

Wpłynęło 28.10.2011 r.
Zrecenzowano 17.01.2012 r.
Zaakceptowano 02.04.2012 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

TELEMTRYCZNY SYSTEM POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY, DZIAŁAJĄCY W TECHNICIE TDR

**Wojciech SKIERUCHA¹⁾ ADE, Cezary SŁAWIŃSKI¹⁾ BC,
Andrzej WILCZEK¹⁾ DF, Andrzej ŻYROMSKI²⁾ AF,
Małgorzata BINIAK-PIERÓG²⁾ BC**

¹⁾ Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN w Lublinie

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

Streszczenie

Naziemne pomiary wilgotności gleby są niezbędne do kalibracji i weryfikacji modeli wyznaczania wilgotności wierzchniej warstwy gleby za pomocą zdjęć satelitarnych. Analiza długoterminowej zmienności czasowo-przestrzennej wilgotności gleby może bowiem ujawnić trendy w obiegu wody, związane ze zmianami klimatu i zmianami pokrycia terenu roślinnością. Stacje monitoringu wilgotności gleby są nadal nieliczne, a istniejące systemy nie są ujednolicone pod względem technik pomiarowych, formatu danych, dostępu, itp. Nowo powstała instytucja o nazwie International Soil Moisture Network (ISMN) ma służyć jako scentralizowana baza danych, dostępnych użytkownikom oraz jako próba standaryzacji informacji, odnoszących się do wilgotności gleby. Za pomocą przeglądarki internetowej zapewnia ona globalny dostęp do wyników pomiaru wilgotności gleby z istniejących stacji pomiarowych i pomiarów walidacyjnych w formie znormalizowanych i zharmonizowanych zbiorów danych. Obecnie ISMN zawiera dane z 16 sieci i ponad 500 stacji zlokalizowanych w Ameryce Północnej, Europie, Azji i Australii, w tym 6 stacji pomiarowych, należących do Instytutu Agrofizyki PAN (IA PAN) w Lublinie. Baza danych ciągle jest poszerzana, zarówno w odniesieniu do liczby stacji pomiarowych, jak i okresów pomiaru. Wkrótce ISMN stanie się ważnym źródłem informacji do weryfikacji modeli klimatycznych i zwiększenia dokładności satelitarnych pomiarów wilgotności gleby.

Praca przedstawia podstawowe elementy systemu ISMN oraz sieci monitoringu wilgotności gleby, opracowanej i wdrożonej przez IA PAN w Lublinie oraz działającej również na polkach doświadczalnych Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Użytkownicy systemu z IA PAN mogą udostępniać swoje dane w ramach sieci ISMN oraz korzystać z dostępnych danych na zasadzie dobrowolności i bez ponoszenia żadnych kosztów.

Słowa kluczowe: monitoring, przenikalność elektryczna, technika TDR, wilgotność objętościowa gleby

Adres do korespondencji: dr hab. W. Skierucha, prof. IA, Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie, ul. Doświadczalna 4, 20-280 Lublin; tel. +48 81 744-50-61 w. 125, e-mail: W.Skierucha@ipan.lublin.pl

WSTĘP

Większość parametrów fizykochemicznych gleby, będących wskaźnikami jej jakości z punktu widzenia wartości produkcyjnej i czystości środowiska przyrodniczego, jest zależna od jej wilgotności. Woda jest nie tylko elementem niezbędnym do przemian biologicznych, warunkujących rozwój fauny i flory, stanowi również środek transportu składników odżywczych i ciepła w glebie. Znajomość takich parametrów fizykochemicznych gleby, jak: wilgotność, zasolenie oraz temperatura umożliwi dokonanie analizy zasobów wodnych, zawartości składników odżywczych roślin i ich przemieszczania w profilu glebowym oraz ocenę pojemności cieplnej gleby. Dostosowanie parametrów gleby do potrzeb roślin na dużych obszarach rolniczych, nazywane rolnictwem precyzyjnym, wymaga optymalnego doboru powyższych parametrów oraz ich powiązania z odpowiednim dawkowaniem nawozów, w celu uzyskania efektów zarówno ekonomicznych, jak i ochrony środowiska przyrodniczego.

Woda zawarta w glebie, oprócz zasadniczego wpływu na wielkość produkcji rolniczej, jest ważnym elementem decydującym o pogodzie i klimacie. Dzieje się tak dlatego, że wilgotność gleby jest kluczową wielkością, kontrolującą wymianę wody i energii cieplnej między powierzchnią ziemi i atmosferą. Istnieje zatem bezpośrednie sprzężenie między wilgotnością gleby i wilgotnością względną powietrza atmosferycznego. Chociaż woda zawarta w glebie stanowi niewielką część bilansu wodnego kontynentów, ma ona duży wpływ na globalny cykl wodny. Zatem, aby zwiększyć precyzję przewidywania pogody oraz kataklizmów, związanych z jej nagłymi zmianami, należy gromadzić więcej danych na temat wilgotności gleby z pomiarów naziemnych i satelitarnych.

Monitoring wilgotności gleby staje się obecnie bardzo ważnym zagadnieniem w świetle zmniejszania się zasobów wodnych. W czasie, gdy coraz częściej mamy do czynienia z anomaliami pogodowymi, związanymi z nadmiarem wody albo jej długotrwałym brakiem, monitorowanie jej zawartości w wierzchnich warstwach gleby i profilu glebowym zaczyna odgrywać decydującą rolę, umożliwiającą modelowanie hydrologiczne i klimatyczne, weryfikację tych modeli oraz dostarczanie informacji potrzebnych do interpretacji zdjęć satelitarnych [BINIAK-PIERÓG i in. 2009; JANIK 2008; SENEVIRATNE i in. 2010; SŁAWIŃSKI i in. 2011]. Prognozowanie pogody oparte na podstawie takich parametrów atmosferycznych, jak ciśnienie, temperatura oraz wilgotność powietrza będzie bardziej dokładne, jeśli uwzględnione będą takie parametry związane z powierzchnią Ziemi, jak wilgotność w profilach glebowych oraz rozkład temperatury. Umożliwi to ocenę retencji wody i zgromadzonej w glebie energii cieplnej. Monitoring wilgotności gleby w powiązaniu z pomiarami meteorologicznymi (stacje agroklimatyczne), umożliwi także prognozowanie rozwoju niektórych chorób roślin [SENEVIRATNE i in. 2010].

Celem pracy jest przedstawienie aparatury do monitorowania wilgotności gleby *in situ* oraz systemu gromadzenia i dostępu do uzyskanych danych. Opisane roz-

wiązania aparaturowe i programowe zostały opracowane w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie i stanowią element międzynarodowego, globalnego systemu monitoringu wilgotności gleby.

PRZEGLĄD METOD POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY *IN SITU*

Monitoring temperatury gleby, jednego z jej ważniejszych parametrów fizycznych oprócz wilgotności (lub potencjału matrycowego), nie stanowi problemu technicznego, ponieważ dostępne są odpowiednie czujniki umożliwiające automatyczny pomiar. Monitoring wilgotności gleby stanowi natomiast duży problem, ponieważ niemożliwe jest dokonanie automatyzacji pomiaru bezpośredniego, tzn. używając metody suszarkowej. Należy zatem szukać wielkości, która w sposób pośredni i selektywny będzie określała zawartość wody w glebie, uwzględniając warunek automatyzacji pomiaru, którego spełnienie jest niezbędne w nowoczesnych systemach monitoringu. Taką wielkością jest względna przenikalność elektryczna gleby [ROBINSON i in. 2008; ROBOCK i in. 2000; SENEVIRATNE i in. 2010; WALKER i in. 2004]. Selektowność pomiaru wilgotności gleby przez pośredni pomiar jej przenikalności elektrycznej wynika z dużej różnicy wartości tej wielkości dla wody i fazy stałej gleby, odpowiednio 80 i 3–5.

Istnieje kilka technik pomiaru *in situ* wilgotności gleby, opartych na pośrednim pomiarze przenikalności elektrycznej gleby, z których najbardziej popularne są techniki wykorzystujące reflektometrię czasową (TDR – ang. „time domain reflectometry”) [ROBINSON i in. 2003; ROBINSON i in. 2008; SKIERUCHA, MALICKI 2004; TOPP 2003; TOPP, REYNOLDS 1998] lub pomiarze pojemności elektrycznej gleby [BOGENA i in. 2007; DEAN i in. 1987; ROBINSON i in. 2008; TOPP i in. 2003].

Czujniki TDR, które działają w wyższych częstotliwościach (ok. 1 GHz) niż czujniki pojemnościowe (poniżej 100 MHz), są znacznie bardziej precyzyjne niż czujniki pojemnościowe [ROBINSON i in. 2008], ponieważ nie są obciążone błędem, wynikającym z zasolenia gleby. Dzięki temu kalibracja odpowiednich czujników TDR dla gleb o podobnej teksturze jest jednakowa. Jednak, ze względu na niższe koszty czujników pojemnościowych niż czujników TDR, umożliwiają one budowanie gęściejszych sieci pomiarowych [BOGENA i in. 2007]. Biorąc pod uwagę silne przestrzenne zróżnicowanie wilgotności gleby, dla niektórych aplikacji może być korzystniejszy wybór nieco mniej dokładnych, ale tańszych czujników w celu zwiększenia przestrzennego rozkładu pobieranych próbek.

Popularne są również sondy neutronowe [HOLLINGER, ISARD 1994; ROBINSON i in. 2008]. Pomimo wysokiej dokładności pomiaru, nie są tak powszechnie używane, jak czujniki TDR i pojemnościowe, ze względu na ryzyko dla zdrowia związane z wykorzystywaniem pierwiastków promieniotwórczych jako źródła neutronów.

Inne pośrednie techniki pomiaru wilgotności gleby obejmują pomiary elektrycznej oporności, czujniki impulsów ciepła, czujniki optyczne i skanery promieniowania gamma [HILLEL 2004; ROBINSON i in. 2008; ROBOCK i in. 2000; VEREECKEN i in. 2008].

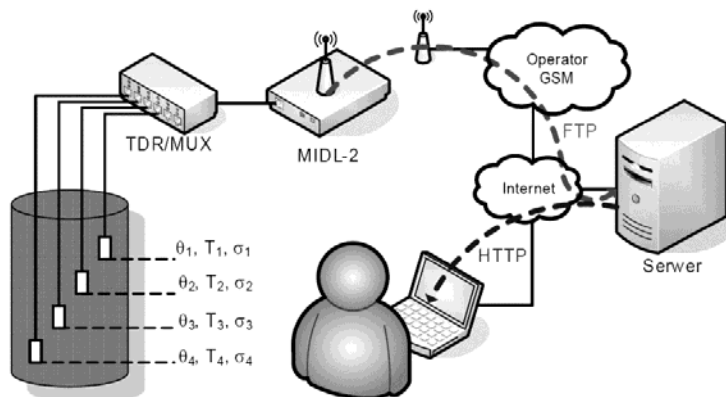
W niektórych sieciach monitoringu wilgotności gleby są stosowane tensjometry glebowe, ale konwersja potencjału matrycowego wody w glebie na jej wilgotność objętościową silnie zależy od tekstury gleby i tym samym jest związana z dość dużym błędem pomiaru, zwłaszcza w warunkach suchej gleby [GENUCHTEN VAN 1980; HILLEL 2004].

CHARAKTERYSTYKA TECHNICZNA I FUNKCJONALNA SYSTEMU MONITORINGU WILGOTNOŚCI GLEBY, OPRACOWANO W IA PAN

Prace nad rozwojem metod pomiarowych i aparatury, służących do monitorowania statusu wody w glebie, są prowadzone w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie od wielu lat. Ich efektem jest opracowanie metody reflektometrycznej (TDR) pomiaru wilgotności gleby oraz wdrożenie do produkcji odpowiedniej aparatury do pomiaru wilgotności objętościowej, elektrycznej konduktywności i temperatury gleby, wyznaczanych w tym samym czasie i z tej samej objętości gleby [MALICKI, SKIERUCHA 1989; SKIERUCHA i in. 2004; 2006; SKIERUCHA, MALICKI 2004]. Obecnie prace rozwojowe koncentrują się na ulepszaniu czujników do pomiaru takich wielkości nieelektrycznych, jak: wilgotność gleby, potencjał matrycowy wody w glebie, temperatura, aktywność wybranych jonów w glebie. Innym elementem prac rozwojowych jest wprowadzenie do istniejących systemów monitorujących bezprzewodowej komunikacji radiowej oraz sieci Internet.

Przykładem zastosowania powstałego systemu monitoringu jest wykorzystanie opracowanego w IA PAN modemu telefonii komórkowej typu MIDL-2 do przesyłania danych zmierzonych modułem reflektometrycznym TDR/MUX (rys. 1). Zestaw mierzy wilgotność gleby θ , temperaturę T i elektryczną konduktywność gleby (skorelowaną z jej zasoleniem σ , $S \cdot m^{-1}$), wykorzystując sondy pomiarowe umieszczone na różnych głębokościach w glebie. Zbierane wyniki pomiarów są gromadzone w pamięci modemu MIDL-2 i w zadanym czasie wysyłane sygnałem telefonii komórkowej (protokół GPRS) do serwera internetowego, zlokalizowanego w IA PAN w Lublinie. Dane na serwerze są dostępne dla użytkownika za pośrednictwem Internetu. Po zalogowaniu się w serwisie możliwe jest śledzenie wyników lub zmiana konfiguracji eksperymentu pomiarowego.

Do urządzenia MIDL-2 można dołączyć maksymalnie 16 przyrządów pomiarowych TDR/MUX (fot. 1a). Każdy z przyrządów pomiarowych TDR/MUX, do których dołączone są sondy reflektometryczne, ma uniwersalne złącze AUX, służące do dołączenia nowych sond pomiarowych, mierzących takie parametry fizyczne



Rys. 1. Schemat funkcjonalny systemu monitoringu wilgotności, temperatury i zasolenia gleby opracowanego w IA PAN w Lublinie; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Functional diagram of the soil moisture, temperature and salinity monitoring system developed in the IA PAN in Lublin; source: own elaboration



Fot. 1. Elementy składowe sieci monitoringu wilgotności, temperatury i zasolenia gleby, opracowane w IA PAN w Lublinie: a) MIDL-2 – modem komunikacyjny GPRS między stacją pomiarową i serwerem internetowym, TDR/MUX – ośmiokanałowy miernik TDR wilgotności, temperatury i zasolenia gleby; b) FOM/mts oraz FP/mts – jednokanałowy, ręczny miernik TDR oraz sonda do pomiaru wilgotności (techniką TDR), temperatury i zasolenia gleby (fot. W. Skierucha)

Photo 1. Elements of the monitoring network of soil moisture, temperature and salinity developed in the IA PAS in Lublin: a) MIDL-2 – GPRS modem for communication between the measuring station and internet server, TDR/MUX – eight-channel TDR soil moisture, temperature and salinity meter; b) FOM/mts and FP/mts – one-channel handheld TDR meter and the measuring probe of soil moisture (TDR technique), temperature and salinity (photo W. Skierucha)

i chemiczne środowiska przyrodniczego, jak: potencjał matrycowy wody w glebie, dodatkowe czujniki temperatury, deszczomierze, czujniki pH i in. Zestaw telemetryczny, składający się z modemu MIDL-2 i miernika TDR/MUX, 8 sond FP/mts oraz akumulatora zasilającego o pojemności 7Ah, jest umieszczany w obudowach

naziemnej lub podziemnej, w zależności od potrzeb użytkownika. Jednorazowe ładowanie akumulatora umożliwia pracę zestawu średnio przez rok, z założeniem dokonywania pomiarów i transmisji danych w okresach odpowiednio 1- i 12-godzinnych.

Systemy monitoringu, przedstawione na rysunku 1., służą do pomiarów stacjonarnych, które mogą być uzupełnione pomiarami tych samych wielkości fizycznych z użyciem ręcznych mierników FOM/mts (fot. 1b). Mierniki te są równoważne parametrami miernikom TDR/MUX i są zasilane akumulatorami. Mają pamięć ok. 1000 rekordów oraz możliwość wyświetlania reflektogramu z dołączonej sondy FP/mts; są także wyposażone w złącze USB do połączenia z komputerem PC, w celu kalibracji sond i eksportu zgromadzonych danych.

CHARAKTERYSTYKA MIĘDZYNARODOWEJ SIECI WILGOTNOŚCI GLEBY – ISMN

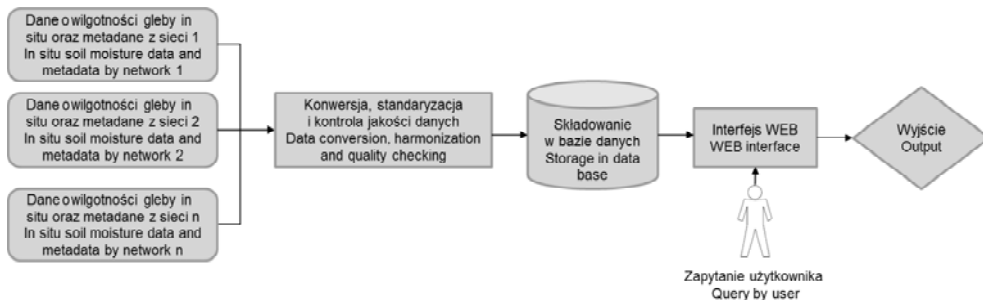
Brak ujednoczonego standardu rejestracji wilgotności gleby z istniejących sieci monitoringu oraz świadomość wagi tych informacji w obliczu deficytu wody, zmian klimatycznych, potrzeby prognozowania pogody w celu zminimalizowania skutków katastrof klimatycznych, kalibracji zdjęć satelitarnych, konwertujących uzyskiwane informacje na wartości wilgotności wierzchniej warstwy skorupy ziemskiej, spowodowały powstanie Międzynarodowej Sieci Wilgotności Gleby, ISMN – International Soil Moisture Network

System ISMN dostępu do danych z udostępnionych sieci monitoringu wilgotności gleby został tak skonstruowany, aby spełniał następujące wymagania [DORIGO i in. 2011]:

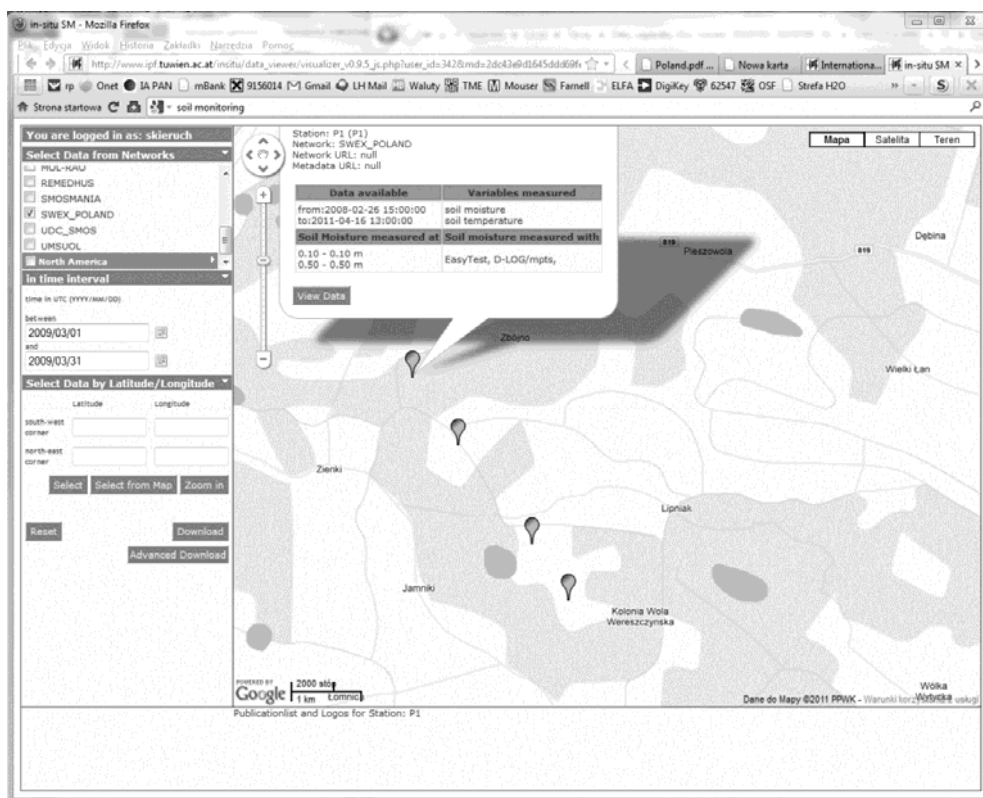
- możliwość udostępniania całości informacji, dotyczącej poszczególnych podsieci pomiarowych, poszczególnych stacji oraz stosowanych technik pomiarowych;
- łatwa dostępność do zgromadzonych danych;
- wszystkie modyfikacje dokonane na danych oryginalnych (dokonane w celu uzyskania jednorodności danych) powinny być jawne, aby umożliwić użytkownikowi powrót do danych źródłowych.

System ISMN jest nadzorowany przez Uniwersytet Techniczny w Wiedniu, gdzie zlokalizowane są jego podstawowe zasoby. Udostępnianie danych oraz dostęp do nich jest dobrowolny i bezpłatny pod adresem internetowym: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>. Schemat funkcjonalny podstawowych elementów systemu ISMN przedstawiono na rysunku 2.

Instytut Agrofizyki PAN w Lublinie udostępnił systemowi ISMN dane z wieloletnich pomiarów wilgotności, temperatury i zasolenia gleby z 6 stacji monitoringu zlokalizowanych na terenie Poleskiego Parku Narodowego (SWEX Poland). Na rysunku 3. przedstawiono okienko aplikacji internetowej, za pomocą którego możliwy jest dostęp do każdego rekordu danych.



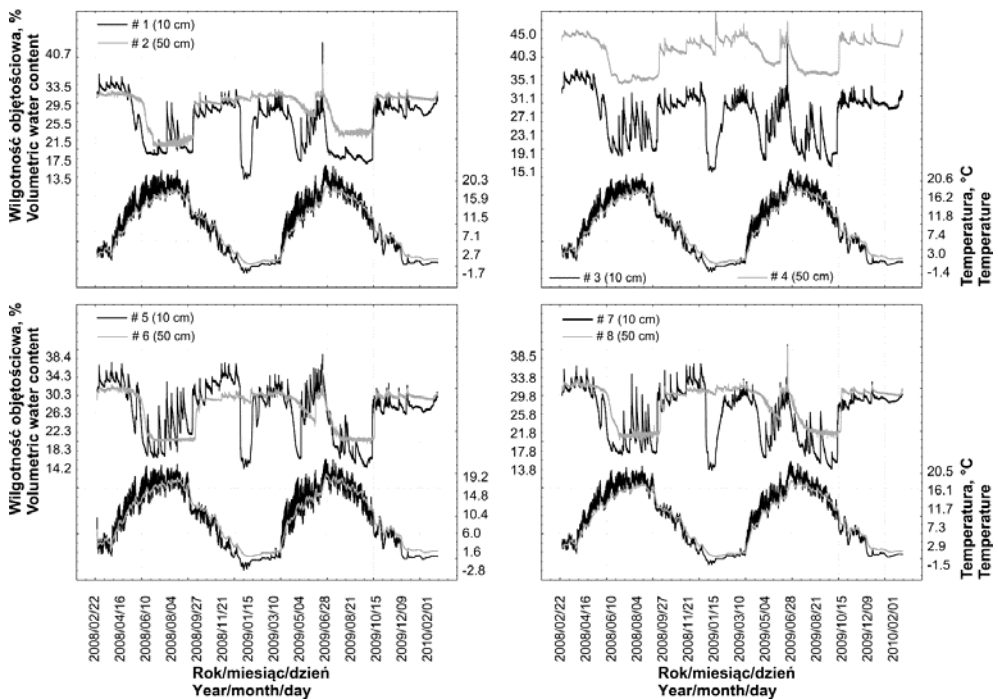
Rys. 2. Schemat funkcjonalny sieci ISMN; źródło: DORIGO i in. [2011]

Fig. 2. Functional diagram of the ISMN network; source: DORIGO *et al.* [2011]Rys. 3. Stacje pomiarowe nadzorowane przez IA PAN w Lublinie i zlokalizowane na terenie Poleskiego Parku Narodowego w aplikacji internetowej ISMN; źródło: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>Fig. 3. Monitoring stations supervised by the IA PAS in Lublin and localised in Poleski National Park in an internet application of the ISMN; source: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>

WYNIKI PRACY SYSTEMU MONITORINGU WILGOTNOŚCI GLEBY

Ze względu na charakter niniejszej pracy, której celem jest przedstawienie aparatury do pomiaru wilgotności gleby oraz systemu gromadzenia i dostępu do uzyskanych danych, podany opis wyników i dyskusję należy traktować jako przykładowe.

Na rysunku 4 przedstawiono zmienność czasową wilgotności i temperatury gleby w punkcie pomiarowym P4 (gleba – rędzina) w Poleskim Parku Narodowym. Sondy TDR zostały wbite poziomo w ściany wykopu o średnicy ok. 0,5 m, na głębokościach 0,1 m i 0,5 m.



Rys. 4. Zmienność czasowa wilgotności i temperatury gleby w lokalizacji P4 na Poleskim Parku Narodowym w okresie 03.2008–02.2010; źródło: opracowanie własne

Fig 4. Temporal variability of soil moisture and temperature in P4 localisation in Poleski National Park during the period 03.2008–02.2010; source: own elaboration

Bezpośrednio przed instalacją sond były one skalibrowane z użyciem wody i powietrza jako mediów kalibracyjnych [SKIERUCHA i in. 2008]. Symbole #1, #2, ..., #8 oznaczają numery sond, a indeksami nieparzystymi i parzystymi oznaczono odpowiednio sondy na głębokościach 0,1 m i 0,5 m. Widać, że mimo niewielkiej odległości między sondami, wartości wilgotności objętościowej i temperatury na

tej samej głębokości różnią się. Zmienność wartości obu badanych wielkości fizycznych jest większa na głębokości 0,1 m, gdzie wpływ opadów i temperatury otoczenia jest większy niż na głębokości 0,5 m. Temperatura gleby sporadycznie spadała poniżej 0°C, mimo występowania silnych mrozów, szczególnie na przełomie 2008/2009 r. Gwałtowny spadek wilgotności gleby zimą był spowodowany częściowym zamrażaniem wody w glebie. Względna przenikalność elektryczna dla lodu nie przekracza wartości 5, a dla wody w temperaturze ok. 0°C wynosi ok. 90, co jest przyczyną takich odczytów miernika TDR, wilgotności zmrożonej gleby. Zauważalne jest również opóźnienie w czasie zmian temperatury i wilgotności gleby na głębokości 0,5 m w stosunku do odpowiednich wartości na głębokości 0,1 m.

Wartości wielkości fizycznych (wilgotność, temperatura i zasolenie gleby), zmierzone miernikiem TDR, wymagają powiązania z odpowiednimi wartościami wielkości atmosferycznych (temperatury i wilgotności powietrza, wielkości opadów, ciśnienia barometrycznego), w celu wykorzystania w dalszych badaniach modelowych i prognozowaniu. Dlatego system ISMN umożliwia uzupełnianie danych o wilgotności gleby w wybranych lokalizacjach o inne parametry fizyczne (tzw. metadane).

Na terenie kraju jest zainstalowanych kilka stacji monitoringu zbudowanych na bazie rozwiązań z IA PAN, między innymi na terenie Obserwatorium Agro- i Hydrometeorologii Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław–Swojec [BINIAK-PIERÓG i in. 2009].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zawartość wody w górnej warstwie gleby jest ważnym parametrem dla meteorologicznych metod pogodowych i oceny bilansu wodnego w skali globalnej. Dane, dotyczące wilgotności gleby, uzyskane z naziemnych stacji monitoringu, mogą być wykorzystane nie tylko do bieżącego prognozowania warunków atmosferycznych, ale również do kalibracji i walidacji odpowiednich modeli fizycznych, powstałych na bazie zdjęć satelitarnych. Wskazane jest zwiększenie liczby stacji monitoringu wilgotności gleby, np. przez wyposażenie istniejących stacji meteorologicznych w odpowiednie urządzenia pomiarowe i udostępnienie uzyskanych danych w sposób podobny do działania sieci ISMN.

LITERATURA

- BINIAK-PIERÓG M., MACHOWCZYK A., SZULCZEWSKI W., ŻYROMSKI A. 2009. Weryfikacja modelu przepływu wody w strefie aeracji w latach 2004-2007 na podstawie badań terenowych. *Acta Agrophysica*. Vol. 13 s. 19–28.
- BOGENA H.R., HUISMAN J.A., OBERDÖRSTER C., VERECKEN H. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *Journal of Hydrology*. Vol. 344 s. 32–42.

- DEAN T.J., BELL J.P., BATY A.J.B. 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. *Journal of Hydrology*. Vol. 93 s. 67–78.
- DORIGO W.A., WAGNER W., HOHENSINN R., HAHN S., PAULIK C., DRUSCH M., MEKLENBURG S., VAN OEVELEN P., ROBOCK A., JACKSON T. 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. Vol. 15 s. 1675–1698.
- GENUCHTEN VAN M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 44 s. 892–898.
- HILLEL D. 2004. *Introduction to environmental soil physics*. San Diego. Academic Press. ISBN 0-12-348655-6 ss. 494.
- HOLLINGER S.E., ISARD S.A. 1994. A soil moisture climatology of Illinois. *Journal of Climate*. Vol. 7 s. 822–833.
- ISMN 2011. International Soil Moisture Network [online]. [Dostęp 2011.01.04]. Dostępny w Internecie: <http://www.ipf.tuwien.ac.at/insitu>
- JANIK G. 2008. Spatial variability of soil moisture as information on variability of selected physical properties of soil. *International Agrophysics*. Vol. 22 s. 35–43.
- MALICKI M.A., SKIERUCHA W.M. 1989. A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300 ps rise-time needle pulse. *Irrigation Science*. Vol. 10 s. 153–163.
- ROBINSON D.A., CAMPBELL C.S., HOPMANS J.W., HORNBuckle B.K., JONES S.B. 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal*. Vol. 7 s. 358–389.
- ROBINSON D.A., JONES S.B., WRAITH J.M., OR D., FRIEDMAN S.P. 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*. Vol. 2 s. 444–475.
- ROBOCK A., VINNIKOV K.Y., SRINIVASAN G., ENTIN J.K., HOLLINGER S.E. 2000. The global soil moisture data bank. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 81 s. 1281–1299.
- SENEVIRATNE S.I., CORTI T., DAVIN E.L., HIRSCHI M., JAEGER E.B. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*. Vol. 99 s. 125–161.
- SKIERUCHA W., MALICKI M.A. 2004. TDR method for the measurement of water content and salinity of porous media. Lublin, Institute of Agrophysics PAS ss. 151.
- SKIERUCHA W., WALCZAK R.T., WILCZEK A. 2004. *Monitoring systems for verification of mass and energy transport models in porous media*. Lublin. Institute of Agrophysics PAS. ISBN 83-87385-92-1 ss. 77.
- SKIERUCHA W., WILCZEK A., ALOKHINA O. 2008. Calibration of a TDR probe for low soil water content measurements. *Sensors and Actuators A: Physical*. Vol. 147 s. 544–552.
- SKIERUCHA W., WILCZEK A., WALCZAK R. T. 2006. Recent software improvements in moisture (TDR method), matric pressure, electrical conductivity and temperature meters of porous media. *International Agrophysics*. Vol. 20 s. 229–235.
- SŁAWIŃSKI C., WITKOWSKA-WALCZAK B., LIPIEC J., NOSALEWICZ A. 2011. Effect of aggregate size on water movement in soils. *International Agrophysics*. Vol. 25 s. 53–58.
- TOPP G.C. 2003. State of the art of measuring soil water content. *Hydrological Processes*. Vol. 17 s. 2993–2996.
- TOPP G.C., DAVIS J.L., ANNAN A.P. 2003. The Early Development of TDR for Soil Measurements. *Vadose Zone Journal*. Vol. 2 s. 492–499.
- TOPP G. C., REYNOLDS W. D. 1998. Time domain reflectometry: a seminal technique for measuring mass and energy in soil. *Soil and Tillage Research*. Vol. 47 s. 125–132.

- VERECKEN H., HUISMAN J.A., BOGENA H., VANDERBORGH J., VRUGT J.A. 2008. On the value of soil moisture measurements in vadose zone hydrology: A review. *Water Resources Research*. Vol. 44 W00D06 s. 1–21.
- WALKER J.P., WILLGOOSE G.R., KALMA J.D. 2004. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology*. Vol. 293 s. 85–99.

*Wojciech SKIERUCHA, Cezary SŁAWIŃSKI, Andrzej WILCZEK,
Andrzej ŻYROMSKI, Małgorzata BINIAK-PIERÓG*

TELEMETRIC SYSTEM FOR THE MEASUREMENT OF SOIL MOISTURE BASED ON THE TDR TECHNIQUE

Key words: *dielectric permittivity, monitoring, the Time Domain Reflectometry technique, volumetric soil water content*

S u m m a r y

Ground measurements of soil moisture are invaluable for calibration and verification of models determining the surface soil moisture from satellite images. Furthermore, the analysis of long-term time-spatial variation of soil moisture can reveal trends in the water cycle related to climate change and changes in land cover vegetation. Soil moisture monitoring stations are still scarce, and the existing systems are not standardized in terms of measurement techniques, data format, access, etc. The newly formed organization called the International Soil Moisture Network (ISMN) has to serve as a centralized database available to users as well as an attempt to standardize information relating to soil moisture. It provides global access using a web browser to soil moisture data from the existing stations and validation campaigns in the form of standardized and harmonized data sets available to users. ISMN currently contains data from 16 networks and more than 500 stations located throughout North America, Europe, Asia and Australia, including six stations that belong to the IA PAS in Lublin. The database is still growing, both in terms of the number of stations and measurement periods. In the near future ISMN will be an increasingly important source of information to verify and improve the accuracy of satellite measurements of soil moisture.

The paper presents the basic elements of the ISMN system and soil moisture monitoring network developed, implemented by the IA PAS in Lublin and operating also on experimental plots at the University of Life Sciences in Wrocław. Users of the system from IA PAS can share their data in the ISMN voluntarily and at no cost.