

**KOMPLEKSOWE BADANIA
GEOFIZYCZNE I GEOLOGICZNE
W CELU ROZPOZNANIA
NAGROMADZENIA OSADÓW OCHROWYCH
W REJONIE MIEJSCOWOŚCI ZABRATÓWKA
KOŁO RZESZOWA**

**Comprehensive geophysical and geological research for recognition
of ochreous sediments in Zabratówka, village near Rzeszów**

Tomisław GOŁĘBIOWSKI¹, Dariusz SALA² & Tadeusz RATAJCZAK²

*AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
¹Katedra Geofizyki; ²Katedra Mineralogii, Petrografii i Geochemii; al. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków; e-mail: tomgoleb@agh.edu.pl, saladariusz@wp.pl, trataj@agh.edu.pl*

Treść: W artykule przedstawiono wyniki badań geofizycznych i geologicznych dotyczących osadów ochrowych zalegających w miejscowości Zabratówka koło Rzeszowa. W rejonie badań wykonano 14 płytkich otworów w celu rozpoznania budowy geologicznej warstw przypowierzchniowych i pobrania próbek do badań laboratoryjnych. Zakres badań objął analizy geochemiczne, mineralogiczne oraz petrofizyczne. Uzyskane wyniki posłużyły do stworzenia interpretacyjnego, geofizycznego modelu terenu badań. Między otworami badawczymi zaprojektowano profile w celu przeprowadzenia rekonesansowych badań georadarowych. Miały one służyć ustaleniu możliwości zastosowania tej techniki pomiarowej w okonturowaniu nagromadzeń ochry. Zaprojektowano też szczegółowe badania georadarowe w układzie trójwymiarowym. Wyniki pomiarów geofizycznych porównywano z danymi otworowymi oraz rezultatami analizami laboratoryjnymi.

Słowa kluczowe: ochra karpacka, metoda georadarowa, geochemia

Abstract: This article presents the results of comprehensive research on ochre sediments from the Zabratówka, village near Rzeszów. Fourteen boreholes were drilled in the investigation area for visualization of geological structures and for collecting ground samples for further laboratory measurements. Geochemical, mineralogical and petrophysical analyses were carried out in laboratory and their results were correlated to prepare a geophysical interpretation model. Preliminary georadar surveys were conducted between boreholes to analyze the possibilities and limitations of this measurement technique used in outlining Carpathian ochre accumulations. Detailed three-dimensional georadar surveys were carried out in the selected area of the research site and the results of geophysical measurements were correlated with the information from boreholes and laboratory tests.

Key words: Carpathian ochre, GPR method, geochemistry

WPROWADZENIE

W artykule przedstawiono wyniki kompleksowych badań nagromadzeń ochry karpackiej. Na podstawie wyników badań geologicznych, geochemicznych, mineralogicznych, geofizycznych, petrofizycznych i symulacji komputerowych przeprowadzono, po raz pierwszy w przypadku utworów ochrowych, kompleksową interpretację przestrzennego rozkładu i parametrów fizykochemicznych tej kopaliny.

Badania geofizyczne i geologiczne przeprowadzono w rejonie wsi Zabratówka, położonej ok. 20 km na południowy wschód od Rzeszowa. Na podstawie badań terenowych oraz danych literaturowych stwierdzono występowanie utworów ochrowych na niewielkich głębokościach (Kotlarczyk & Ratajczak 2002).

W ujęciu mineralogicznym ochrą określa się proskowe, ziemiste odmiany minerałów tlenkowych (zazwyczaj minerałów żelaza) powstających w strefie wietrzenia skał karpacczych. Zazwyczaj odznacza się ona barwą żółtą, składa się niemal z czystego goethytu lub produktów jego przekryształizowania. Obserwuje się także odmiany czerwone lub wiśniowe, zawierające hematyt jako składnik barwiący. Domieszka związków manganu powoduje natomiast zabarwienie brunatne (Bolewski 1992). Ochrą nazywa się także żółte ily bogate w wodorotlenki żelaza (Ryka & Maliszewska 1991).

Według najnowszego podziału geomorfologicznego Polski, opracowanego przez Jerzego Kondrackiego (2002), rejon badań to obszar Pogórza Dynowskiego, zbudowanego z utworów jednostki skolskiej (fliszowe osady wieku kreda dolna – miocen dolny), znajdujących się we wschodniej części Karpat Zewnętrznych.

W analizowanym rejonie obserwuje się duże deniwelacje terenu (Fig. 1A). Przyjęto, kierując się informacjami z wcześniejszych badań, że utwory ochrowe powinny się tworzyć w niższej części stoków, silnie porożcinanych wzniesień (Fig. 1A), w bezpośrednim sąsiedztwie wychodni formacji menilitowej. Na podstawie obserwacji terenowych wytypowano rejon w celu przeprowadzenia rekonesansowych badań geofizycznych i geologicznych.

W rejonie badań ręcznie wykonano serie otworów (Fig. 1B) sięgających maksymalnie do głębokości 180 cm. Pozwoliło to na rozpoznanie budowy geologicznej strefy przy powierzchniowej oraz wskazanie zasięgu występowania ochry. Wykazano też, że pokrywa ochrowa przykryta jest młodszymi glinami deluwialnymi, a w podłożu można napotkać okruchy warstw menilitowych, zmyte z ich wyżej położonych wychodni (Fig. 1A).

Wstępne wyniki badań georadarowych w układzie 2D oraz najważniejsze wyniki badań geochemicznych i petrofizycznych rejonu pokazanego na figurze 1 przedstawiono w pracy Sali & Gołębiowskiego (2011). Zaprezentowano w niej wyniki symulacji komputerowej rozkładu elektromagnetycznego pola falowego w modelu odwzorowującym obszar badań w rejonie wsi Zabratówka. Najważniejsze wnioski wynikające z tych analiz zamieszczono w dalszej części niniejszego artykułu. W tej części artykułu autorzy zaprezentowali natomiast wyniki badań mineralogicznych, geochemicznych, petrofizycznych oraz pełną analizę wyników prac georadarowych w układzie 2D oraz 3D wraz z ich kompleksową interpretacją.

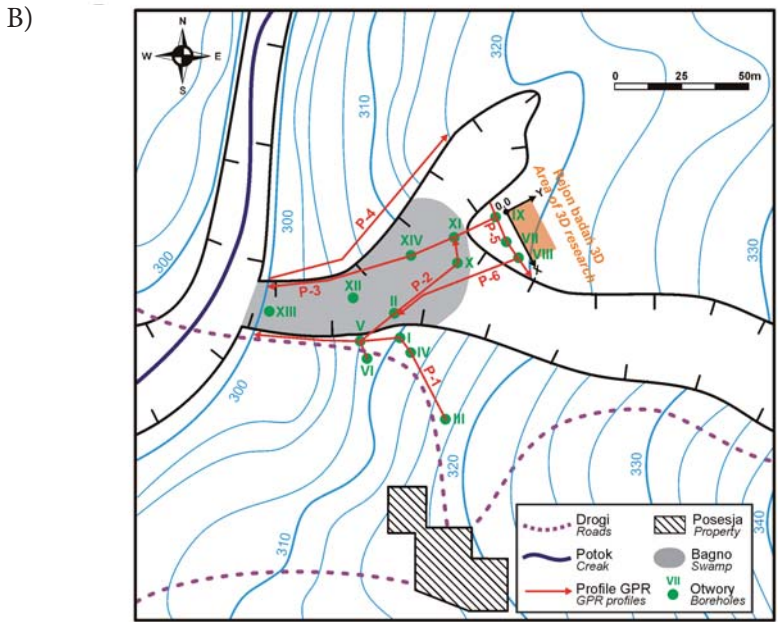
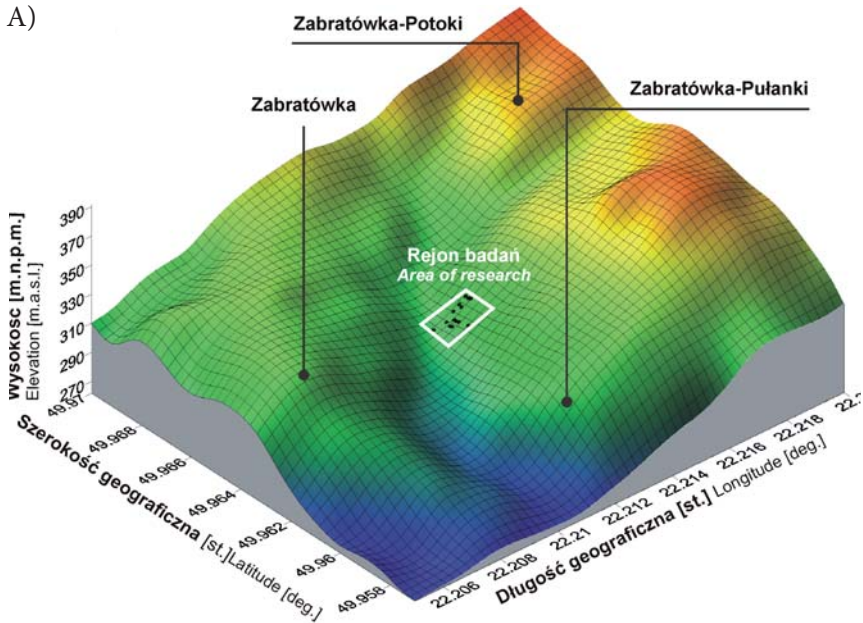


Fig. 1. Ukształtowanie terenu w rejonie badań geologicznych i geofizycznych (A). Położenie otworów rozpoznawczych i profili GPR (B) (mapa podkładowa: www.geoportal.gov.pl)

Fig. 1. Terrain morphology of the geological and geophysical research area (A). Boreholes location and project of GPR profiles (B) (base map: www.geoportal.gov.pl)

Celem przeprowadzonych badań mineralogicznych i geochemicznych było uzyskanie informacji dotyczących składu fazowego osadów ochrowych, a także określenie zawartości wybranych pierwiastków. Zastosowano w tym celu dyfraktometrię rentgenowską (dyfraktometr firmy Philips APD X'Pert PW 3020) oraz elektronową mikroskopię skaningową połączoną z analizą chemiczną w mikroobszarze (mikroskop FEI Quanta 200F ze spektrometrem EDS i detektorem elektronów wstecznie rozproszonych – BSE). Na potrzeby wstępnej charakterystyki geochemicznej oznaczono zawartości żelaza i manganu: całkowite (po rozpuszczeniu w HF i HCl) i związane z amorficznymi tlenkami (po ekstrakcji buforem szczawianowym), stosując metodę absorpcyjnej spektroskopii atomowej (AAS), przy użyciu spektrometru Philips PU-9100x pracującego w warunkach zalecanych przez producenta urządzenia. Otrzymane wyniki skorelowano z rezultatami badań geofizycznych i petrofizycznych. Stanowiło to ważny element w interpretacji wyników.

Celem badań geofizycznych było określenie możliwości detekcyjnych metody georadarowej (GPR) w zakresie lokalizacji nagromadzeń ochrowych w utworach typowych dla Karpat fliszowych, tj. piaskowców, łupków, glin. Do przeprowadzenia badań geofizycznych zaproponowano metodę GPR, ponieważ w porównaniu z innymi technikami geofizycznymi pozwala na szybkie i tanie rozpoznanie anomalii w badanym rejonie. Dodatkowo cechuje się bardzo wysoką rozdzielczością przy badaniu stref przypowierzchniowych, do głębokości kilku metrów. Profile pomiarowe zaprojektowano pomiędzy otworami (Fig. 1B), co pozwoliło skorelować wyniki pomiarów GPR z wynikami badań geologicznych, geochemicznych i petrofizycznych.

Z badań otworowych wynikało, że największe nagromadzenie utworów ochrowych występuje w rejonie otworów nr: VII, VIII, IX (Fig. 1B), dlatego w sąsiedztwie tych otworów przeprowadzono dodatkowo georadarowe badania trójwymiarowe (3D).

BADANIA GEOCHEMICZNO-MINERALOGICZNE

Badania geochemiczne

W celu zbadania rozprzestrzenienia pokrywy ochrowej, jej grubości i zmienności wykonano kilkanaście otworów (Fig. 1B), w których ustalono wstępnie odmiany litologiczne i kolorystyczne zalegającej ochry. Stwierdzono, że nagromadzenie tej kopaliny występuje w postaci osadów ochrowych o zróżnicowanym zabarwieniu, od żółtego poprzez odcienie czerwieni aż do brązowego. Wśród utworów ochrowych zauważono również zaleganie brązowo zabarwionych, scementowanych żelazistych kongrekcji o zróżnicowanej wielkości dochodzącej do kilkunastu centymetrów (Fig. 2A). Zauważono ponadto (Fig. 2B), że związki żelaza są rozproszone w brunatnych, szarych i niebieskawych glinach (Sala & Rzepa 2011). Makroskopowe obserwacje posłużyły do wytypowania czterech odmian reprezentujących zróżnicowane odmiany litologiczne i kolorystyczne osadu, tj.: **glinę ilastą**, **glinę zażelazioną**, **ochrę zażelazioną** oraz **ochrę właściwą**. Stwierdzoną zmienność próbek wykorzystano przy korelacji z wynikami badań petrofizycznych.

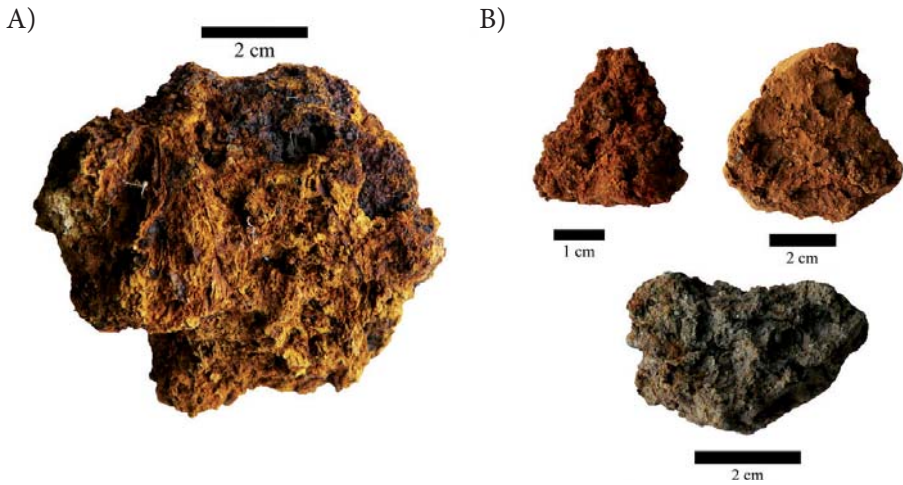


Fig. 2. Gruźlowate formy konkrecji ochrowych (A). Związki żelaza rozproszone w brunatnych i popielatych glinach (B)

Fig. 2. Nodular forms of ochre concretions (A). Iron compounds dispersed in brown and grey clays (B)

Wykazano, że zawartości żelaza i manganu we wszystkich wymienionych utworach ochry zmieniają się w szerokich granicach w zależności od lokalizacji i typu próbki. Całkowita zawartość Fe waha się w granicach 6.66–48.04% wag., przy czym największe koncentracje odnotowano w konkrecjach ochrowych, występujących w ochrze zażelazionej i właściwej. Stosunkowo dużą koncentrację żelaza zarejestrowano również w otaczających glinach: 3.28–13.61% wag. Zawartości Fe ekstrahowanego buforem szczawianowym wahają się w granicach 0.69–20.94% wag. w przypadku ochr i 1.24–8.68% wag. w utworach ilastych. Koncentracje manganu w próbach ochr i glinach ochrowych są wyraźnie mniejsze, wynosząc odpowiednio: 0.004–1.188% wag. oraz 0.018–0.239% wag. (Sala & Rzepa 2011). W przypadku próbek wytypowanych do dalszych badań, koncentracje żelaza w glinie ilastej, glinie zażelazionej, ochrze zażelazionej oraz ochrze właściwej wyniosły odpowiednio: 3.29% wag., 20.31% wag., 34.05% wag. oraz 36.85% wag. Otrzymane wyniki badań wykorzystano do korelacji z wynikami badań georadarowych i petrofizycznych (Sala & Gołębiowski 2011).

Badania mineralogiczne

Wyniki badań dyfraktometrycznych wskazują, że dominującą fazą mineralną żelaza obecną w ochrach zażelazionych i właściwych jest goethyt (Fig. 3). W utworach tych zaobserwowano też niewielkie ilości kwarcu oraz skaleni alkalicznych, a w pojedynczych przypadkach również tlenków manganu (Sala & Rzepa 2011). Badania z zastosowaniem mikroskopu skaningowego wykazały, że identyfikowane fazy mineralne tlenków i wodorotlenków żelaza przybierają zróżnicowane formy, np. podłużne, płytkowe (Fig. 4).

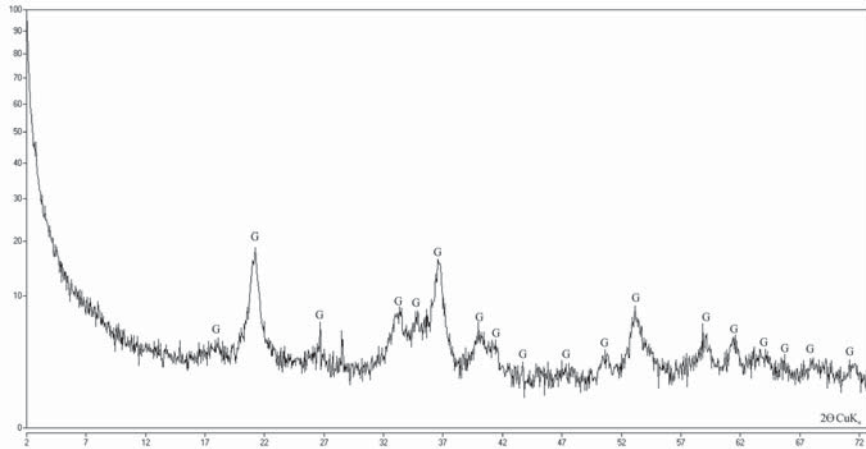


Fig. 3. Dyfraktogram reprezentujący ochrę właściwą z rejonu Zabratówki (G-goethyt)

Fig. 3. XRD analysis of the proper ochre from Zabratówka region (G-goethite)

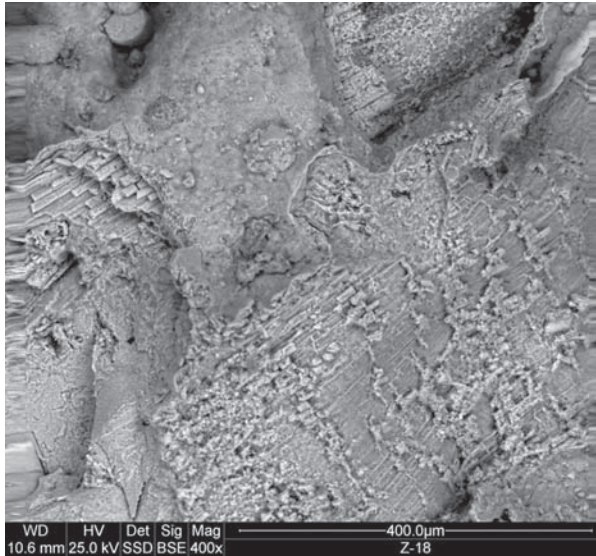


Fig. 4. Wodorotlenki żelaza (goethyt) w ochrach z Zabratówki. SEM

Fig. 4. Accumulations of iron hydroxides (goethite) in ochre from Zabratówki. BSE image

W pozostałych utworach ochrowych (m.in. w glinach ilastych i zażelazionych) dominują natomiast minerały ilaste (illit, smektyt), które mogły powstawać na skutek procesów wietrzeniowych bądź podlegały procesom wypłukiwania z łupków menilitowych. Obok mine-

rałów ilastych pojawia się w zmiennych ilościach goethyt oraz materiał okrucowy – kwarc i skalenie (Fig. 5) (Sala & Rzepa 2011). Ten ostatni stanowią zwykle ostrokrawędziste, rzadziej – obtoczone, ziarna kwarcu oraz skaleni o zróżnicowanych wymiarach (Fig. 6).

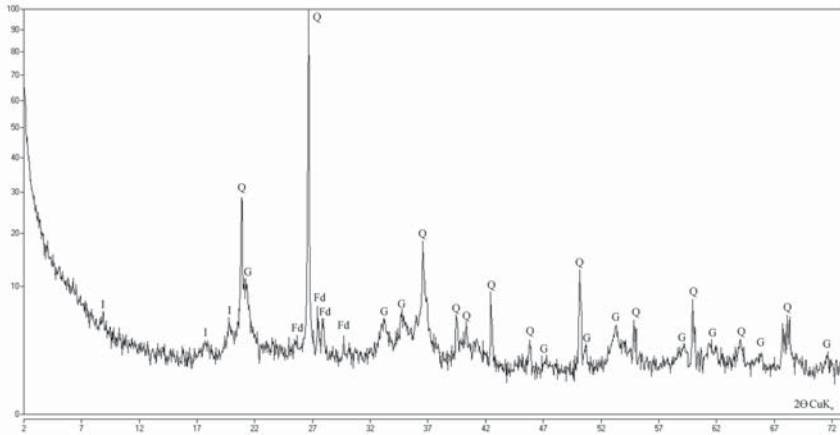


Fig. 5. Krzywa dyfraktometryczna utworów ochrowych (glin zażelazionych i glin ilastych) (Q – kwarc, G – goethyt, I – illit, Fd – skalenie)

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of ochreous sediments (clay sediments) (Q – quartz, G – goethite, I – illite, Fd – Feldspars)

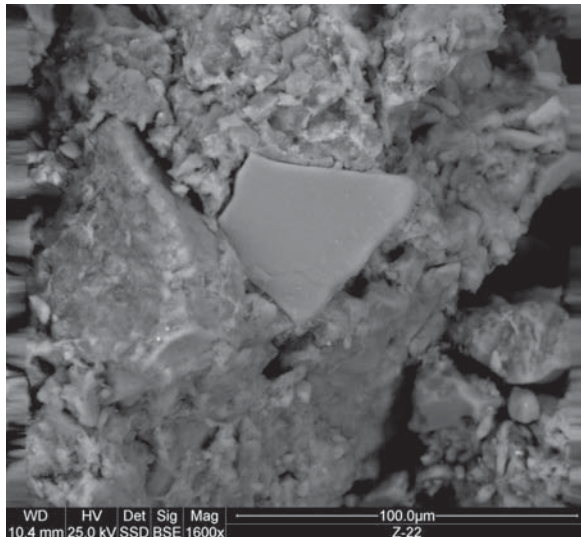


Fig. 6. Ostrokrawędziste ziarno skalenia w obrębie tlenków żelaza. SEM

Fig. 6. Sharp edged feldspar grain within iron oxides. BSE image

BADANIA GEOFIZYCZNE

Badania petrofizyczne

Ponieważ badania geofizyczne prowadzono metodą GPR (*Ground Penetrating Radar* lub *Ground Probing Radar*), w ramach badań petrofizycznych wyznaczano parametry materiałowe badanych utworów geologicznych, odpowiednie dla tej metody, tzn. względną, zespoloną przenikalność elektryczną ϵ^* [-] oraz elektryczną przewodność właściwą σ [mS/m]. Badania petrofizyczne przeprowadzono w przypadku czterech próbek, reprezentatywnych dla całego rejonu badań, opisanych w poprzednim rozdziale.

Badania własności dielektrycznych próbek przeprowadzono z użyciem rezonatora dielektrycznego. Wartości części rzeczywistej ϵ' i urojonej ϵ'' względnej, zespolonej przenikalności elektrycznej ϵ^* wyznaczano numerycznie, wykorzystując pomierzone wartości przesunięcia częstotliwości rezonansowej oraz wartości dobroci Q rezonatora (Krupka *et al.* 2004). Próbkę przed pomiarem zostały wysuszone i rozkruszone, a ze względu na dużą niejednorodność materiału, pomiary wykonano czterokrotnie dla każdej próbki, a wynik końcowy uśredniono.

Wyniki pomiarów końcowych wartości ϵ' i ϵ'' pozwoliły na skonstruowanie zależności pokazanej na figurze 7. Jak wynika z figury 7, część urojona względnej, zespolonej przenikalności elektrycznej $\text{Im}(\epsilon^*)$ jest około dziesięciokrotnie mniejsza od części rzeczywistej, dlatego w dalszych analizach można przyjąć, że wartość ϵ^* jest liczbą rzeczywistą.

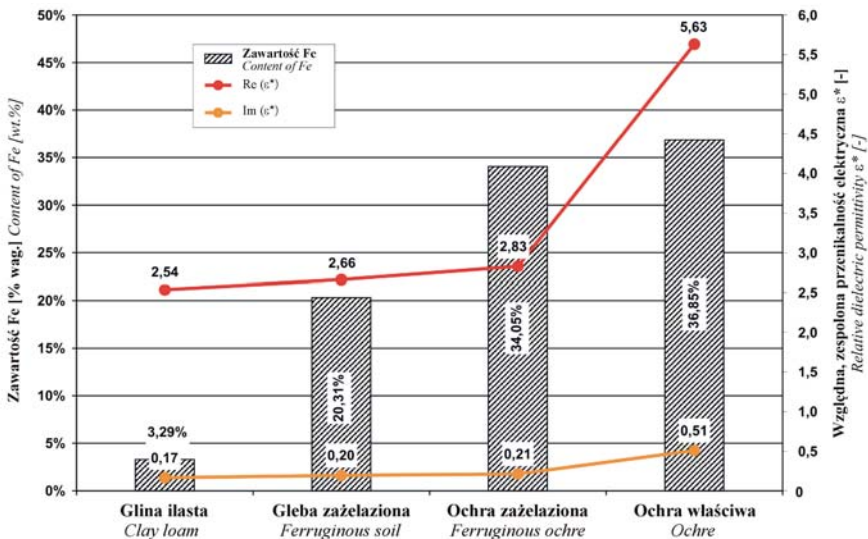


Fig. 7. Zależność części rzeczywistej $\text{Re}(\epsilon^*)$ oraz urojonej $\text{Im}(\epsilon^*)$ względnej, zespolonej przenikalności elektrycznej ϵ^* w funkcji zawartości Fe w analizowanych próbkach

Fig. 7. Relationship between real part $\text{Re}(\epsilon^*)$ and imaginary part $\text{Im}(\epsilon^*)$ of relative dielectric permittivity ϵ^* and content of Fe in analysed samples

Badania oporności (i wyznaczenie przewodności) elektrycznej przeprowadzono w temperaturze 20°C metodą dwuelektrodową w trybie czteroprzewodowym (Plewa & Plewa 1992). Przed rozpoczęciem pomiarów próbki zmielono i umieszczono w suszarce laboratoryjnej na 48 godzin, w temperaturze 80°C. W ten sposób uzyskano rezydualne nasycenie próbek wodą na poziomie 3%.

Wysuszone próbki stopniowo nasycono wodą słodką w celu uzyskania określonego stopnia wilgotności, tzn.: 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18% i 21% wilgotności. Tak przygotowane próbki zagęszczano przez ich ściśnięcie w cylindrze urządzenia pomiarowego. W odniesieniu do każdej próbki i każdego stopnia wilgotności zarejestrowano 13 wartości oporu, a uśrednioną wartość przyjęto do obliczenia oporności elektrycznej właściwej ρ [$\Omega \cdot m$]. Ponieważ w metodzie georadarowej, która została zastosowana w badaniach terenowych, posługujemy się wartością odwrotną do oporności, tzn. przewodnością, zatem wyniki badań zostały przeliczone i w dalszej części artykułu analizowana będzie przewodność elektryczna właściwa σ [mS/m].

Na figurze 8 pokazano zestawienie wyników badań laboratoryjnych oporności (przewodności) w funkcji zawartości żelaza w badanych próbkach gruntu.

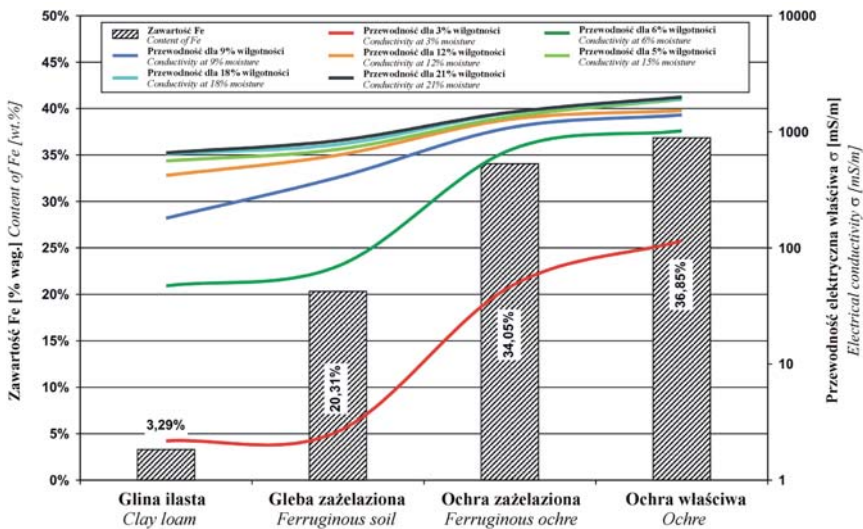


Fig. 8. Zależność przewodności elektrycznej właściwej σ w funkcji zawartości Fe w analizowanych próbkach dla wzrastającego nasycenia próbek wodą słodką

Fig. 8. Relationship between electrical conductivity σ and content of Fe in analyzed samples for changeable fresh water amount in samples

Wyniki badań petrofizycznych posłużyły do konstrukcji modelu numerycznego, a uzyskany z symulacji komputerowej echogram syntetyczny wykorzystano do przeprowadzenia dyskusji na temat możliwości i ograniczeń zastosowania metody GPR do detekcji nagromadzeń ochrowych w utworach gliniastych (Sala & Gołębowski 2011).

Najważniejsze wnioski sformułowane na podstawie badań petrofizycznych i symulacji komputerowych, przedstawione w pracy Sali & Gołębiowskiego (2011), są następujące:

- Zmiany zawartości Fe w badanych próbkach poniżej ok. 30% nie wpływają znacząco na zmiany wartości ε^* (Fig. 7). Powyżej 30% nawet nieznaczny, kilkuprocentowy wzrost zawartości Fe w próbce powoduje dwukrotny wzrost wartości ε^* (Fig. 7). Badania georadarowe prowadzono techniką refleksyjną, w której różnica (kontrast) wartości ε^* decyduje o współczynniku odbicia fali elektromagnetycznej (e.m.) od anomalii, dlatego nie będzie można wyróżnić utworów (anomalii) zawierających poniżej 30% Fe. Wynika to z faktu, że nie będą one dawać dużych kontrastów w stosunku do otaczających glin. Istnieją natomiast bardzo duże szanse na detekcję georadarową techniką refleksyjną utworów ochrowych (zwłaszcza ochry właściwej) załączających na niewielkich głębokościach (rzędu kilku metrów pod poziomem terenu) w utworach gliniastych.
- Analizując krzywą odnoszącą się do próbek suchych (tzn. 3% wilgotności) na figurze 8, można wyciągnąć wniosek, że poniżej ok. 20% zawartości Fe w próbce zmiany σ są bardzo niewielkie. Powyżej wartości ok. 20% obserwuje się nagły i znaczący wzrost elektrycznej przewodności właściwej, natomiast powyżej ok. 30% krzywa zmienności wartości σ ponownie ulega wypłaszczeniu. Ponieważ wartość σ wpływa w badaniach GPR przede wszystkim na wzrost tłumienia fal elektromagnetycznych, dlatego rejony wstępowania utworów zawierających powyżej ok. 20% Fe powinny się manifestować na echogramach zanikiem refleksów, co może być wskaźnikiem obecności w glinach ochry zażelazonej i właściwej.
- Ważą cechą zmienności wartości σ na figurze 8 jest szybki zanik kontrastów (zmienności) elektrycznej przewodności właściwej pomiędzy glinami i ochrami przy wzroście wilgotności ośrodka. Jeśli w przypadku próbek suchych obserwowano prawie 60-krotny wzrost przewodności pomiędzy gliną a ochrą właściwą, to przy wilgotności ośrodka rzędu 20% obserwujemy jedynie trzykrotny wzrost wartości σ . Wzrost wilgotności ośrodka, podobnie jak wzrost zawartości Fe, będzie wpływać znacząco na wzrost wartości σ we wszystkich analizowanych utworach, a w efekcie wpłynie na szybki wzrost tłumienia fali elektromagnetycznej. Jak wynika z powyższego, dużo większe kontrasty wartości σ z jednoczesnym relatywnie niskim tłumieniem ośrodka będą obserwowane w ośrodkach suchych, a w takich warunkach możliwości detekcyjne metody GPR będą największe.

Pomiary georadarowe

Prezentowane w dalszej części artykułu pomiary terenowe wykonywano techniką krótkoofsetowego profilowania refleksyjnego. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie zamieszczono w nim opisu georadarowej techniki refleksyjnej, który można znaleźć w licznych publikacjach (m.in. Karczewski 2007, Jol 2009).

Pomiary terenowe przeprowadzono w dwóch etapach:

- Etap I – wykonywano rekonesansowe badania w układzie dwuwymiarowym (2D) wzdłuż profili zaprojektowanych w pobliżu otworów badawczych (Fig. 1B), co pozwoliło na wstępne rozpoznanie terenu badań, korelację wyników badań georadarowych i otworowych oraz określenie możliwości i ograniczeń zastosowania techniki GPR do rozpoznawania nagromadzeń ochrowych w utworach gliniastych; wybrane wyniki badań GPR w etapie I pokazano w pracy Sali & Gołębiowskiego (2011).
- Etap II – najbardziej perspektywiczne wyniki badań etapu I otrzymano w rejonie otworów nr: VII, VIII, IX, co pozostawało w zgodzie z informacjami otworowymi o obecności ochry w rejonie tych otworów, dlatego przeprowadzono tam szczegółowe badania trójwymiarowe (Fig. 1B), zaprojektowane w siatce profili równoległych oddalonych od siebie o stały interwał D_y równy 2 m.

W georadarowej technice refleksyjnej wartości amplitud sygnałów odbitych od obiektów geologicznych oraz antropogenicznych zależne są od wartości współczynnika odbicia R [-] na granicy ośrodek – anomalia. Wartość R jest funkcją impedancji właściwej ośrodka geologicznego Z_{og} [Ω] i anomalii Z_a , które z kolei zależą od własności elektrycznych ϵ^* i σ , co opisują następujące formuły

$$R = \frac{Z_a - Z_{og}}{Z_a + Z_{og}} \quad (1)$$

gdzie

$$Z = \sqrt{\frac{i\omega\mu}{\sigma + i\omega\epsilon^*}} \quad (2)$$

gdzie

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' = \epsilon' - i\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3)$$

gdzie:

$\omega = 2\pi f$ [rad/s] – pulsacja (f – częstotliwość anteny pomiarowej),

i – jednostka urojona,

μ [H/m] – przenikalność magnetyczna ośrodka, przyjmowana w metodzie GPR za równą przenikalności próżni, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m,

ϵ_0 [F/m] – przenikalność elektryczna próżni, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m.

W przypadku fal elektromagnetycznych tłumienie ośrodka, w którym propaguje fala, można opisać odpowiednimi zależnościami odnoszącymi się do ośrodków stratnych (4) i małostratnych (5):

$$\alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu \cdot \epsilon^*}{2}\right) \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon^*} - 1\right)^2}\right)} \quad (4)$$

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \quad (5)$$

Analizując wyniki badań petrofizycznych, przedstawione w poprzednim rozdziale, w odniesieniu do wzorów (1)–(5) można przyjąć następujące założenia do interpretacji echogramów:

- miejsca nagromadzenia utworów ochrowych będą się manifestować na echogramach nagłym zanikiem amplitud refleksów ze względu na silny wzrost elektrycznej przewodności właściwej, a więc i tłumienia w tych utworach;
- stropy utworów ochrowych będą dawać silne refleksy ze względu na duży kontrast wartości ϵ^* i σ pomiędzy ochrami i otaczającymi glinami; pod takimi nagromadzeniami zaznaczać się będzie strefa zaniku refleksów.

Ośrodek geologiczny w rejonie badań rozpoznano otworami do średniej głębokości 0.6 m (lokalnie do 1.8 m), a wyniki badań otworowych wskazywały, że utwory ochrowe miały miąższości od kilkunastu do kilkudziesięciu centymetrów. Dlatego też do badań georadarowych użyto anteny o częstotliwości 500 MHz, której maksymalny zasięg głębokościowy w badanych utworach (tj. gliny, ochry) powinien być rzędu 2–3 m, a rozdzielczość rzędu kilku centymetrów. Pomiary terenowe wykonano szwedzkim, wielokanałowym, cyfrowym georadarem ProEx. Trasy wzdłuż profili rejestrowano z interwałem Δx równym 0.025 m, a w celu polepszenia stosunku sygnał/szum zastosowano 64-krotne składanie podczas akwizycji danych.

Do przetwarzania i wizualizacji danych pomiarowych użyto niemieckiego oprogramowania ReflexW. Na etapie przetwarzania echogramów zastosowano poszerzony, w stosunku do standardowego, zestaw procedur, tzn.: zastosowano filtrację jednowymiarową z użyciem średniej ruchomej, usunięto przesunięcia stałoprądowe i rewerberacji sygnałów, użyto filtracji częstotliwościowej i morfologicznej, zastosowano wzmocnienie sygnałów z użyciem funkcji rozkładu energii, usunięto dudnienia z zapisów, wprowadzono poprawki statyczne oraz korekcję faz, zdefiniowano próg dyskryminacji amplitud, zastosowano wygładzającą filtrację macierzową. Ze względu na ograniczoną objętość artykułu pominięto w nim dokładny opis zastosowanych procedur i opis doboru odpowiednich parametrów do tych procedur – informacje takie można znaleźć w literaturze przedmiotowej, m.in. ReflexW (2011), Yilmaz (1994).

Wszystkie prezentowane w dalszej części artykułu wyniki badań GPR (Fig. 9–11) przedstawiono w formie rozkładu energii sygnałów georadarowych (tzw. amplitud chwilowych), wyznaczonych z transformaty Hilberta (Yilmaz 1994), i zaprezentowano je w postaci znormalizowanej do maksymalnej wartości amplitudy zapisu, tzn. do wartości tzw. bezpośredniej fali powietrznej; taki sposób prezentacji pozwala na wizualną interpretację poszczególnych fragmentów echogramów oraz korelację informacji pomiędzy kolejnymi profilami.

Na echogramy naniesiono słupki z informacjami z otworów badawczych, co pozwoliło na porównanie wyników badań otworowych i georadarowych; informacje otworowe przedstawiono, przyjmując następujące kolory: fioletowy – gliny, szary – gliny zażelazone, żółty – ochry zażelazone, ochry właściwe, zielony – podłoże skalne (flisz), niebieski – zwierciadło wody gruntowej.

Informacje otwore pozwoliły na wyznaczenie dla badanego ośrodka prędkości średniej $v_{sr} = 0.085$ m/ns. Prędkość tę wykorzystano do konwersji czasowo-głębokościowej, co pozwoliło na przedstawienie osi pionowej na echogramach w skali głębokości.

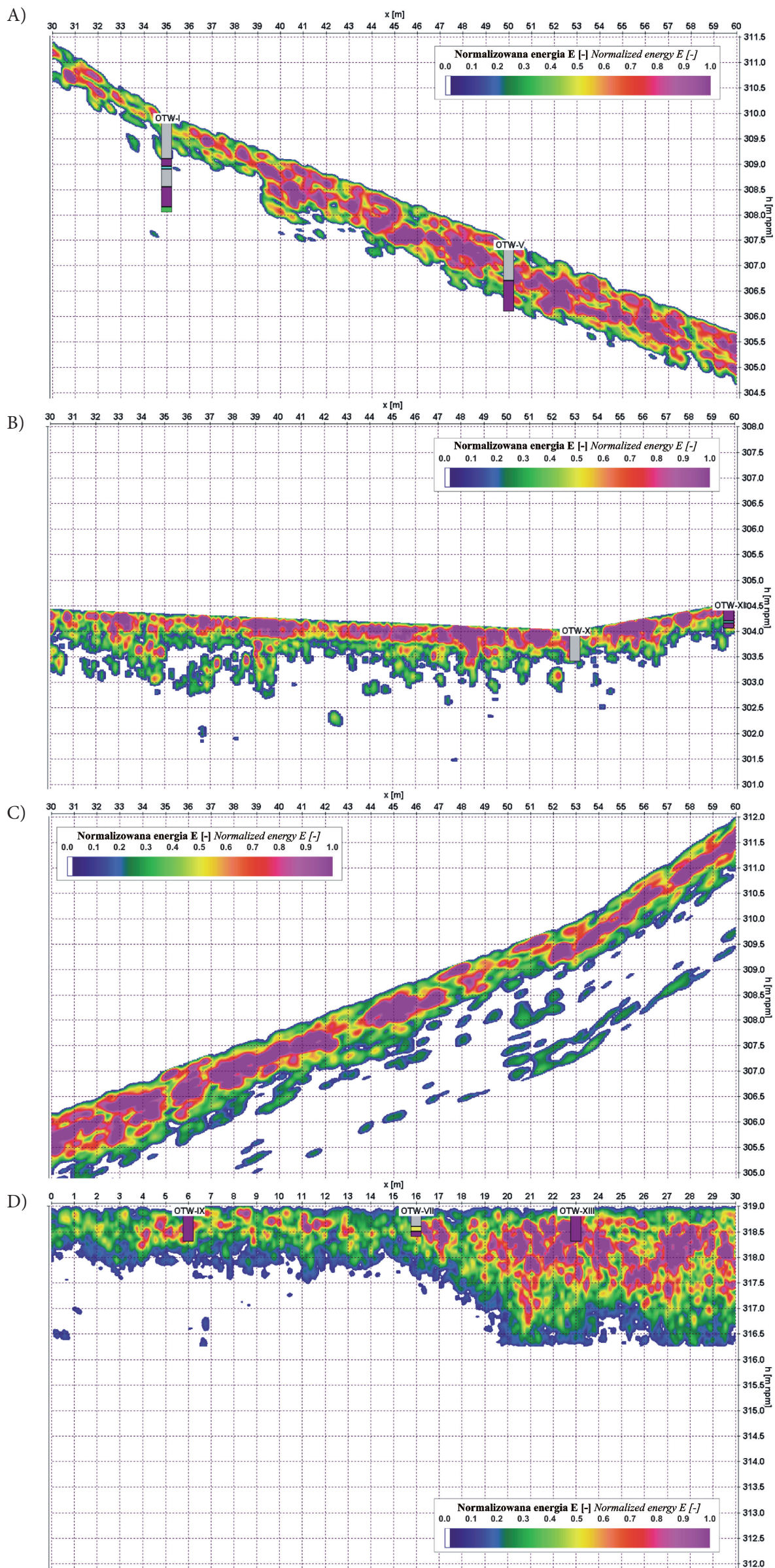


Fig. 9. Wybrane fragmenty echogramów z badań rekonesansowych dla profili: A) nr 1; B) nr 2; C) nr 4; D) nr 5

Fig. 9. Selected radargrams from preliminary surveys for profiles: A) no. 1; B) no. 2; C) no. 4; D) no. 5

Analizując echogramy z pierwszego etapu badań (Fig. 9 na wklejce), można zauważyć szybki zanik rejestracji z głębokością, zwłaszcza po południowej stronie bagna oraz w samym bagnie (Fig. 1B); rejestrowanie czytelnych zapisów jedynie do głębokości ok. 1.5 m spowodowane jest silnym tłumieniem fali e.m. w glinach nasyconych wodą (rejon bagna) (Fig. 9B) oraz w suchych glinach zażelazionych (Fig. 9A). Trudno też na figurze 9A, B jednoznacznie wyznaczyć strefy przejścia od glin przez gliny zażelazone do utworów ochrowych, co spowodowane jest wysoką przewodnością elektryczną (a więc tłumieniem) glin zażelazionych oraz występowaniem w obszarze bagiennym mieszaniny gliny, odłamków skalnych, butwiejących roślin, w różnym stopniu nasyconych wodą. Rejon bagna powinien więc zostać przebadany w celu okonturowania nagromadzeń ochrowych, przez zaprojektowanie gęstej sieci otworów, oraz poboru próbek do badań laboratoryjnych.

Znacznie lepsze rejestracje uzyskano w przypadku profili zaprojektowanych po północnej i wschodniej stronie badanego rejonu (Fig. 1B). Echogramy profilu nr 4 (Fig. 9C) oraz profilu nr 5 (Fig. 9D) pokazują, że w północno-wschodniej części rejonu badań istnieją warunki do znacznie lepszej propagacji fali e.m. (maksymalnie do głębokości ok. 3 m), pomimo występowania tutaj utworów gliniastych. Ponieważ w rejonie profilu nr 4 (Fig. 9C) nie przeprowadzono badań otworowych, zatem trudno było jednoznacznie interpretować zmiany na echogramie pod względem detekcji utworów ochrowych. Na profilu nr 5 (Fig. 9D) widać wyraźne strefy obniżenia energii sygnałów georadarowych w pewnych fragmentach tego profilu, m.in.: pomiędzy $x = 0$ m a $x = 4$ m i pomiędzy $x = 13$ m a $x = 16$ m oraz widoczna jest niekokszałtna strefa anomalna (strefa obniżenia energii sygnałów) pomiędzy $x = 23$ m a $x = 29$ m o głębokości ok. 1 m.

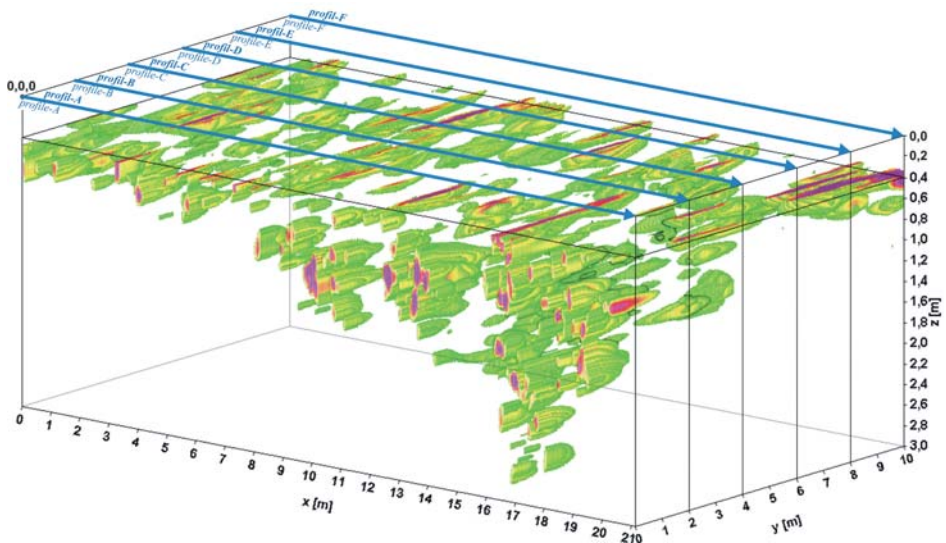


Fig. 10. Trójwymiarowa wizualizacja badań GPR w formie obwiedni stref wysokoenergetycznych

Fig. 10. Three-dimensional visualization of GPR surveys in form of envelop of high-energies regions

Na figurze 10 przedstawiono wyniki szczegółowych badań 3D przeprowadzonych w rejonie profilu nr 5 i otworów nr VII, VIII, IX. Rozkład anomalii charakteryzuje się znacznymi wahaniami energii, co obrazują strefy jej nagłego zaniku (rejonny zaznaczone białym kolorem) w stosunku do otaczających rejonów wysokoenergetycznych (kolory żółte, zielone i fioletowe). Taki rozkład energii spowodowany jest z jednej strony pewną niejednorodnością i anizotropią ośrodka przypowierzchniowego, co jest efektem m.in. procesów kongelifrakcji, sufozji i wietrzenia. Z drugiej strony strefy największego zaniku energii sygnałów można przypisać obszarom z nagromadzeniami utworów o zawartości Fe powyżej 20–30% (tzn. ochry żażelazone i ochry właściwe).

Aby dokładnie zlokalizować strefy najniższych energii, sześcian pokazany na figurze 10 został przecięty do głębokości 1 m czterema płaszczyznami równoległymi do powierzchni terenu. Na figurze 11 (na wklejce) interpretowano obszary niskoenergetyczne zaznaczone kolorami białym i granatowym jako rejonny występowania ochry karpackiej.

Na figurze 11A za najważniejsze strefy anomalne można przyjąć obszar pomiędzy $x = 13.5$ m a $x = 18.5$ m i $y = 3$ m do $y = 6$ m oraz drugi, mniejszy obszar z centrum na $x = 5.5$ m i $y = 5$ m. Trudno jednoznacznie interpretować dużą strefę anomalną ulokowaną na $x = 20.5$ m, rozciągającą się od profilu A do profilu D, ponieważ znajduje się ona na granicy obszaru badań 3D.

Na figurze 11B zaznacza się kilkanaście małych niskoenergetycznych anomalii (kolory grantowe), z których najważniejsze mają centra o współrzędnych: $x = 12$ m i $y = 6$ m oraz $x = 3$ m i $y = 2$ m.

Na figurze 11C widocznych jest kilka drobnych anomalii oraz jedna duża pomiędzy $x = 11$ m a $x = 13$ m i $y = 5$ m a $y = 9$ m; anomalia ta jest pionową (głębokościową) kontynuacją anomalii z figury 11B, której centrum ulokowane jest na $x = 12$ m i $y = 6$ m.

Brak refleksów (białe kolory) na figurze 11D spowodowany jest występowaniem na głębokości ok. 1 m lepiej skonsolidowanych utworów fliszowych (podłoże skalne), nie-stwarzających warunków do odbijania się fali elektromagnetycznej. Jako strefy anomalne, które można byłoby korelować na figurze 11D z nagromadzeniem utworów ochrowych, można wskazać strefy obniżenia energii, które są kontynuacją anomalii z figury 11C, tzn. anomalie z centrami na $x = 12$ m i $y = 7$ m oraz na $x = 15$ m i $y = 9$ m, a także na $x = 16.5$ m i $y = 6$ m.

Charakterystyka rejestracji pokazanych na figurach 9–11 oraz analiza wyników badań GPR przeprowadzona w niniejszym rozdziale jest podstawą do stwierdzenia, że dalsze, szczegółowe badania geofizyczne w omawianym rejonie mają jedynie sens na wschód od otworów nr VII, VIII, IX. Badania georadarowe powinny być prowadzone po długim okresie bez opadów, z zastosowaniem wysokorozdzielczej aparatury do badań 3D, np. systemu MIRA 400 MHz firmy MALA Geoscience. W celu uzyskania dodatkowych informacji o przestrzennym rozkładzie utworów ochrowych w rejonie otworów nr VII, VIII, IX (Fig. 1B) należałoby przeprowadzać uzupełniające badania geofizyczne przy zastosowaniu profilowania elektromagnetycznego (tzw. konduktometria), badań magnetometrycznych oraz obrazowania elektrooporowego. Takie kompleksowe badania geofizyczne w zestawieniu z informacjami z gęstej sieci otworów badawczych dałyby podstawę do przejścia od interpretacji jakościowej do ilościowej.

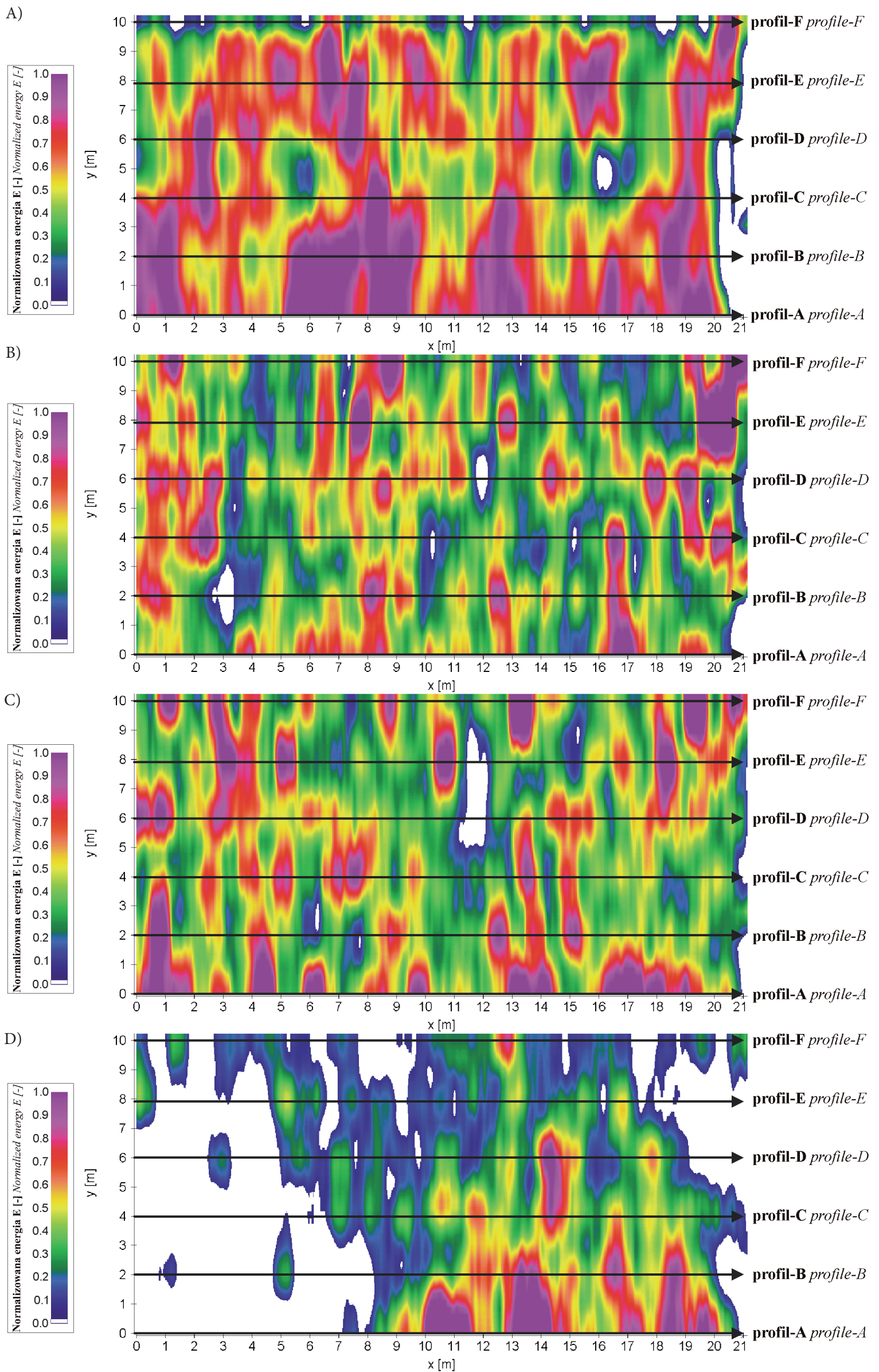


Fig. 11. Cięcia głębokościowe równoległe do płaszczyzny pomiarowej (x - y) na głębokościach: A) $z = 0.25$ m; B) $z = 0.50$ m; C) $z = 0.75$ m; D) $z = 1.00$ m

Fig. 11. Depth slices in x - y plane at depths: A) $z = 0.25$ m; B) $z = 0.50$ m; C) $z = 0.75$ m; D) $z = 1.00$ m

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione w artykule wyniki badań geologicznych i geofizycznych pozwoliły na sformułowanie wniosków na temat możliwości i ograniczeń zastosowania techniki GPR do lokalizacji nagromadzeń ochry karpackiej zalegających w utworach fliszowych. Dane geologiczne z otworów badawczych pozwoliły na oszacowanie pod względem jakościowym zmian rejestrowanych na echogramach oraz dały podstawę do wytypowania rejonu najbardziej perspektywicznego, jeśli chodzi o możliwość prowadzenia szczegółowych badań georadarowych w układzie trójwymiarowym.

Jak pokazały wyniki badań GPR, technika ta może być z powodzeniem stosowana do okonturowania stref podwyższonej koncentracji żelaza w górotworze karpackim, jak to ma miejsce między innymi w przypadku badanych utworów ochrowych. Ograniczeniem tej techniki pomiarowej jest natomiast jej mały zasięg głębokościowy (maksymalnie do kilku metrów pod poziomem terenu), a także niestabilność budowy geologicznej w przypowierzchniowych strefach, zazwyczaj silnie zwietrzałych. Można więc sądzić, że zlokalizowanie miejsca nagromadzenia ochry bez badań geofizycznych byłoby trudne. Z kolei interpretacja danych georadarowych jest pełniejsza w przypadku dysponowania również wynikami badań mineralogiczno-geochemicznych. Wynika stąd, że optymalnym rozwiązaniem, dającym nadzieje na uzyskanie pozytywnych rezultatów badań, jest zastosowanie zróżnicowanych i uzupełniających się metod badawczych.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych WGGIOŚ AGH nr 11.11.140.766 oraz 15.11.140.043.

LITERATURA

- Bolewski A., 1992. *Encyklopedia surowców mineralnych H-O*. Wydawnictwo CPPGSMiE PAN, Kraków.
- Jol H.M., 2009. *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Elsevier Science, Oxford.
- Karczewski J., 2007. *Zarys metody georadarowej*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Kondracki J. 2002. *Geografia regionalna Polski*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Kotlarczyk J. & Ratajczak T., 2002. *Ochra karpacka z Czerwonek Hermanowskich koło Tyczyna*. Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Krupka J., Derzakowski K., Janezic M.D. & Baker-Jarvis J., 2004. TE01delta Dielectric Resonator Technique for Precise Measurements of the Complex Permittivity of Lossy Liquids at Frequencies Below 1 GHz. *Proceedings of Conference on Precision Electromagnetic Measurements*, London, 469–470.
- Plewa M. & Plewa S., 1992. *Petrofizyka*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- ReflexW, 2011. *Instrukcja oprogramowania*. SandmeierGeo, Niemcy.

- Ryka W. & Maliszewska A., 1991. *Słownik petrograficzny*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Sala D. & Gołębiowski T., 2011. Analiza możliwości zastosowania metody georadarowej do detekcji osadów ochrowych. W: Drzymała J. & Ciężkowski W. (red.), *Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii. T. 2*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 49–59.
- Sala D. & Rzepa G., 2011. Geology and mineralogy of ochreous sediments from Zabratówka – preliminary results. *Mineralia Slovaca*, 43, 1, 72.
- Yilmaz O., 1994. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA.

SUMMARY

Our main goal was a comprehensive geophysical and geological study on the ochre sediments in Zabratówka village, located about 20 km south-east from Rzeszów. The area is situated in the eastern part of the Outer Carpathians, within the Dynowskie Foothills, which comprise of Skole unit formations.

In the primary phase of the research, 14 boreholes were drilled in the area for visualization of geological structures and for collecting ground samples for further laboratory measurements (Fig. 1). It was found that the accumulations of ochre sediments vary in color. These variations range from yellow through different shades of red to brown. Also, in several cases the presence of cemented ferruginous concretions could be observed (Fig. 2A). Moreover, iron compounds are dispersed in brown, grey and bluish clays (Fig. 2B).

The geochemical characteristics show that in the ochre sediments the content of iron and manganese, both total (after dissolution in HF and HCl) as well as the amount associated with amorphous oxides (after extraction with oxalic buffer), changes significantly depending on the location and sample type. The total iron content varies from 6.66 wt. % to 48.04 wt. % in ochre and ferruginous concretions. Relatively large amounts of Fe may also be found in the surrounding clay – ranging from 3.28 to 13.61 wt. %. The content of iron extracted with oxalic buffer ranges from 0.69 to 20.94 wt. % in the case of ochre and 1.24–8.68 wt. % in the case of clays. Concentration of manganese in samples of ochre and ochre clays are significantly lower, ranging 0.004–1.188 wt. % and 0.018–0.239 wt. %, respectively.

The results of diffractometry and scanning electron microscopy analyses indicate that goethite is the dominant iron mineral phase present in the ochre (Figs 3, 4). The ochre clay is mostly composed of clay minerals (illite, smectite). Additionally, variable quantities of goethite and clastic minerals – quartz and feldspar (Figs 5, 6) are also present.

The petrophysical measurements of relative complex electrical permittivity ϵ^* [–] and electrical conductivity σ [mS/m] were carried out for four ground samples, specific to the research site. The relationship between changes of ϵ^* and Fe content in ground samples is presented in figure 7.

Laboratory tests of electrical conductivity were performed for various water amounts in the ground samples and the results of these measurements with correlation to Fe contents in ground samples are presented in figure 8.

The main conclusions drawn from petrophysical measurements (Figs 7, 8) are as follows:

- it is impossible to distinguish anomalies which contain less than 30% Fe. This is because contrasts of ϵ^* between anomalies and the surrounding medium are too low, but detection of typical ochre is still possible;
- strong differences in values of σ are observed between clays and ochres, therefore ochrous anomalies might be detected based on the presence of characteristic shadow zones in radargrams;
- much stronger contrast of σ is observed for dry rather than for wet ground, so GPR measurements should be carried out in dry conditions.

The results of 2D GPR measurements using 500 MHz antenna are presented in figure 9. Analysis of radargrams from preliminary surveys (Fig. 9) indicate the presence of very strong attenuation (i.e. low depth penetration of electromagnetic wave) at the research site. It is also difficult to distinguish ochres concentration from these results areas. Since the only reasonable results were recorded along profile no. 5, this area was chosen for detailed 3D GPR surveys. General information about three-dimensional GPR anomalies distribution was presented in figure 10. For detailed analysis, information from figure 10, a 3D cube was cut by x - y planes in different depths and the results of this operation in form of depth slices are presented in figure 11.

Considering information derived from petrophysical measurements the following main anomalies (i.e. probable ochres concentrations) may be identified:

- a) in figure 11A – between $13.5 \text{ m} < x < 18.5 \text{ m}$ and $3 \text{ m} < y < 6 \text{ m}$ and anomaly with central point at $x = 5.5 \text{ m}$ and $y = 5 \text{ m}$;
- b) in figure 11B – two anomalies with central points at $x = 12 \text{ m}$, $y = 6 \text{ m}$ and $x = 3 \text{ m}$, $y = 2 \text{ m}$;
- c) in figure 11C – large anomaly which spreads from $x = 11 \text{ m}$ to $x = 13 \text{ m}$ and from $y = 5 \text{ m}$ to $y = 9 \text{ m}$;
- d) in figure 11D – three anomalies with central points at $x = 12 \text{ m}$, $y = 7 \text{ m}$ and $x = 15 \text{ m}$, $y = 9 \text{ m}$ and $x = 16.5 \text{ m}$, $y = 6 \text{ m}$.