

**20 LAT METODY GEORADAROWEJ
W KATEDRZE GEOFIZYKI NA WYDZIALE GEOLOGII,
GEOFIZYKI I OCHRONY ŚRODOWISKA AGH
W ASPEKCIE REALIZOWANYCH W NIEJ
PRAC NAUKOWO-BADAWCZYCH**

**20 years of GPR method in the Department of Geophysics at Faculty
of Geology, Geophysics and Environmental Protection at University
of Science and Technology in the relation to its scientific activity**

Tomisław GOŁĘBIEWSKI

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Katedra Geofizyki;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: tomgoleb@agh.edu.pl*

Abstract: The paper presents 20 years history of development of GPR method in the Department of Geophysics at Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection at AGH University of Science and Technology starting from one-channel analog georadar up to multichannel digital device. In the chronology way there is described how the advancement of GPR devices influenced in to the level of scientific works. The paper presents a brief description of realized works and there are many citations which can help the reader to find particular information about results of carried out investigations.

Key words: GPR method, measurement devices

Słowa kluczowe: Metoda georadarowa, aparatura pomiarowa

WSTĘP

Obchody jubileuszu 90-lecia istnienia Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, zbiegły się w czasie z przejściem na emeryturę prof. dr hab. inż. Henryka Marcaka, pod kierownictwem którego rozwijała się w Pracowni Geofizyki Górniczej, w Katedrze Geofizyki, na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej metoda georadarowa. Dlatego też niniejszy artykuł jest podsumowaniem 20-letniej działalności naukowo-badawczej Pracowni w zakresie metody georadarowej.

Autor chciałby w tym miejscu podkreślić, że prace naukowo-badawcze związane z metodą georadarową realizowane są również w innych Pracowniach, Katedrach i Wydziałach AGH, lecz ze względu na ograniczony rozmiar artykułu przedstawiono w nim tylko najważ-

niejsze prace naukowo-badawcze Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH, tzn. rozprawy doktorskie, opracowania książkowe, granty naukowe oraz publikacje w renomowanych czasopismach i na międzynarodowych konferencjach geofizycznych.

Ze względu na przeglądowy charakter artykułu autor przyjął taki jego schemat, który w sposób chronologiczny przeprowadza czytelnika przez kolejne 20 lat rozwoju metody georadarowej w Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH, a na każdym etapie przedstawiono najważniejsze wyniki prac naukowo-badawczych, które udało się zrealizować dzięki odpowiednio rozbudowywanej i unowocześnianej aparaturze.

W końcowej części artykułu przedstawiono plany dalszego rozwoju Pracowni w zakresie metody georadarowej oraz zaprezentowano tematykę realizowanych obecnie prac naukowo-badawczych.

ETAPY ROZWOJU METODY GEORADAROWEJ W PRACOWNI GEOFIZYKI GÓRNICZEJ KATEDRY GEOFIZYKI WGGiOŚ AGH

Na figurze 1 (na wklejce) pokazano aparaturę georadarową szwedzkiej firmy MALA GeoScience, będącą obecnie w posiadaniu Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH.

W metodzie georadarowej, w zależności od domniemych rozmiarów poszukiwanych obiektów jak również od przyjętej głębokości poszukiwań, stosuje się anteny pomiarowe o różnych częstotliwościach (Fig. 1). Duży wybór prezentowanych rodzajów anten wynika z różnych technik pomiarowych (metoda refleksyjna, refrakcyjna, tomografia, profilowania prędkości, profilowania otworowe) oraz bardzo szerokiego spektrum zastosowań metody georadarowej. Metoda ta ma zastosowanie m.in. w geologii, hydrogeologii, górnictwie, geotechnice, glaciologii, archeologii, drogownictwie, budownictwie, inżynierii lądowej, sozologii, lokalizacji infrastruktury podziemnej, badaniu osadów dennych, w poszukiwaniach dla potrzeb wojska i policji, badaniach dla rolnictwa i in.

Szczegółowe informacje na temat metody georadarowej, jej zastosowań oraz rozwiązań konstrukcyjnych można znaleźć w opracowaniach książkowych takich autorów, jak m.in.: Conyers & Goodman 1997, Annan 2001, Daniels 2004, Karczewski 2007, Jol 2009.

Pierwszą aparaturę pomiarową zakupiono w 1988 roku w Międzyresortowym Instytucie Geofizyki na Wydziale Geologiczno-Poszukiwawczym AGH, w ramach projektu kierowanego przez prof. S. Małozewskiego pt. *Centralny Program Badań Podstawowych*. Zakupiono wtedy zestaw sejsmiczno-georadarowy japońskiej firmy OYO, w skład którego wchodził m.in. jednokanałowy, analogowy georadar model 2441 oraz anteny ekranowane o częstotliwościach: 120, 250, 500 MHz. W wyniku restrukturyzacji Wydziału Geologiczno-Poszukiwawczego powstał w roku 1992 Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska oraz Zakład Geofizyki podzielony na pracownie tematyczne. Metoda georadarowa rozwijana była od tego momentu w Pracowni Geofizyki Górniczej, pod kierownictwem prof. Henryka Marcaka.

Jedną z ważniejszych prac naukowo-badawczych, która powstała z użyciem georadaru OYO była praca doktorska mgr inż. J. Karczewskiego pt. *Metody przetwarzania georadarowych danych pomiarowych dla lokalizacji antropogenicznych i naturalnych zaburzeń w warstwach przypowierzchniowych*, której promotorem był prof. H. Marcak. W pracy tej autor przedstawił wiele przykładów zastosowania w geofizyce inżynierskiej georadaru OYO oraz opracował program komputerowy do przetwarzania danych georadarowych (Karczewski 1997).

Pomimo przyjęcia chronologicznego schematu artykułu, w celu zachowania spójności informacji, autor proponuje w tym miejscu przeskoczyć do roku 2007, kiedy to została wydana książka autorstwa J. Karczewskiego pt. *Zarys metody georadarowej*, która jest rozwinięciem jego pracy doktorskiej. W książce przedstawiono liczne przykłady zastosowania w geofizyce inżynierskiej i geofizyce środowiska zarówno starszego, analogowego georadaru OYO jak i nowszego, cyfrowego georadaru RAMAC/GPR. W pracy znajduje się szerokie omówienie różnych rozwiązań aparaturowych oraz procedur przetwarzania i interpretacji danych georadarowych. Dużo miejsca poświęcono także opisowi programów do akwizycji oraz przetwarzania danych georadarowych (Karczewski 2007).

Georadar OYO w połowie lat 90. ubiegłego wieku był już aparaturą przestarzałą, ze względu na parametry techniczne i pracę w systemie analogowym. Dlatego też zespół pod kierownictwem prof. H. Marcaka zakupił w 1997 roku z grantu europejskiego INCO-COPERNICUS pt. *Detection of hydrocarbon contaminated soils by electromagnetic techniques* jednokanałowy georadar RAMAC/GPR szwedzkiej firmy MALA GeoScience, pracujący w systemie cyfrowym, wraz z antenami nieekranowanymi o częstotliwościach: 200 i 400 MHz (Fig. 1).

Równolegle ze wspomnianym grantem zespół Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH realizował grant KBN pod kierownictwem prof. S. Rychlickiego pt. *Opracowanie metodyki wykrywania zanieczyszczeń gruntu węglowodorami w warunkach zagrożenia ekologicznego*, który zakończył się wydaniem opracowania książkowego (Rychlicki 2000).

W ramach wspomnianych powyżej dwóch grantów realizowano badania geofizyczne z wykorzystaniem technik elektromagnetycznych (Carcione *et al.* 2000), opracowano podstawy teoretyczne migracji skażeń ropopochodnych w środowisku gruntowo-wodnym, wykonano pomiary atmogeochemiczne i badania laboratoryjne oraz opracowano procedury do kompleksowej analizy i interpretacji danych pomiarowych z miejsc skażonych produktami ropopochodnymi.

W latach 1997–1999 w ramach grantu KBN pod kierownictwem dr inż. S. Tomeckiej-Suchoń pt. *Pomiary georadarowe do lokalizacji pustek poeksploatacyjnych na obszarze Górnego Śląska* przeprowadzono drobną modernizację georadaru RAMAC/GPR, kupując m.in. laptop do sterowania georadarem w terenie. W ramach tego grantu badano przydatność metody georadarowej do lokalizacji pustek wędrujących, a testy prowadzono na obszarach górniczych Górnego Śląska. Przygotowano również algorytmy i programy komputerowe zwiększające precyzję lokalizacji pustek. Wybrane wyniki grantu opublikowano m.in. w czasopiśmie „Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica” (Karczewski *et al.* 1999, Ziętek *et al.* 2001).

W latach 2001–2005, w ramach realizacji pracy doktorskiej mgr inż. T. Gołębiowskiego pt. *Modelowanie numeryczne pola georadarowego w badaniach gruntów skażonych substancjami ropopochodnymi*, której promotorem był prof. H. Marcak, przeprowadzono kolejną rozbudowę aparatury RAMAC/GPR. Pierwszym krokiem było zakupienie z grantu SUBIN Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej nieekranowanej anteny o częstotliwości 50 MHz (Fig. 1). W kolejnym kroku zakupiono z grantu KBN pod kierownictwem mgr inż. T. Gołębiowskiego pt. *Zastosowanie modelowania numerycznego elektromagnetycznego pola falowego w reinterpretacji płytkich badań górotworu wykonanych metodą georadarową* system komputerowy Reflex w niemieckiej firmie SandmeierGeo, do przetwarzania, modelowania i interpretacji danych georadarowych (Fig. 1). W pracy doktorskiej autor opracował dwustopniowy system

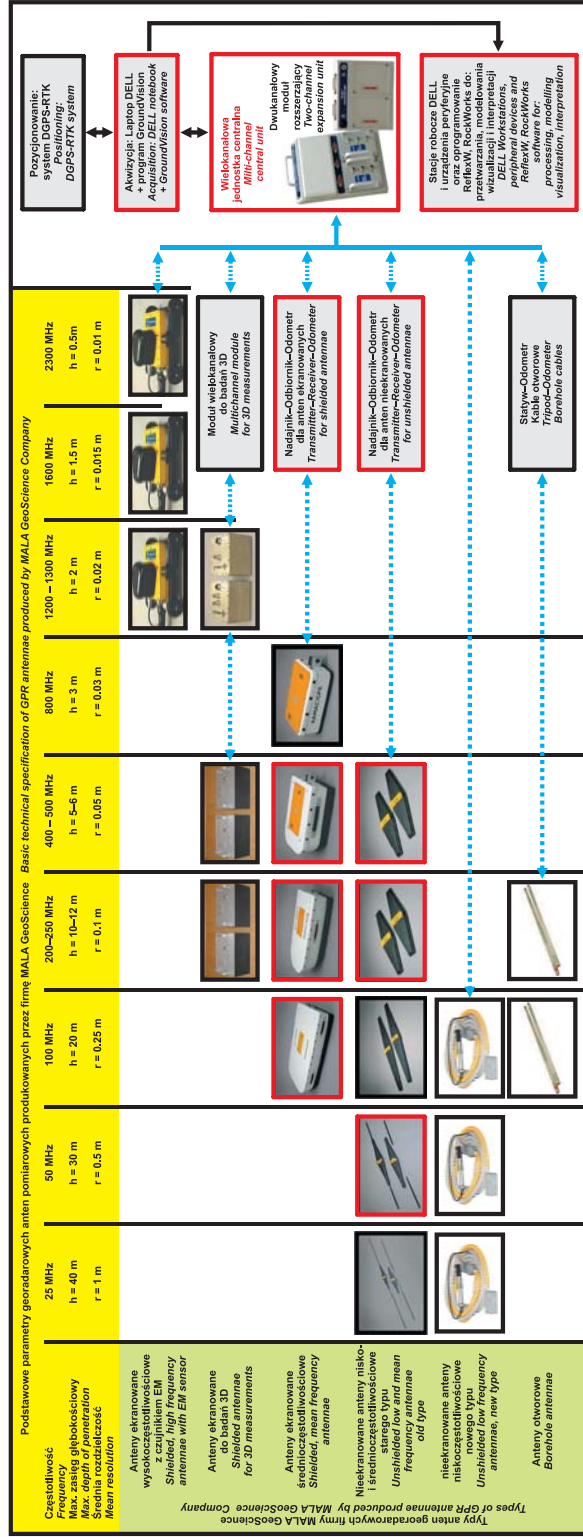


Fig. 1. Modułowa koncepcja georadarowej aparatury pomiarowej (na podstawie materiałów udostępnionych przez firmę MALA GeoScience). Kolorem czerwonym zaznaczono sprzęt będący obecnie w posiadaniu Pracowni Geofizyki Górniczej, Katedry Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej
 Fig. 1. Modular concept of GPR measurement device (on the basis of information delivered by MALA GeoScience Company). The Laboratory of Mining Geophysics in the Department of Geophysics at Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection at AGH University of Science and Technology possesses elements marked with red color

modelowania numerycznego dla interpretacji danych georadarowych uzyskiwanych z rejonów zanieczyszczonych substancjami ropopochodnymi (Gołębiowski 2005), który został zaprezentowany na konferencjach międzynarodowych *SAGEEP* (Marczak & Gołębiowski 2005) oraz *Near Surface* (Wójcicki *et al.* 2008). W ramach doktoratu opracowano również model interpretacyjny dla zanieczyszczeń rozłożonych w sposób losowy w ośrodku geologicznym, którego ideę opublikowano w czasopiśmie *Near Surface Geophysics* (Marczak & Gołębiowski 2006b) oraz *Acta Geophysica* (Marczak & Gołębiowski 2008).

W latach 2004–2006 zespół pod kierownictwem prof. H. Marcaka realizował projekt KBN pt. *Lokalizacja zanieczyszczeń węglowodorowych w gruncie metodami geofizycznymi i atmogeochemicznymi*, w którym pracowano nad dalszym rozwojem procedur zaproponowanych w pracy doktorskiej dr. inż. T. Gołębiowskiego. Wyniki pomiarów georadarowych korelowano z wynikami badań otworowych i laboratoryjnych oraz z wynikami uzyskanymi z metody atmogeochemicznej. W ramach tego projektu przeprowadzono kolejną rozbudowę warsztatu badawczego, kupując 2 stacje robocze firmy DELL (Fig. 1), które wraz z systemem ReflexW użyto do przetwarzania, modelowania i interpretacji wyników badań georadarowych. Zakupiono również niezbędne do realizacji projektu urządzenia peryferyjne oraz nowy laptop do sterowania aparaturą georadarową w terenie (Fig. 1). Podsumowaniem grantu była praca zbiorowa pod redakcją H. Marcaka i T. Gołębiowskiego pt. *Lokalizacja zanieczyszczeń węglowodorowych w gruncie metodami geofizycznymi i atmogeochemicznymi* (Marczak & Gołębiowski 2006a). Najciekawsze wyniki z grantu zaprezentowano dwukrotnie na międzynarodowej konferencji *Near Surface* (Marczak *et al.* 2005, Marczak & Gołębiowski 2006c).

W latach 2001–2008 z prac statutowych i własnych zespołu Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH w składzie: prof. H. Marczak, dr inż. T. Gołębiowski oraz dr inż. S. Tomecka-Suchoń zakupiono drobny sprzęt niezbędny do badań terenowych, oprogramowanie RockWorks do wizualizacji i analizy danych pomiarowych oraz skonstruowano specjalne systemy do pomiarów terenowych. W okresie tym zespół pracował m.in. nad badaniami georadarowymi w układzie przestrzennym (3D) i przestrzenno-czasowym (4D). Najważniejsze wyniki tych prac opublikowano m.in. w czasopiśmie *Near Surface Geophysics* (Marczak *et al.* 2008b) oraz na międzynarodowej konferencji *Near Surface* (Tomecka-Suchoń 2008, Marczak *et al.* 2008a). Kolejnymi zagadnieniami rozwijanym w ramach prac statutowych i własnych były profilowania zmienno-offsetowe wykorzystywane m.in. w refrakcji georadarowej (Gołębiowski 2008) oraz modelowania numeryczne pola georadarowego (Nguyen *et al.* 2005, Gołębiowski 2006).

Światowym trendem obserwowanym obecnie w zakresie aparatury georadarowej jest zastępowanie urządzeń jednokanałowych wielokanałowymi. Dlatego też, aby móc kontynuować badania naukowe na najwyższym światowym poziomie zakupiono w 2008 roku w ramach prac statutowych Pracowni Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH wielokanałowy, cyfrowy georadar PROEX szwedzkiej firmy MALA GeoScience wraz z anteną ekranowaną o częstotliwości 100 MHz (Fig. 1). Georadar PROEX standardowo pracuje z 2 kanałami pomiarowymi, lecz poprzez zastosowanie dwukanałowych modułów rozszerzających (Fig. 1) można rozbudować go do 8 kanałów fizycznych, a max do 64 kanałów akwizycyjnych.

Wielokanałowy georadar PROEX został dodatkowo rozbudowany w 2008 roku o kolejne dwie anteny ekranowane o częstotliwościach: 250 i 500 MHz (Fig. 1), w ramach realizowanego w latach 2008–2010 grantu KBN pt. *Zastosowanie metod geofizycznych do badania*

migracji zanieczyszczeń ze składowisk odpadów górniczych, którego kierownikiem jest dr inż. S. Tomecka-Suchoń. Wieloletnie doświadczenie zdobyte w zastosowaniu georadaru do wykrywania produktów ropopochodnych w gruntach zostanie w obecnym projekcie wykorzystane do monitorowania migracji skażeń chemicznych w ośrodku gruntowo-wodnym (Marczak & Tomecka-Suchoń 2009).

Równoległe ze wspomnianym grantem rozpoczęto w 2008 roku realizację grantu KBN pt. *Zastosowanie metody georadarowej do lokalizacji anomalii o stochastycznym rozkładzie w ośrodku geologicznym* pod kierownictwem dr. inż. T. Gołębiowskiego. W ramach projektu nie planuje się rozbudowy aparatury pomiarowej, lecz nacisk postawiono na niestandardowe techniki badań terenowych oraz zaawansowane techniki przetwarzania i interpretacji cyfrowych danych georadarowych.

W najbliższej przyszłości Pracownia Geofizyki Górniczej KG WGGiOŚ AGH planuje dalszą rozbudowę aparatury georadarowej o brakujące anteny pomiarowe, system pozycjonowania GPS (w standardzie DGPS-RTK) oraz kolejne kanały pomiarowe (Fig. 1). Dalsza rozbudowa i unowocześnianie warsztatu badawczego pozwoli w przyszłości m.in. na prowadzenie badań otworowych, przyspieszenie i optymalizację badań 3D oraz badań zmienno-offsetowych oraz pełną integrację danych georadarowych z danymi geodezyjnymi i systemami CAD-GIS.

ZAKOŃCZENIE

Metoda georadarowa ma już za sobą dwa duże skoki technologiczne, tj. przejście z systemów analogowych na cyfrowe oraz przejście z aparatury jednokanałowej na wielokanałową. Można domniemywać, że kolejnym ważnym etapem rozwoju metody georadarowej będzie upowszechnienie aparatury pozwalającej na pomiary w układzie 3D.

W artykule przedstawiono, jak kolejne etapy rozwoju technologicznego urządzeń georadarowych wpływały na zakres i tematykę prac naukowo-badawczych prowadzonych w Pracowni Geofizyki Górniczej, w Katedrze Geofizyki na Wydziale Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej. Efektem 20-letniej pracy zespołu pod kierownictwem prof. Henryka Marcaka jest ulokowanie obecnie Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH pośród liderów w zakresie metody georadarowej, zarówno pod względem warsztatu pomiarowego jak i poziomu prac naukowo-badawczych.

Praca została sfinansowana ze środków statutowych Katedry Geofizyki WGGiOŚ AGH nr 11.11.140.455.

Praca była prezentowana na VII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Geofizyka w geologii, górnictwie i ochronie środowiska” organizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH na WGGiOŚ.

LITERATURA

- Annan A.P., 2001. *Ground Penetrating Radar – Workshop Notes*. Ed. Sensor & Software Inc., Kanada, 1–192.
- Carcione J.M., Marczak H., Seriani G. & Padoan G., 2000. GPR modeling study in a contaminated area of Krzywa Air Base (Poland). *Geophysics*, 65, 2, 521–525.

- Conyers L.B. & Goodman D., 1997. *Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. AltaMira Press, London, 1–232.
- Daniels D., 2004. *Ground Penetrating Radar*. The Institution of Engineering and Technology, London, 1–726.
- Gołębiowski T., 2005. *Modelowanie numeryczne pola georadarowego w badaniach gruntów skażonych substancjami ropopochodnymi*. WGGiOŚ AGH, Kraków, 1–192 (praca doktorska).
- Gołębiowski T., 2006. 3D GPR measurements for archeological application with interpretation aided by numerical modelling. *Acta Geophysica Polonica*, 54, 4, 413–429.
- Gołębiowski T., 2008. Changeable-offset GPR profiling for loose zones detection in levees. *Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, P-47, 1–4.
- Jol H.M., 2009. *Ground Penetrating Radar – Theory and Applications*. Elsevier Science Ltd., Amsterdam, 1–574.
- Karczewski J., 1997. *Metody przetwarzania georadarowych danych pomiarowych dla lokalizacji antropogenicznych i naturalnych zaburzeń w warstwach przypowierzchniowych*. WGGiOŚ AGH, Kraków (praca doktorska).
- Karczewski J., Tomecka-Suchoń S. & Ziętek J., 1999. On some problems to localize post-exploitation mining holes with ground-penetrating. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 34, 1–2, 159–167.
- Karczewski J., 2007. *Zarys metody georadarowej*. UWND AGH, Kraków, 1–246.
- Marcak H. & Tomecka-Suchoń S., 2009. Badania georadarowe dla oceny mineralizacji wody gruntowej. *Geologia (kwartalnik AGH)*, 35 (w druku).
- Marcak H., Gołębiowski T. & Tomecka-Suchoń S., 2005. Detection of hydrocarbon contamination in the ground using GPR method. *Near Surface 2005 – 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Palermo, P-002, 1–4.
- Marcak H. & Gołębiowski T., 2005. Computer simulation of hydrocarbon flow and wave field for interpretation GPR measurements. *SAGEEP 2005 – 18th Annual Meeting on Geophysical Solutions for Today's Challenges*, Atlanta, 837–846.
- Marcak H. & Gołębiowski T., 2006a. *Lokalizacja zanieczyszczeń węglowodorowych w gruncie metodami geofizycznymi i atmogeochemicznymi*. UWND AGH, Kraków, 1–154.
- Marcak H. & Gołębiowski T., 2006b. A stochastic interpretation of GPR data concerning the location of hydrocarbon plumes. *Near Surface Geophysics*, 4, 3, 163–176.
- Marcak H. & Gołębiowski T., 2006c. Analysis of GPR trace attributes and spectra for LNAPL contaminated ground. *Near Surface 2006 – 12th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Helsinki, P-020, 1–4.
- Marcak H., Gołębiowski T. & Tomecka-Suchoń S., 2008a. 3D GPR measurements for sinkholes detection – case studies from selected sites in Poland. *Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, P-20, 1–4.
- Marcak H., Gołębiowski T. & Tomecka-Suchoń S., 2008b. Geotechnical analysis and 4D GPR measurements for the assessment of the risk of sinkholes occurring in a Polish mining areas. *Near Surface Geophysics*, 6, 4, 233–243.

- Marcak H. & Gołębiowski T., 2008. Changes of GPR spectra due to the presence of hydrocarbon contamination in the ground. *Acta Geophysica*, 56, 2, 485–504.
- Nguyen V.G., Ziętek J., Nguyen B.D., Karczewski J. & Gołębiowski T., 2005. Study of geological sedimentary structures of Mekong river banks by Ground Penetrating Radar: forecasting avulsion-prone zones. *Acta Geophysica Polonica*, 53, 2, 167–181.
- Rychlicki S., 2000. *Metody wykrywania zanieczyszczeń ropopochodnych w środowisku gruntowo-wodnym*. Studia, Rozprawy, Monografie, seria 75, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 1–186.
- Tomecka-Suchoń S., 2008. Georadar studies on St. Benedict's Church on Lasota Hill, Kraków, Poland. *Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, P-57, 1–4.
- Wójcicki A., Pacanowski G., Gołębiowski T., Marcak H. & Tomecka-Suchoń S., 2008. Study on detection of hydrocarbon pollution of soil and groundwater with the use of geophysical methods. *Near Surface 2008 – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Kraków, P-39, 1–4.
- Ziętek J., Karczewski J. & Tomecka-Suchoń S., 2001. Observations and results of GPR modelling of sinkholes in Upper Silesia (Poland). *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 36, 4, 377–389.