

Wykorzystanie rezonansu magnetycznego do oceny warunków hydrogeologicznych

Assessment of groundwater conditions with the use of magnetic resonance

Sebastian Buczyński¹, Tomasz Olichwer¹

Streszczenie: Badanie MRS (Magnetic Resonance Sounding) jest nieinwazyjną metodą geofizyczną wykorzystywaną od kilkunastu lat do badań hydrogeologicznych. Zweryfikowane dzięki odwiertom, badaniom laboratoryjnym próbek skał i próbnym pompowaniom wyniki sondowań MRS przeprowadzone na terenie Dolnego Śląska dowodzą, że metoda ta może być z powodzeniem stosowana do rozpoznania stref zawodnionych również na obszarze Polski. Na obszarach słabo rozpoznanych może poprzedzać wykonanie studni, ułatwiając tym samym prace projektowe, sporządzenie wiarygodnego kosztorysu prac lub bezinwazyjne i tanie wstępne rozpoznanie warunków hydrogeologicznych do głębokości 50-60 m p.p.t.

Abstract: Magnetic Resonance Sounding (MRS) is a non-invasive geophysical method used in hydrogeological studies for several years. The MRS result from Lower Silesia verified by drilling, laboratory testing of rock samples and pumping tests shows that this method can be successfully used to identify aquifers also on Polish territory. In poorly recognized areas may precede the drilling of the well, thereby facilitating the design works, preparation of a reliable cost estimate of the works or non-invasive and inexpensive preliminary recognition of hydrogeological conditions to a depth of 50-60 m.

Słowa kluczowe: geofizyka, rezonans magnetyczny, parametry hydrogeologiczne, skały porowate.

Key words: geophysics, magnetic resonance sounding (MRS), hydrogeological parameters, porous rocks.

WSTĘP

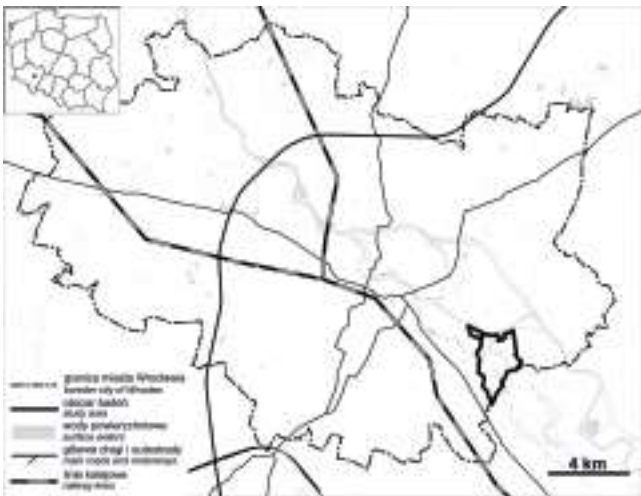
Technika MRS (Magnetic Resonance Sounding) została opracowana w byłym ZSRR na początku lat 80. XX w. W zachodniej Europie zaczęto ją stosować i rozwijać około 10-ciu lat później. Doświadczenia z ostatnich dwóch dekad badań MRS, dowiodły, że metoda ta może być wykorzystywana do wiarygodnego określenia warunków hydrogeologicznych zbiornika wód podziemnych z powierzchni terenu (Legchenko, Valla, 2002; Roy, Lubczyński, 2003; Lubczyński, Roy 2004; Legchenko i in., 2004). Wykazano przy tym, że MRS umożliwia rozpoznanie zawodnienia obszaru badań dostarczając wyniki zbliżone do rezultatów próbnych pompowań. W praktyce przekłada się to np. na szybkie wytypowanie optymalnych lokalizacji pod budowę ujęć wód podziemnych, rozpoznanie zawodnienia i współczynnika porowatości hałd górniczych, oszacowanie

współczynnika filtracji i przepuszczalność skał oraz głębokości zalegania zwierciadła wody, czy miąższości warstw wodonośnych. Pozyskanie tych danych jest również stosunkowo tanie, gdyż jako metoda nieinwazyjna MRS nie wymaga wykonywania odwiertów czy badań laboratoryjnych. Dodatkowo badania MRS mogą stanowić cenne uzupełnienie innych metod geofizycznych (np. profilowania elektromagnetycznego w wersji radiofalowej VLF, sondowań geoelektrycznych–elektrooporowych (SGE)) wspomagając interpretację i uszczegóławiając dane na temat warunków geologicznych występowania wód podziemnych.

CEL

Celem badań było rozpoznanie środowiska występowania wód podziemnych do głębokości 50 metrów przy użyciu metody rezonansu magnetycznego oraz porównanie uzyskanych rezultatów z wynikami wierceń i badań hydrogeologicznych wykonanych w tym samym rejonie. Przeprowadzone prace miały charakter pionierski, ponieważ

¹Institut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, Pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: sebastian.buczynski@uwr.edu.pl



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań.
Fig. 1. Location of study area.

były to pierwsze badania hydrogeologiczne ośrodka porowego wykonane przy użyciu tej metody w krajach Europy środkowowschodniej. Umożliwiły one oszacowanie rozbieżności uzyskanych wyników i ocenę wiarygodności metody MRS w warunkach spotykanych na terenie Polski. Pilotażowe badania przeprowadzono m.in. w SE części Wrocławia na terenach łąk wśród starorzeczy rzeki Oławy i Odry położonych na N od SUW Mokry Dwór (rys. 1).

METODYKA BADAŃ

Rezonans magnetyczny na potrzeby badania środowiska występowania wody podziemnej wzbudza protony wodoru zawarte w cząsteczce wody, które są aktywowane w celu zidentyfikowania i scharakteryzowania warstwy wodonośnej. Atomy wodoru cząsteczek wody znajdujące się w wolnych przestrzeniach skalnych są pobudzone przez prąd wysyłający impulsy o właściwej częstotliwości (około 2000 Hz) z pętli rozłożonej na powierzchni terenu, zasilanej przez akumulatory. Kształt pętli może być okrągły, kwadratowy lub w kształcie ósemki. Jej wielkość (50–150 m) zależy od docelowej głębokości sondowania i pozwala rozpoznać środowisko występowania wód podziemnych do głębokości 150 m.

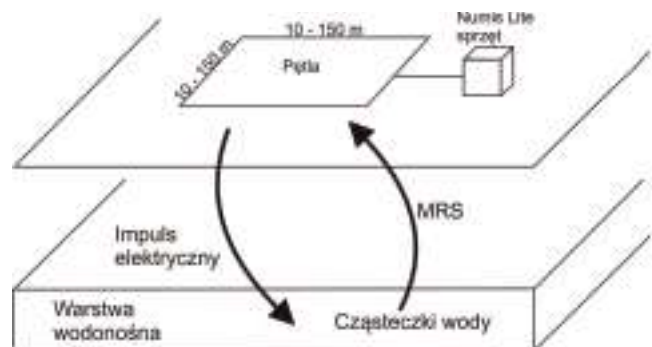
Rozdzielczość pionowa (dokładność otrzymywanych wyników) maleje wraz z głębokością. Na głębokościach większych niż około połowa rozmiaru pętli, charakterystyka warstwy wodonośnej powinna być poparta dodatkowymi informacjami, uzyskanymi z odwiertów lub innych typów badań geofizycznych (Roy, Lubczyński 2003; Leg-

chenko i in., 2002, 2004). Wzbudzone atomy wodoru wytwarzają pole magnetyczne, które jest z powrotem mierzone i analizowane dla różnych momentów wzbudzeń impulsów (iloczyn = czas trwania x intensywność). Impuls prądu o danej częstotliwości jest transmitowany do pętli. Następnie wytworzony przez protony wody zawartej w środowisku wodnym powracający sygnał jest mierzony w granicach tej samej pętli (rys. 2).

W interpretacji wyników należy uwzględnić trzy pola magnetyczne:

- pole magnetyczne Ziemi, którą określa precesja częstotliwości protonów wodoru: $f \text{ (Hz)} = 0,04258 B \text{ (nT)}$,
- pole magnetyczne pobudzenia wytworzone przez prąd przepływający do pętli leżącej na powierzchni gruntu (średnia powierzchnia sondowania 625–3600 m²),
- pole magnetyczne wytworzone jako sygnał powrotny od protonów wodoru po tym, jak zostały wzbudzone przez pole magnetyczne wytworzone w granicach pętli.

Parametrami bezpośrednio pochodzącymi z badań rezonansem magnetycznym są zawartość wody w badanych warstwach (θ MRS) oraz czasy relaksacji (T1 i T2) w zależności od głębokości sondowania (Legchenko i in., 2004; Lubczyński, Roy 2003, 2004). θ MRS jest stosunkiem objętości wody (wynik MRS) i całkowitej objętości badanej skały. Czasy T1 i T2 są związane z wymianą energii pomiędzy protonami wodoru i ich środowiskiem. Zarówno T1 i T2 informują o średniej wielkości porów, zawierających wodę (Legchenko i in., 2002). Czas T2 zależy od lokalnych niejednorodności pola magnetycznego (Legchenko, Valla 2002). Czas relaksacji T2 zależy od odległości pomiędzy cząsteczkami wody a ściankami porów, co nie oznacza, że dłuższy czas relaksacji (w milisekundach), przekłada się jedynie na większą odległość cząsteczki wody do ściany po-



Rys. 2. Schemat działania MRS.

Fig. 2. Principle of the magnetic resonance method.

rów Z drugiej strony bardzo krótki czas relaksacji odpowiada cząsteczce wody położonej blisko ziarna skalnego. W związku z tym, bardzo słaby sygnał jest rejestrowany w przypadku nieprzepuszczalnych formacji (Lubczyński, Roy 2004; Boucher i in., 2009). Czas relaksacji T1 nazywany czasem relaksacji podłużnej jest związany ze średnią wielkością porów w warstwie wodonośnej. Parametry θ_{MRS} i T1 są używane do oszacowania współczynnika filtracji (k) oraz przepuszczalności warstwy wodonośnej (T) (Legchenko i in., 2004; Lubczyński, Roy 2004). Współczynnik filtracji można oszacować jako $k_{MRS}(z) = C_p \omega(z) T12(z)$, gdzie ω i T1 są zawartością wody i czasem relaksacji pochodzącymi z pomiarów MRS. Dla piaszczystych warstw wodonośnych, a także dla warstw wodonośnych w zwietrzelinie oraz mocno spękanych skałach związanych współczynnik filtracji może być określony przy użyciu tej samej wartości empirycznej stałej $C_p = 7,0 \cdot 10^{-11}$, gdzie jednostki dla ω są w [%], a dla T1 w [msek] (Legchenko i in., 2004). Otrzymane w wyniku sondowań rezonansem magnetycznym parametry hydrogeologiczne mogą być skorelowane z charakterystykami warstw wodonośnych za pomocą procedury kalibracji, wykorzystującej, np. wyniki próbnych pompowań.

Reasumując interpretacja pomiarów MRS pozwala ocenić zawartość wody w skale, przepuszczalność ośrodka skalnego reprezentowaną przez współczynnik filtracji (k) oraz wodoprzewodność (T). Dodatkowo umożliwia rozpoznanie głębokości zalegania warstw zawodnionych i ich miąższości (Lubczyński, Roy, 2003, 2004, 2005; Vouillamoz i in., 2005). Parametry te są niezbędne do wytypowania miejsc najbardziej korzystnych dla gromadzenia i przepływu wód podziemnych.

Warunkami wymaganymi do poprawnego pomiaru MRS są przede wszystkim stabilne ziemskie pole magnetyczne o niskiej podatności magnetycznej oraz niski poziom szumów elektromagnetycznych. Najpoważniejszym ograniczeniem stosowania rezonansu magnetycznego jest wrażliwość systemu MRS na sztuczne i naturalne źródła szumów elektromagnetycznych, na przykład: linie energetyczne, działalność przemysłowa, domy, stacje GSM, pompy, zakopane rury, metalowe płoty, cykliczna aktywność słoneczna, deszcze i burze magnetyczne na słońcu (Roy, Lubczyński 2003). Istnieje możliwość redukcji tych szumów w wyniku użycia innego kształtu pętli niż kwadrato-

rozpoznania środowiska hydrogeologicznego (Trushkin i in., 1994).

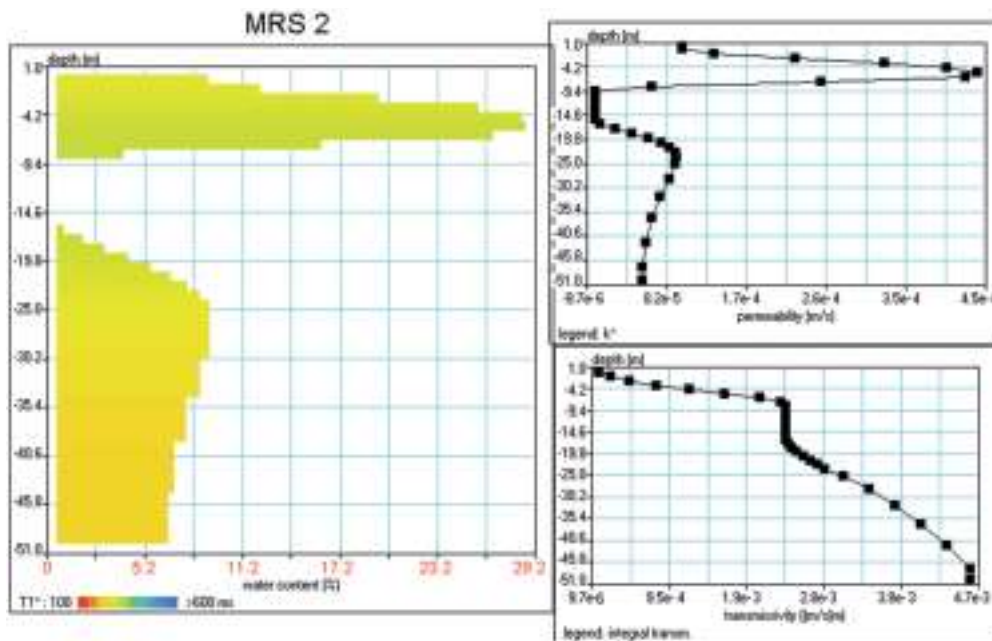
Główną zaletą badań MRS jest bezpośrednie, nieważne rozpoznanie warunków hydrogeologicznych, określenie objętości zgromadzonej wody w warstwie wodonośnej, wskazanie przedziałów głębokościowych występowania zasobnych źródeł wody podziemnej oraz oszacowanie przepuszczalności środowiska skalnego względem wody. Do podstawowych wad należy natomiast ograniczona głębokość rozpoznania środowiska występowania wody podziemnej (25–150 m), czułość sondowania na szumy elektromagnetyczne pochodzenia sztucznego i naturalnego oraz wielkość i ciężar sprzętu.

Pełniejszy opis techniki MRS i oznaczania parametrów hydrodynamicznych pochodzących z sondowania rezonansem magnetycznym podano w Legchenko, Valla (2002), Lubczyński (2003), Legchenko i in., (2004), Roy, Lubczyński, Roy (2004), Mohnke i Yaramanci (2008).

W przeprowadzonych badaniach autorzy artykułu użyli wersji komercyjnej techniki MRS zwanej NUMIS LITE francuskiej firmy Iris Instruments. Wersja NUMIS LITE jest przeznaczona do płytkich badań środowiska występowania wód podziemnych (głębokość penetracji około 50 m). Przyrząd NUMIS składa się z następujących jednostek osprzętu (rys. 3): przetwornica DC/DC z przyrządem strojenia używanego do programowania zmiennej ilości energii elektrycznej do produkcji prądu w pętli; jednostka główna MRS wykorzystywana zarówno do wzbudzenia prądu w pętli i akwizycji sygnału; kabla miedzianego używanego do rozkładu pętli prądowej (kwadrat o długości boku 60 m); akumulatorów używanych do zasilania systemu oraz laptopa z oprogramowaniem wykorzystywanym do ogólnej kontroli systemu, rejestrowania i przetwarzania danych. Do inwersji i interpretacji danych z sondowań MRS posłużono się programem 1D Samowar.



Rys. 3. Konfiguracja zestawu Numis Lite
Fig. 3. Numis Lite schematic diagram



Rys. 4. Przykładowe wyniki sondowania MRS z rejonu Mokrego Dworu
Fig. 4. Examples of the MRS results from Mokry Dwór region

Tabela 1. Wartości współczynnika filtracji i porowatości oraz zawartości wody uzyskane w trakcie badań MRS, laboratoryjnych i próbnego pompowania

Table 1. Hydraulic conductivity, porosity and water content of the aquifer obtained by MRS, laboratory and pumping test

Warstwa wodonośna	MRS		Badania laboratoryjne		Próbnego pompowanie
	k (m/s)	zawartość wody [%]	k [m/s]	n [%]	k [m/s]
1	$2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$	10–30	$2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$	25–38	$5 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4}$
2	$8 \cdot 10^{-5}$	7–9	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-6}$	~25	-

WYNIKI

W trakcie badań terenowych wykonano pomiary MRS o głębokości penetracji do 50 m. W obrazie sondowań widoczne jest występowanie dwóch stref o wysokiej zawartości wody oddzielonych od siebie kilkumetrową warstwą skał nieprzepuszczalnych (rys. 4). Wyniki wskazują na dobre zaopatrzenie strefy pierwszego od powierzchni terenu poziomu wodonośnego. Spąg pierwszej warstwy wodonośnej zalega na głębokości 9–10 m, a jej miąższość wynosi około 8–9 m. Warstwa ta posiada dobre parametry filtracyjne w granicach $2 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}$ m/s, a zawartość wody w skale wynosi 20–30 %. Drugi poziom wodonośny pojawia się na głębokości około 23–25 m i cechuje się gorszymi parametrami hydrogeologicznymi ($k = 8 \cdot 10^{-5}$ m/s) oraz niższą zawartością wody (7–9 %) w porównaniu do wyżej

ległej warstwy. Wyniki te wskazują, że głębsza warstwa wodonośna może być wykształca w postaci piasków drobnych lub nawet gliniastych o słabej przepuszczalności.

WNIOSKI

Otrzymane wyniki sondowań MRS (rys. 4, tab. 1) porównano z wynikami wierceń, badań laboratoryjnych wykonanych na próbkach skał pobranych w trakcie wierceń i próbnego pompowań przeprowadzonych w tym rejonie (Wojciechowska i in., 2015, Buczyński, Olichwer, 2016). Wiercenia wskazują, że pierwszą swobodną warstwą wodonośną nawiercono na głębokości 1,1 m. Warstwa ta zbudowana jest z luźnych skał osadowych wykształconych w postaci piasku od pylistego do grubego. W przelocie 6,7–7,7 m p.p.t. pojawia się pospółka natomiast poniżej wy-

stępuje glina. Wartość współczynnika filtracji dla pierwszego poziomu wodonośnego z wszystkich badań (tab. 1) oscylowała w zakresie wielkości 10^{-4} m/s, a współczynnik porowatości mieścił się w przedziale 25 – 38 %.

Głębsze wiercenia, zestawione w banku Hydro, wskazują, że druga strefa zawodnienia, nie utożsamiana w trakcie wierceń z poziomem wodonośnym, jest związana z piaskami pylastymi lub gliną piaszczystą. Z głębokości tych do tej pory nie pobierano prób skał w celu przeprowadzenia pomiarów porowatości, ani nie prowadzono próbnych pompowań, jednak wyniki badania parametrów piasków pylastych lub glin piaszczystych z innych obszarów (Morris, Johnson, 1967; Pazdro, Kozerski, 1990; Myślińska, 2010) są zbliżone do wyników z sondowania MRS i klasyfikują te skały jako słabo przepuszczalne. Istniejące różnice pomiędzy zawartością wody w skale z badań MRS, a współczynnikiem porowatości z badań laboratoryjnych są czymś naturalnym i wskazują, że ilość zawartej wody w skale (MRS) jest mniejsza od współczynnika porowatości.

Dodatkowo przeprowadzone przed rozpoczęciem sondowań MRS typowanie miejsc pod badania wykazało, że wielkość szumów elektromagnetycznych w wielu obszarach jest zbyt wysoka w stosunku do ilości wody zwartej w skale. W przypadku, gdy jakość otrzywanego sygnału nie spełniała 3 kryteriów, tzn.:

- krzywa sygnału MRS wyraźnie oddzielona od krzywej szumu,
- w odniesieniu do sygnału MRS krzywa szumu ma tendencję spadkową,
- maksymalna różnica między częstotściami mieściła się w granicach 1-2 Hz.

warunki pomiaru (zgodnie z metodyką) uniemożliwiały przeprowadzenie wiarygodnych badań, gdyż uzyskane wyniki byłyby obarczone dużym błędem. W takim przypadku wyniki pomiarów mogą ograniczać się jedynie do oszacowania głębokości i miąższości warstwy o największym zawodnieniu, bez dokładnej charakterystyki liczbowej.

Szczegółowe rezultaty badań MRS przeprowadzonych w innych rejonach Dolnego Śląska (w tym na obszarach zbudowanych ze skałach krystalicznych) wraz z omówieniem ograniczeń tej metody przedstawiono w artykule Buczyński i in. (2017).

BIBLIOGRAFIA

- BOUCHER M., FAVREAU G., VOUILLAMOZ J. M., NAZOU MOU Y., LEGCHENKO A. 2009 – Estimating specific yield and transmissivity with magnetic resonance sounding in an unconfined sandstone aquifer (Niger). *Hydrogeology Journal* 17: 1805–1815.
- BUCZYŃSKI S., OLIHWER T., 2016 – Dokumentacja geologiczna z wykonania otworów badawczych i piezometru w celu uszczegółowienia rozpoznania budowy geologicznej i poziomu wodonośnego w utworach czwartorzędowych na terenach wodonośnych Wrocławia, MPWiK, Wrocław.
- BUCZYŃSKI S., OLIHWER T., WCISŁO M., TARKA R., 2017 – The assessment of hydrogeological parameters of aquifer with the use of magnetic resonance in Lower Silesia (SW Poland). *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 12 (1): 121-130.
- LEGCHENKO A., BALTASSAT J.M., BEAUCE A., BERNARD J. 2002. Nuclear magnetic resonance as a geophysical tool for hydrogeologists. *J. Appl. Geophys.* 50: 21–46.
- LEGCHENKO A., BALTASSAT J.M., BOBACHEV A., MARTIN C., ROBAIN H., VOUILLAMOZ J.M., 2004 – Magnetic resonance sounding applied to aquifer characterization. *Groundwater* 42: 363–373.
- LEGCHENKO A., VALLA P., 2002 – A review of the basic principles for proton magnetic resonance sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics* 50: 3–19.
- LUBCZYŃSKI M.W., ROY J., 2003 – Hydrogeological interpretation and potential of the new magnetic resonance sounding (MRS) method. *Journal of Hydrology* 283: 19–40.
- LUBCZYŃSKI M.W., ROY J. 2004 – Magnetic Resonance Sounding: New method for ground water assessment, *Groundwater* 42 (2): 291–303.
- LUBCZYŃSKI M.W., ROY J., 2005 – MRS contribution to hydrogeological system parameterization. *Near Surface Geophysics* 3: 131–139.
- MOHNKE O., YARAMANCI U., 2008 – Pore size distributions and hydraulic conductivities of rocks derived from Magnetic Resonance Sounding relaxation data using multi-exponential decay time inversion *Journal of Applied Geophysics* 66: 73–81.
- MORRIS, D.A., JOHNSON, A.I., 1967 – Summary of

hydrologic and physical properties of rock and soil materials as analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey 1948-1960. USGS, Water Supply Paper.

MYŚLIŃSKA E., 2010 – Laboratoryjne badanie gruntów i gleb. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa.

PAZDRO, Z., KOZERSKI, B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.

ROY, J., LUBCZYŃSKI, M., 2003 – The magnetic resonance sounding technique and its use for groundwater investigations. *Hydrogeology Journal* 11: 455–465.

TRUSHKIN D.V., SHUSHAKOV O.A, LEGCHENKO A.V., 1994 – The potential of a noise-reducing anten-

na for surface NMR ground water surveys in the earth's magnetic fields. *Geophysical Prospecting* 42: 855-862.

WOJCIECHOWSKA R., GAWRON M., KRUZEL A., 2015 – Projekt robót geologicznych na ujęcie wód podziemnych z utworów triasu środkowego (wapienia muszlowego) na terenie MPWiK we Wrocławiu. Proxima, Wrocław.

VOUILLAMOZ J.M., DESCLOITRES M., TOE G., LEGCHENKO A. 2005 – Characterization of crystalline basement aquifers with MRS: comparison with boreholes and pumping tests data in Burkina Faso. *Near Surface Geophysics* 3: 107–111.