziękowania składamy również Recenzentom za cenne uwagi krytyczne.

Prof. Marek Zreda wyraża wdzięczność za sponsorowanie badań przez *National Science Foundation USA*, grant numer 0838491.

## LITERATURA

- BETHE H.A., KORFF S.A. & PLACZEK G. 1940 – On the interpretation of neutron measurements in cosmic radiation. *Physic. Rev.*, 57: 573–587.
- BOGENA H.R., HUISMAN J.A., BAATZ R., FRANSSEN H.-J.H. & VEREECKEN H. 2013 – Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. *Water Resour. Res.*, 49: 5778–5791.
- CARLSON P. 2012 – A century of cosmic rays. *Physics Today*, 65: 30–36.
- CHRISMAN B. & ZREDA M. 2013 – Quantifying mesoscale soil moisture with the cosmic-ray rover. *Hydrol. and Earth System Sci.*, 17: 5097–5108.
- DESILETS D. & ZREDA M. 2013 – Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo simulations. *Water Resour. Res.*, 49: 3566–3575.
- DESILETS D., ZREDA M. & FERRE T. 2010 – Nature's neutron probe: Landsurface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resour. Res.*, 46: W11505.
- DONG J., OCHSNER T.E., ZREDA M., COSH M.H. & ZOU C.B. 2014 – Calibration and validation of the COSMOS rover for surface soil moisture measurement. *Vadoze Zone J.* (accepted Jan 2014).
- FERMI E. 1938 – Artificial radioactivity produced by neutron bombardment, Nobel Lectures, Physics 1922–1941, Amsterdam, Elsevier Publishing Company: 414–421.
- FRANZ T.E., ZREDA M., FERRE T.P.A., ROSOLEM R., ZWECK C., STILLMAN S., ZENG X. & SHUTTLEWORTH W.J. 2012a – Measurement depth of the cosmic-ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resour. Res.* 48: W08515.
- FRANZ T.E., ZREDA M., ROSOLEM R. & FERRE T.P.A. 2012b – Field validation of cosmic-ray soil moisture probe using a distributed sensor network. *Vadose Zone J.*, 11, doi: 10.2136/vzj2012.0046.
- FRANZ T.E., ZREDA M., ROSOLEM R. & FERRE T.P.A. 2013a – A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. *Hydrol. and Earth System Sci.*, 17: 453–460.
- FRANZ T.E., ZREDA M., FERRE T.P.A. & ROSOLEM R. 2013b – An assessment of the effect of horizontal soil moisture heterogeneity on the area-average measurement of cosmic-ray neutrons. *Water Resour. Res.*, 49: 1–9.
- FRANZ T.E., ZREDA M., ROSOLEM R., HORNBUCKLE B.K., IRVIN S.L., ADAMS H., KOLB T.E., ZWECK C. & SHUTTLEWORTH W.J. 2013c – Ecosystem-scale measurements of biomass water using cosmic ray neutrons. *Geophysic. Res. Lett.*, 40: 3929–3933.
- HENDRICK L.D. & EDGE R.D. 1966 – Cosmic-ray neutrons near the Earth. *Physic. Rev. Ser. II*, 145: 1023–1025.
- HESS V.F. 1912 – Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. *Physikal. Z.*, 13: 1084–1091.
- KODAMA M., KUDO S. & KOSUGE T. 1985 – Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement. *Soil Sci.*, 140: 237–242.
- KODAMA M., NAKAI K., KAWASAKI S. & WADA M. 1979 – Application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent. *J. Hydrometeorol.*, 41: 85–92.
- MCJANNET D., HAWDON A., ZREDA M., FRANZ T. & CHRISMAN B. 2013 – Soil moisture measurements at an intermediate scale using cosmic-ray neutrons: 2013 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Article number 2229, s. 4.
- RIVERA VILLARREYES C.A., BARONI G. & OSWALD S.E. 2011 – Integral quantification of seasonal soil moisture changes in farmland by cosmic-ray neutrons. *Hydrol. and Earth System Sci.*, 15: 3843–3859.
- ROSOLEM R., SHUTTLEWORTH W.J., ZREDA M., FRANZ T.E., ZENG X. & KURC S.A. 2013 – The effect of atmospheric water vapor on the cosmic-ray soil moisture signal. *J. Hydrometeorol.*, 14: 1659–1671.
- SHUTTLEWORTH J., ROSOLEM R., ZREDA M. & FRANZ T. 2013 – The COsmic-ray Soil Moisture Interaction Code (COSMIC) for use in data assimilation. *Hydrol. and Earth System Sci.*, 17: 3205–3217.
- WALKER J.P., DUMEDAH G., MONERRIS A., GAO Y., RUDIGER C., WU X., PANCIERA R., MERLIN O., PIPUNIC R., RYU D. & ZREDA M. 2012 – High resolution soil moisture mapping, in B. Minasny, B.P. Malone, A.B. McBratney, ed., *Digital Soil Assessments and Beyond: Proceedings of the 5th Global Workshop on Digital Soil Mapping 2012*, Sydney, Australia, CRC Press: 45–51.
- ZREDA M., DESILETS D., FERRÉ T. P. A. & SCOTT R. L. 2008 – Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmicray neutrons. *Geophysic. Res. Lett.*, 35: L21402.
- ZREDA M., SHUTTLEWORTH W.J., ZENG X., ZWECK C., DESILETS D., FRANZ T. & ROSOLEM R. 2012 – COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrol. and Earth System Sci.*, 16: 4079–4099.

Praca wpłynęła do redakcji 8.04.2014 r.  
Akceptowano do druku 3.03.2015 r.