



Geometryzacja form zjawisk krasowych na podstawie badań metodą georadarową

Łukasz Ortyl¹



Geometrization of karst phenomena based on GPR research. *Prz. Geol.* 67: 252–269; doi: 10.7306/2019.23

Abstract. Recognition of subsoil in areas threatened with discontinuous deformation associated with the existence of natural and mining voids can be implemented by various geophysical methods. The purpose of such research, apart from confirming the existence of voids, is to determine their spatial extent. This is not a simple issue, regardless of the geophysical method used. This paper discusses the possibilities of geometrization of karst phenomenon localization using the ground penetrating radar (GPR) method by the example of a karst cave as a natural void. The area of data acquisition is located on limestone formations with numerous karst forms. The study object is the main hall of the karst cave with a height of up to 3 m, located at a depth of 3 to 7 m below the surface. Such location and shape of the subsurface structure made it possible for the author to perform a wide range of research. Their original aspects are presented in this paper. The shape of the hall was obtained using terrestrial laser scanning (TLS). The GPR data were obtained employing the 250 MHz shielded antenna that was directly positioned using a robotized total station with the option of automatic target tracking. Thus, the GPR and geodetic data were immediately achieved in a uniform coordinate system. The accuracy of the data obtained in this way is discussed in this paper. The author's original algorithm for processing of GPR data into a point cloud is presented. Based on the results obtained, it was possible to compare the GPR signal, which represents the shape of the cave hall, in relation to its image in the form of a point cloud from terrestrial laser scanning. A unique part of this paper is the selection of filtration procedures and their parameters in optimal GPR data processing, which were widely discussed and documented in a way beyond the standard filtration procedures. A significant contribution is the analysis that was carried out on the data obtained in the field and on the model data generated using the finite difference method. Modeling was carried out for two wave sources: exploding reflector and point. The presented methodology and discrimination between the actual shape of the cave, GPR field data and model data made it possible for the author to draw many conclusions related to the possibilities of shape geometrization of the subsurface voids determined by the GPR method.

Keywords: ground penetrating radar (GPR), karst, limestones, cave, voids, finite differential time domain (FDTD), terrestrial laser scanning (TLS)

Budownictwo drogowe to jeden z największych obszarów inwestycyjnych. Właściwe rozpoznanie podłoża gruntowego w drogownictwie jest sprawą niezwykle istotną w procesie projektowania inwestycji budowlanych. Pozwala ograniczyć dodatkowe koszty na etapie realizacji i w czasie eksploatacji obiektów inżynierskich. W myśl przepisów Eurokodu 7 (PN-EN 1997-2) jednym z narzędzi wspomagających proces rozpoznania podłoża są badania prowadzone metodami geofizycznymi (Dec, 2010; Štěpančíková i in., 2011; Mościcki i in., 2014; Tomecka-Suchoń, Marcak, 2015; Oryński i in., 2016; Bestyński i in., 2017).

Rozpoznanie podłoża gruntowego prowadzone z zastosowaniem różnych metod geofizycznych jest standardowo realizowane w celu pozyskania przekroju geofizycznego 2D. Wykonanie kilku profili geofizycznych daje możliwości przestrzennego okonturowania zmian ośrodka (Czarniak i in., 2017; Popiołek i Pilecki, 2005; Popiołek i in., 2008; Zieliński i in., 2016). Takie podejście pozwala oszacować zasięg rozpoznanych utworów, co jest szczególnie istotne przy projektowaniu wzmocnienia, ocenie stateczności i wymianie gruntów.

Każda z metod geofizycznych ma swoje zalety i ograniczenia. Mimo upowszechniania się sprzętu geofizycznego na rynku, często brakuje jasnych zasad realizacji prac z ich zastosowaniem w rozpoznaniu podłoża gruntowego.

W realiach krajowych istniejąca *Instrukcja badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych* (Instrukcja..., 1998), która powstała na potrzeby Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych w 1998 r., wskazuje na możliwości stosowania metod geofizycznych, ale nie reguluje zasad prowadzenia pomiarów, doboru narzędzi i sprzętu pomiarowego w zależności od problematyki badań. Niewłaściwe podejście metodyczne może prowadzić do nadinterpretacji uzyskanych wyników.

Potrzeba dostosowania przepisów do bieżącego stanu technologicznego spowodowała, że w 2015 r. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) i Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR) w ramach wspólnego przedsięwzięcia Rozwój Innowacji Drogowych (RID) ogłosiły konkurs na realizację projektu *Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie*. Efektem rzeczowym zakończono go w 2018 r. grantu jest projekt *Wytycznych badań podłoża budowlanego w drogownictwie* (w dalszej części tekstu nazywane *Wytycznymi*) (Sokołowska i in., 2017; Borecka, Ostrowski, 2017), które stanowią bardzo obszerne rozszerzenie Zarządzenia nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dn. 23 listopada 2015 r. w sprawie dokumentacji do realizacji inwestycji (Zarządzenie, 2018).

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; lukasz.ortyl@agh.edu.pl

Zakres stosowania metod geofizycznych został ujęty w nich bardzo szeroko – od problematyki, poprzez dobór metod badań, po ich opracowanie i dokumentowanie.

Czynnikami determinującymi dobór i hierarchizację metod geofizycznych był zasięg oraz skuteczność reakcji na zmienność podłoża, a drugim w kolejności – wpływającym na rozdzielczość metody.

Ze względu na zasięg głębokościowy dominujące znaczenie przypisano metodzie tomografii elektrooporowej (*electrical resistivity tomography* – ERT), jako metodzie podstawowej. Jako wspomagające wskazano metody sejsmiczne, metodę georadarową (GPR) oraz konduktometryczną (*ground conductivity meter* – GCM).

Metoda georadarowa ma mniejszy zasięg rozpoznania niż pozostałe, natomiast zyskuje w obszarach, gdzie pozostałe posiadają ograniczenia w stosowaniu albo konieczne jest rozpoznanie wysokorozdzielcze. Wykazuje ona szczególnie skuteczną na granicach materiałów o dużym zróżnicowaniu względnych przenikalności elektrycznych i w materiałach o niskiej przewodności. Takie warunki występują na granicy powietrza i gruntu, powietrza i skały (zwłaszcza tej o wysokiej zwężności). W projekcie *Wytycznych...* metoda georadarowa jest szczególnie rekomendowana w detekcji płytkich (do kilku m p.p.t.) pustek naturalnych i antropogenicznych. Będą to rejony występowania zjawisk krasowych, pustek pogórnicych, zwietrzelin oraz granic między materiałami o niskiej przewodności a utworami o wysokiej przewodności.

Ujęte w projekcie *Wytycznych...* zapisy normują zależności stosowania i zasady realizacji badań geofizycznych na różnych etapach projektowania oraz realizacji inwestycji drogowych. *Wytyczne...* nie odnoszą się jednak do interpretacji pozyskiwanych wyników ze względu na złożoność problematyki. Przetwarzanie i interpretacja danych geofizycznych wymagają zrozumienia zjawisk, które zachodzą podczas propagacji sygnału dla różnych metod i parametrów pomiarowych. O ile przetwarzanie można częściowo zautomatyzować, to interpretacja nie podlega schematom. Różnorodność form przyrodniczych niejednokrotnie zaskakuje nawet osoby z dużym doświadczeniem.

Badania geofizyczne ze względu na wykorzystywane zjawiska i sposób realizacji pomiarów można zaliczyć do teledetekcyjnych metod pomiarowych. W badaniach tych występuje duża analogia możliwości i ograniczeń typowych dla teledetekcji powierzchniowej. Skuteczność metod jest determinowana przez wpływ środowiska propagacji na sygnał nadawany i/lub odbierany, rozdzielczość pomiaru i dokładność odtworzenia struktur. Czynnikiem silnie wpływającym jest zjawisko tłumienia sygnału, które ogranicza zasięg. Znaczny kłopot to tzw. efekt *clutter*, czyli echa sygnałów pochodzące od celów, które nie są przedmiotem pomiaru. Nie da się ich wyeliminować z przestrzeni propagacji i zakłócają sygnał użyteczny (DeMaio, Greco, 2016).

W teledetekcji powierzchniowej stosunkowo łatwo jest wypracować klucze interpretacyjne i wykonać pomiary kalibracyjne poprzez bezpośrednie działania terenowe lub na podacie obrazów w paśmie widzialnym. W przypadku badań geofizycznych jest to znacznie trudniejsze, ponieważ analizie podlega ośrodek zakryty. Kalibracja wyników badań geofizycznych realizowanych na obiektach antropogenicznych (inżynierskich) jest wykonywana dzięki dodatkowym informacjom, takim jak: typowa geometria konstrukcji, mapy, projekty (sieć uzbrojenia terenu, warstwy drogowe, ściany warstwowe, elementy zbrojenia,

wały przeciwpowodziowe). Inaczej zagadnienie wygląda w badaniach geofizycznych realizowanych na obiektach naturalnych typu warstwy litologiczne (Żuk, Sambrook Smith, 2015) czy zjawiska krasowe w podłożu (Łój i in., 2014) oraz obiektach antropogenicznych, takich jak nieregularne i niezidentyfikowane wyrobiska oraz pustki pogórnicy (Popiołek, Pilecki, 2005; Madej i in., 2018). W takich badaniach materiał kalibracyjny to przede wszystkim informacja z odwiertów, które mają swoje ograniczenia co do ilości oraz jakości i dokładności wykonania. Niekiedy wykonuje się kalibrację na odsłoniętych strukturach geologicznych, które występują w rejonie badań, ale i to podejście ma znaczne ograniczenia, gdyż pojawiają się efekty brzegowe (Karczewski i in., 2011).

Publikacja jest głosem w szerokiej dyskusji dotyczącej skuteczności i stosowania metod geofizycznych, szczególnie georadarowej, podczas rozpoznania i mapowania zmian struktury podłoża gruntowego. W publikacji przedstawiono rozważania na temat metodyki obejmującej problematykę rozpoznania zjawisk krasowych z zastosowaniem metody georadarowej. Szczególnie cennym elementem tekstu jest akcent jaki położono na pozyskanie bezpośrednio geolokalizowanych danych georadarowych oraz aspekt możliwości i ograniczeń geometryzacji rozpoznanych zjawisk krasowych. Zaprezentowano autorski algorytm przetwarzania danych GPR do postaci chmury punktów, jako podpowierzchniowego skanowania radarowego (*underground radar scanning* – UgRS). Znaczącym wkładem w obszar poszerzenia wiedzy jest ocena skuteczności procedur filtracyjnych przeznaczonych do uwiarygodniania geometrii i uczytelniania treści echogramów. Poruszony został również aspekt korelacji wyników modelowania prowadzonego na podstawie modelu pustki pozyskanego techniką (TLS) z danymi GPR z pomiarami rzeczywistymi. Modelowania FDTD danych GPR i ich przetworzenia zostały skonfrontowane bezpośrednio z chmurami punktów reprezentującymi jaskinię.

DEFINICJA PROBLEMU

Ze względu na uwarunkowania fizyczne skuteczność metody GPR jest zdeterminowana wzajemną zależnością względnych przenikalności elektrycznych sąsiadujących ze sobą ośrodków, która jest w uproszczeniu wyrażana mianem współczynnika odbicia Γ zgodnie z równaniem (Reynolds, 1997):

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \quad [1]$$

gdzie:

$\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}$ – względna przenikalność elektryczna sąsiadujących ze sobą ośrodków.

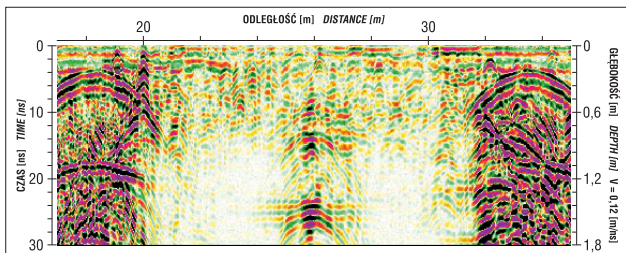
Rozróżnienie granic ośrodka w metodzie GPR jest już możliwe, gdy moc odbitego sygnału P_{Γ} jest wyrażona zależnością (Annan, 2000, 2001):

$$P_{\Gamma} = \left(\frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}} \right)^2 \geq 0,01 \quad [2]$$

Im większe jest zróżnicowanie względnych przenikalności elektrycznych sąsiadujących warstw, tym jest większa szansa na jednoznaczne odwzorowanie się granicy między nimi. Względna przenikalność elektryczna powietrza ma wartość równą 1 i jest co najmniej 3-krotnie mniejsza od wartości innych ośrodków. Występowanie pustych przestrzeni w formach naturalnych lub antropogenicznych powoduje, że ich obecność ujawnia się wyraźnie w zobrazeniach georadarowych, szczególnie dla ośrodków o niskiej przewodności elektrycznej, czyli posiadających niski współczynnik tłumienia propagacji fali elektromagnetycznej. Granica dowolnego ośrodka i powietrza będzie więc dużo łatwiejsza w detekcji niż w przypadku zróżnicowanych warstw gruntu, które na granicy mogą się wzajemnie przenikać, skutkiem czego zobrazowanie granic będzie niejednoznaczne interpretacyjnie i geometrycznie. Zjawiska krasowe występują w skałach wapiennych, dla których względna przenikalność elektryczna mieści się w przedziale 6–11 (Karczewski i in., 2011). Przekłada się to na wartość współczynnika odbicia na poziomie 0,42–0,54, a moc odbitego sygnału w przedziale 0,18–0,29. Są to parametry wysoce korzystne do stosowania metody georadarowej.

Wiele przykładów potwierdza względnie wysoką skuteczność metody GPR w obszarze detekcji sieci uzbrojenia (Raichel, 2017) oraz lokalizacji płytkich krypt i tuneli (Pacanowski, Musiatowicz, 2005; Karczewski i in., 2011; Łyczak i in., 2018), które posiadają parametry fizyczne zbliżone do przywołanych powyżej form krasowych. Echogram prezentujący zobrazowanie georadarowe typowej krypty kościelnej zaprezentowano na rycinie 1. W zobrażowaniu po lewej i prawej stronie uwidacznia się widok krypt w przekroju poprzecznym. Jednoznacznie widoczny jest strop i podłoga w krypcie po lewej stronie. Po prawej stronie widać zaburzenie ciągłości podłogi wywołane obecnością dodatkowego wyposażenia zalegającego w krypcie. Anomalie w środkowej części echogramu również obrazują pustkę, ale o mniejszych rozmiarach, którym jest kanał instalacji grzewczej, prowadzący nadmuch ciepłego powietrza. W stropie kanału ujawniono silniejszą, małą anomalię o kształcie hiperboli, może ona świadczyć o istnieniu kabla energetycznego poprowadzonego w kanale.

Należy jednak zwrócić uwagę na pewną różnicę pomiędzy formą antropogeniczną a naturalną. Przywołane przykłady prezentują wyniki pozyskane na obiektach antropogenicznych o regularnym kształcie, co – powiązane z dodatkową wiedzą dokumentacyjną – ułatwia interpreta-



Ryc. 1. Echogram krypt kościelnych (aparatura Mala Geoscience RAMAC/GPR CUII antena ekranowana 500 MHz). Wyk. i oprac. Ł. Ortyl

Fig. 1. Echogram of church crypts (apparatus Mala Geoscience RAMAC / GPR CUII shielded antenna 500 MHz). Developed by Ł. Ortyl

cję. Głębokość ich zalegania nie jest też duża. Dla przewodów mieści się w zakresie 2 m, wyjątkowo 4 m p.p.t. Podobne wartości występują dla typowych krypt, piwnic i tuneli (budownictwo współczesne, historyczne). W przypadku zjawisk krasowych istotnych dla rozpoznania podłoża w drogownictwie będą to głębsze poziomy, z oczywistym uwzględnieniem możliwości metody GPR i przy odpowiednim doborze anten oraz parametrów pomiarowych.

W literaturze przedmiotu można znaleźć wiele opracowań dotyczących zastosowania metody georadarowej w rozpoznaniu zjawisk krasowych (Beres i in., 2001; Pavlic, Praznik, 2011; Gosar, 2012). Przedmiotem badań jest także konfrontacja wyników z metodą tomografii elektrooporowej ERT (Maślakowski i in., 2017; Mieszkowski i in., 2017; Tomecka-Suchoń i in., 2017) w obszarach o różnej budowie geologicznej. Obszerne badania walidacyjne metod geofizycznych przeprowadzono w ramach przywołanego projektu RID na 8 poligonach o zróżnicowanej budowie geologicznej. Na podstawie doświadczeń zdobytych podczas projektowania i realizacji tych badań sformułowano problematykę badawczą stanowiącą przedmiot niniejszej publikacji.

Wyniki pozyskane z zastosowaniem metod GPR i ERT na dwóch wybranych poligonach przedstawiono na rycinie 2 i 3. Celem zestawienia nie jest walidacja metod, ale przedstawienie podjętej problematyki.

Wysoką zgodność rozpoznania, ale jednak inną formę percepcji wyników, przedstawia przykład podany na rycinie 2. Wynik został pozyskany na poligonie, gdzie w podłożu występują wzajemnie przenikające się warstwy spoiste i niespoiste lessów oraz utworów lessopodobnych, poniżej których występuje podłoże skalne w postaci mioceńskich wapieni i margli (Czarniak i in., 2017).

Na rycinie 3 przedstawiono wynik pozyskany na obszarze krasowym, gdzie zgodność nie jest tak wysoka jak na rycinie 2. Wyniki metody GPR wskazują na istnienie struktur, które nie ujawniają się w zapisie metody ERT. Ponieważ dane zostały uzyskane w obszarze rozpoznanych zjawisk krasowych, nie ma wątpliwości co do genezy tych anomalii w zapisie GPR.

Przywołany przykład potwierdza fakt, że w obszarze detekcji zjawisk krasowych (lub wyrobisk i pustek pogórnich), gdzie brak jest regularności form, zawsze pojawia się pytanie o zakres informacji, którą uzyskuje się na podstawie echogramu GPR. Kluczowa do rozstrzygnięcia jest kwestia czy obraz z badania GPR informuje jedynie o zmienności struktury ośrodka, czy pozwala także na określenie położenia stropu i spągu pustki, a jeżeli tak, to w jakich warunkach jest to możliwe.

Zjawisko rozpoznania dwóch granic odbijających sygnał jest związane z pojęciem rozdzielczości pionowej i poziomej metody georadarowej, opisanych równaniami (Annan, 2001):

$$\Delta d \cong \frac{c}{4f \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad \Delta a \cong \sqrt{\frac{d \cdot c}{2f \cdot \sqrt{\epsilon_r}}} \quad [3a, b]$$

gdzie:

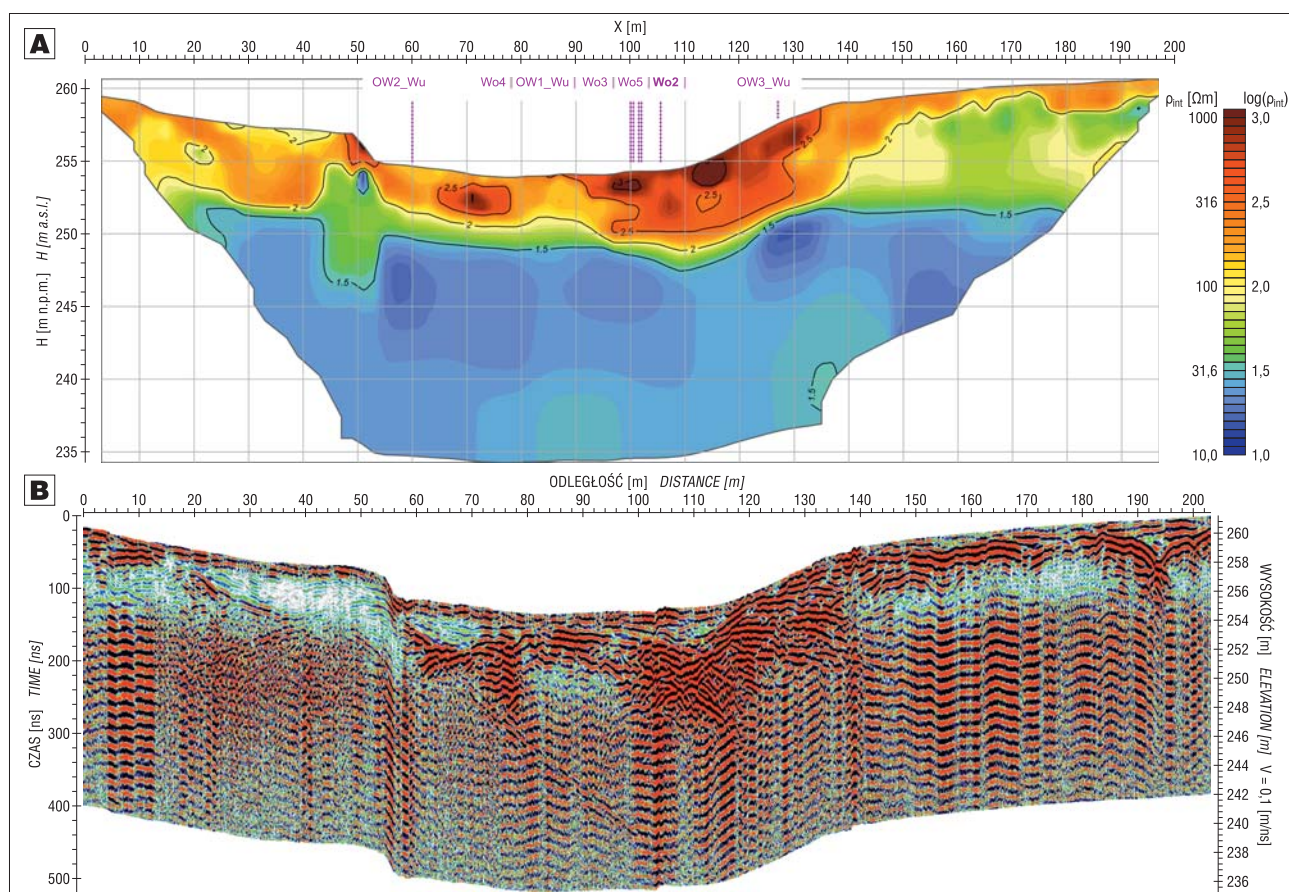
Δd – rozdzielczość pozioma,

Δa – rozdzielczość pionowa,

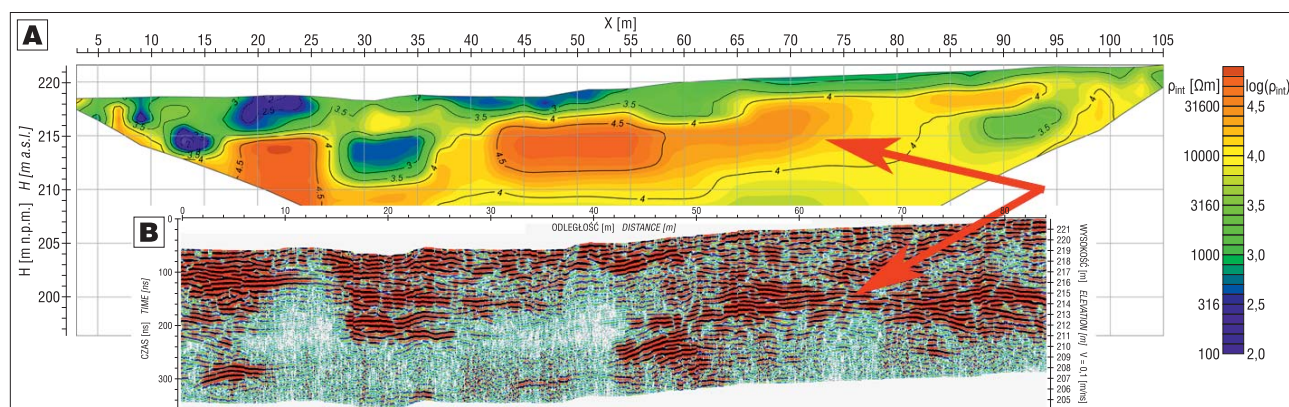
d – głębokość,

c – prędkość światła,

f – częstotliwość środkowa anteny.



Ryc. 2. Poligon badawczy 3-S19. **A** – wynik sondowań ERT (wyk. i oprac. J. Mościcki, G. Bania, AGH). **B** – wynik profilowań GPR (aparatura Mala Geoscience ProEx System, antena ekranowana 250 MHz) (wyk. i oprac. Ł. Ortyl, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, AGH)
Fig. 2. Test area 3-S19. **A** – ERT profile (developed by J. Mościcki, G. Bania, AGH), **B** – GPR profile (Mala Geoscience ProEx System, 250 MHz shielded antenna) (developed by Ł. Ortyl, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, AGH)



Ryc. 3. Poligon badawczy 11-Z. **A** – wynik sondowań ERT (wyk. i oprac. J. Mościcki, G. Bania, AGH). **B** – wynik profilowań GPR (aparatura Mala Geoscience ProEx System, antena ekranowana 100 MHz) (wyk. i oprac. Ł. Ortyl, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, AGH)
Fig. 3. Test area 11-Z. **A** – ERT profile (developed by J. Mościcki, G. Bania, AGH), **B** – GPR profile (Mala Geoscience ProEx System, 250 MHz shielded antenna) (developed by Ł. Ortyl, J. Karczewski, E. Mazurkiewicz, AGH)

Wartość dzielnika we wzorze 3a jest przedmiotem dyskusji. Anann (2001) podaje wartość 4, natomiast Noon i in. (1998) – ze względu na niepewność co do wartości rzeczywistej częstotliwości sygnału – bezpiecznie zalecają wartość dzielnika równą 2. W tabelach 1 i 2 podano obliczone wartości rozdzielczości pionowej i poziomej dla wybranych częstotliwości anten f , głębokości i względnej przenikalności elektrycznej przewodności dla skał wapiennych oraz powietrza (wg wzoru 3a, b).

W przypadku elementów sieci uzbrojenia terenu, krypt, piwnic i tuneli zalegających płytko stosuje się anteny wysokorozdzielcze. W takich wypadkach relacja wysokości krypty ok. 2 m do długości fali, np. dla anteny 500 MHz równej 15 cm (tab. 1) jest wielokrotnie większa. Wtedy wyróżnienie stropu i spągu jest możliwe (ryc. 1). Zaburzenie ciągłości widoku stropu i spągu w takim zapisie będzie z dużym prawdopodobieństwem świadczyć o zmianach w rozpatrywanej przestrzeni pustki w postaci gruzowiska

czy obiektów antropogenicznych (ryc. 1 – lewa ściana prawej krypty).

W przypadku zjawisk krasowych rozpoznanie jest prowadzone z zastosowaniem anten niskiej częstotliwości (mniejszych lub równych od 250 MHz), tak aby został zachowany kompromis pomiędzy zasięgiem głębokościowym a rozdzielczością pomiaru.

W przypadku badań głębszych warstw znacznie silniej będzie się ujawniał również wpływ związany z istnieniem zjawiska opisywanego jako strefa Fresnela lub ślad pokrycia (Pasternak, 2015). Jest to obszar, jaki pokrywa czoło fali o danej długości λ na danej głębokości w ośrodku o konkretnej wartości względnej przenikalności elektrycznej. Wraz ze wzrostem głębokości zwiększa się pole śladu pokrycia (tab. 3).

W literaturze opis zjawiska jest przedstawiany dla anten dipolowych. Kształt strefy Fresnela jest eliptyczny, a wartości półosi opisane są wzorami:

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{\epsilon_r - 1}}, \quad b = \frac{a}{2} \quad [4a, b]$$

gdzie:

a – długość półosi prostopadła do linii dipola,
 b – długość półosi równoległa do linii dipola.

W innych rodzajach anten stosowanych w georadarach strefa Fresnela będzie miała bardziej złożony kształt (Karczewski i in., 2011).

Zjawisko opisanego jako strefa Fresnela ma swoje konsekwencje w odzwierciedlaniu obiektów punktowych oraz liniowych. Jego efektem są korzystne interpretacyjnie hiperbole dyfrakcyjne (obiekty punktowe lub liniowe w przybliżeniu prostopadłe do kierunku profilowania, np. sieci przewodów) oraz niekorzystne zniekształcenia geometryczne dla warstw zapadających (Neal, 2004).

Kolejny czynnik, który ma wpływ na geometryczną interpretację liniowych struktur lokalizowanych z zastosowaniem georadaru, to topografia terenu, ponieważ zmienność topografii ma wpływ na kształt anomalii rejestrowanej na echogramie. Efekt ten nabiera znaczenia już przy pochyleniach terenu rzędu 6% (Lehmann, Green, 2000). Ciągła georeferencja 3D pomiarów georadarowych technikami geodezyjnymi, zapewniającymi dużą dokładność, jest dziś w pełni możliwa, jednak na razie rzadko stosowana przez wykonawców.

Zaburzenia geometrii rozpoznawanego obiektu będą również wynikały ze zmienności prędkości fali w różnych warstwach albo różnej głębokości zalegania stropu (np. płaska posadzka ulegająca uwypukleniu na rycinie 1).

W procesie przetwarzania danych georadarowych możliwe jest wprowadzenie zaawansowanych procedur filtracyjnych, potencjalnie częściowo eliminujących zniekształcenia, których genezę opisano powyżej. Procedura dekonwolucji jest stosowana w celu podniesienia rozdzielczości materiału pomiarowego i usunięcia refleksów wielokrotnych. Zabieg migracji ma przeciwdziałać skutkom zjawiska strefy Fresnela dla warstw zapadających. Migracja topograficzna zapobiega zniekształceniom wywołanym wpływem deniwelacji terenu na zobrazowanie georadarowe. Dla rozpoznania obiektów przestrzennych, jakimi są pustki, interesującym rozwiązaniem jest również filtracja polegająca na analizie amplitudy chwilowej sygnału z zastosowaniem transformacji Hilberta (Karczewski i in., 2011).

Zaprezentowane w dalszej części publikacji wyniki przekształceń echogramu wskazują na możliwości i ograniczenia przywołanych procedur filtracji. Dzięki nim jest możliwa odpowiedź na pytanie, jaki jest właściwy klucz interpretacyjno-korelacyjny dla rozpoznania zjawisk krasowych. Konfrontacji poddano teorię propagacji sygnału i modelowanie analityczne oraz wyniki prac terenowych. Problematyka ta jest istotna zarówno dla procesów projektowo-wykonawczych, jak i środowiskowych.

Tab. 1. Zestawienie wartości rozdzielczości pionowej, częstotliwości anten i względnej przenikalności elektrycznej przewodności dla skał wapiennych i powietrza

Table 1. Comparison of vertical resolution, antenna frequencies and relative permittivity for limestones and air

ϵ_r	f [MHz]							
	50	100	200	250	500	800	1000	2000
1	1,50	0,75	0,38	0,30	0,15	0,09	0,08	0,04
6	0,61	0,31	0,15	0,12	0,06	0,04	0,03	0,02
11	0,45	0,23	0,11	0,09	0,05	0,03	0,02	0,01

Tab. 2. Zestawienie wartości rozdzielczości poziomej dla wybranych częstotliwości anten, głębokości i względnej przenikalności elektrycznej dla skał wapiennych i powietrza

Table 2. Comparison of horizontal resolution, antenna frequencies, depth and relative permittivity for limestones and air

f [MHz]	ϵ_r	d [m]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	1	0,78	1,10	1,34	1,55	1,73	1,90	2,05	2,19	2,32	2,45
	6	0,50	0,70	0,86	0,99	1,11	1,21	1,31	1,40	1,48	1,56
	11	0,42	0,60	0,74	0,85	0,95	1,04	1,12	1,20	1,28	1,34
500	1	0,55	0,78	0,95	1,10	1,22					
	6	0,35	0,50	0,61	0,70	0,78					
	11	0,30	0,42	0,52	0,60	0,67					

Tab. 3. Zestawienie wartości długości półosi strefy Fresnela dla wybranych częstotliwości anten, głębokości i względnej przenikalności elektrycznej skał wapiennych

Table 3. Comparison of length values of the half-shaft of the Fresnel zone for selected antenna frequencies, depth and relative permittivity of limestones

f [MHz]	ϵ_r	d [m]									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	6	a [m]									
		0,57	1,02	1,46	1,91	2,36	2,81	3,25	3,7	4,15	4,60
	11	b [m]									
		0,41	0,72	1,04	1,36	1,67	1,99	2,30	2,62	2,94	3,25
	6	a [m]									
		0,28	0,51	0,73	0,96	1,18	1,40	1,63	1,85	2,07	2,30
11	b [m]										
	0,20	0,36	0,52	0,68	0,84	0,99	1,15	1,31	1,47	1,63	

OBSZAR BADAŃ

Badania georadarowo-geodezyjne zostały wykonane w Krakowie, w parku Skały Twardowskiego stanowiącego część Bielańsko-Tynieckiego Parku Krajobrazowego.

Obszar pola pomiarowego to fragment zrębu Zakrzówka – niewielkiej struktury tektonicznej o wyjątkowych walorach geologiczno-przyrodniczych. Geograficznie zręb Zakrzówka jest położony w obrębie mezoregionu Obniżenie Cholerzyńskie, stanowiącego część makroregionu Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej (Kondracki, 2002).

Struktura zrębowa powstała w wyniku ruchów tektonicznych zachodzących w miocenie. Badany obszar budują głównie wapienie uławiczone z krzemieniami, pochodzące z piętra oksfordu, których powstanie wiąże się z występowaniem na tym obszarze płytkiego, ciepłego morza epikontynentalnego (Sermet, Rolka, 2013). W podłożu wapiennym zachodzi proces krasowienia, którego następstwem są liczne struktury, takie jak zapadliska, leje krasowe oraz jaskinie (Jędrys, Krajewski, 2002).

Obszar badań zaznaczono na podkładzie planu jaskiń południowo-zachodniej części parku Skały Twardowskiego (ryc. 4).

METODYKA BADAŃ TERENOWYCH

Celem opisanych w publikacji analiz jest konfrontacja wyników zobrazowań georadarowych i efektów procedur ich przetwarzania w odniesieniu do rzeczywistego kształtu formy krasowej, jaką jest sala jaskini. Pozyskanie materiału wymagało realizacji pomiarów geodezyjnych i georadarowych. Prace badawcze przeprowadzono w Jaskini Twardowskiego i jej bezpośrednim sąsiedztwie. Jaskinia w swej głównej części jest bardzo dobrze rozpoznana. Z punktu widzenia zaplanowanych badań ma tę zaletę, że posiada łatwy dostęp do głównej części (<http://jaskiniepolski.pgi.gov.pl/>).

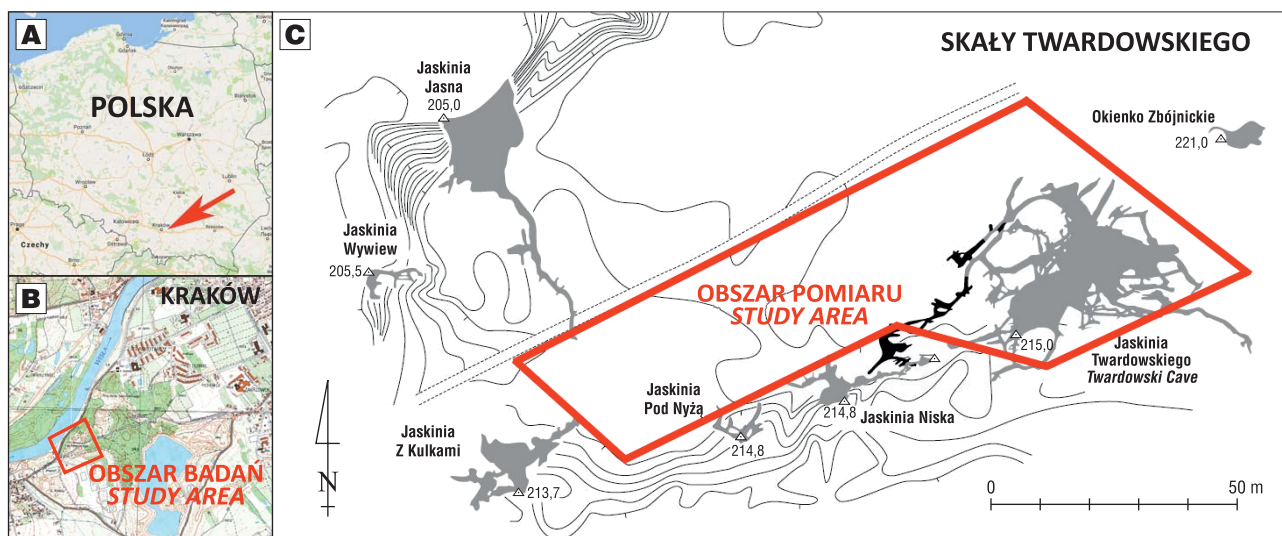
Pierwszy rodzaj czynności geodezyjnych obejmował pozyskanie charakterystyki geometrycznej sali głównej Jaskini Twardowskiego i numerycznego modelu terenu nad nią. W tym celu zrealizowano pomiary z wykorzystaniem techniki TLS. Wykonano je z zastosowaniem skane-

rów: fazowego Faro Focus3D S120 i impulsowego Leica ScanStation C10 lub tachymetru Leica Nova MS50. Skany połączono wzajemnie punktami homologicznymi, które dowiązano do państwowego układu współrzędnych PL-2000 przez wyznaczenie pozycji części z nich (osnowa skaningowa) pomiarem tachymetrycznym, na podstawie przygotowanej w tym obszarze osnowy pomiarowej nawiązującej do punktów wyznaczonych pomiarem GNSS RTN (ryc. 5).

Dzięki dokładności zastosowanych rozwiązań pomiarowych można oszacować, że chmura punktów reprezentująca model sali głównej i numeryczny model pokrycia terenu powinny być spójne w zakresie nieprzekraczającym 10 cm. Punkty osnowy z pomiaru GNSS RTN charakteryzuje błąd średni wzajemnego położenia na poziomie m_x , $m_y = \pm 0,01$ m, $m_z = \pm 0,02$ m. Stanowisko swobodne dla pomiarów tachymetrycznych punktów osnowy skaningowej zostało wyznaczone w dowiązaniu do 3 punktów osnowy GNSS z błędem średnim m_x , $m_y = \pm 0,001$ m, $m_z = \pm 0,02$ m. Punkty osnowy skaningowej charakteryzują błędy na poziomie m_x , m_y , $m_z = \pm 0,01$ m. Położenie punktu skanerem jest wyznaczane z błędem na poziomie 2 cm, w zależności od powierzchni i kąta odbicia. Wyrównanie wzajemne skanów z sali jaskini w odniesieniu do punktów osnowy skaningowej przeprowadzono ze średnim bezwzględnym błędem położenia $m_p = \pm 0,012$ m, a maksymalnym $m_{p,max} = \pm 0,045$ m, przy czym błąd maksymalny dla współrzędnej pionowej wyniósł $m_{z,max} = \pm 0,022$ m.

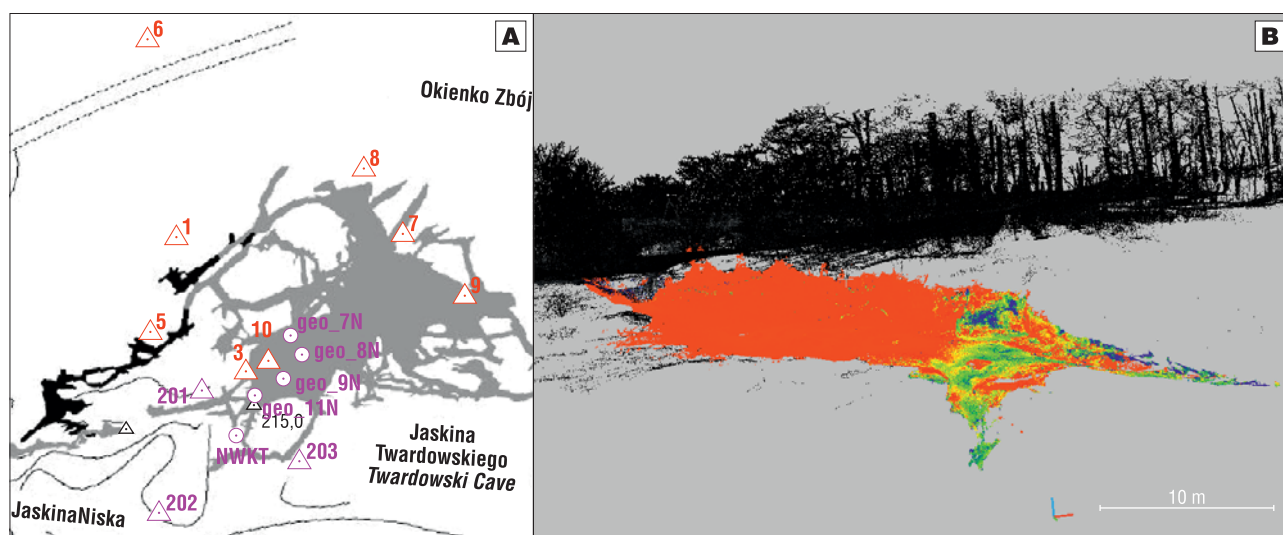
W Jaskini Twardowskiego i jej bliskim sąsiedztwie wspomnianym sposobem wykonano wiele profiliowań georadarowych o dowolnym przebiegu. Jednak na potrzeby publikacji, na podstawie chmury punktów obrazujących salę główną, wyznaczono przebieg dwóch dodatkowych profili georadarowych, które uznano za optymalne dla oceny postawionego problemu. Wyznaczono profil podłużny (P1) i poprzeczny (P2) w miejscach o maksymalnej wysokości sali, wynoszącej w przekroju ok. 3 m (ryc. 6A), które wytyczono w terenie metodami geodezyjnymi.

Pomiary georadarowe zrealizowano z zastosowaniem aparatury szwedzkiej firmy Mala Geoscience (obecnie Guideline Geo). Stosowano jednostkę centralną ProEx oraz antenę ekranowaną 250 MHz. Długość okna czasowego (czas nasłuchu sygnału powrotnego) przyjęto na poziomie



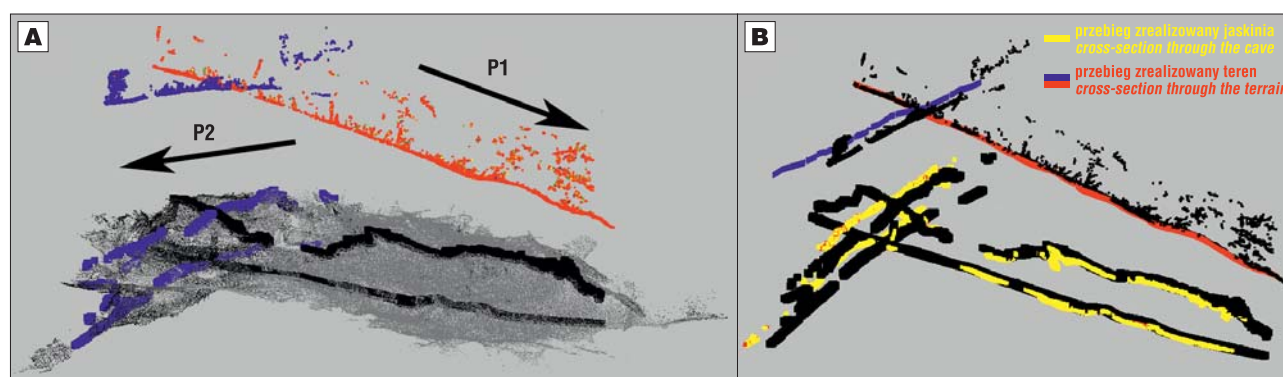
Ryc. 4. Lokalizacja rejonu badań. A – na mapie Polski, B – na planie Krakowa, C – na skalibrowanym planie jaskiń występujących w południowo-zachodniej części parku Skały Twardowskiego (na podstawie Górnego, 2007)

Fig. 4. Location of the research area. A – on the map of Poland, B – on the plan of Krakow, C – on the calibrated plan of caves occurring in the area of the south-western part of the Skala Twardowski Park (based on Górný, 2007)



Ryc. 5. Rozmieszczenie punktów osnowy geodezyjnej dla pomiarów TLS terenu i sali głównej Jaskini Twardowskiego (A) oraz wyrównane skany obrazujące relację teren–sala (B)

Fig. 5. Arrangement of geodetic control points for TLS measurements of the area and the main hall of the Twardowski Cave (A) and aligned scans depicting the terrain–hall relationship (B)



Ryc. 6. Przebieg profilowań georadarowych, widok terenu i przekrój przez jaskinię: A – planowany, B – zrealizowany

Fig. 6. Course of GPR profiling, terrain view and cross-section through the cave: A – planned, B – completed

360 ns, co przy najniższej teoretycznej prędkości rozchodzenia się fali radarowej w wapieniach wynoszącej 0,09 m/ns, pozwala osiągnąć potencjalny zasięg penetracji w głąb ośrodka do ok. 16 m. Dla najwyższej teoretycznej prędkości w wapieniach (0,12 m/ns) zasięg wzrasta do ok. 21 m. Rejestrację tras echogramu realizowano w interwałach co 5 cm. Częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła 2234 MHz. Liczbę złożów sygnału ustawiono na poziomie 16.

Podczas prac terenowych antena georadaru była na bieżąco pozycjonowana przy użyciu zestawu pomiarowego zaprojektowanego w Katedrze Geodezji Inżynierskiej i Budownictwa AGH w Krakowie. Zestaw umożliwia stosowanie zrobotyzowanych tachymetrów Leica i bezpośrednie przesyłanie wyznaczonej pozycji anteny do urządzenia realizującego akwizycję danych georadarowych (Karczewski i in. 2011). W tym wypadku zastosowano tachymetr zrobotyzowany MS50, który posiada możliwość śledzenia i wyznaczania ruchomej pozycji celu z potencjalną prędkością 10 Hz, a rzeczywistą roboczą w przypadku ruchomego celu na poziomie ok. 5 Hz (Ortyl i in., 2015). Bezpośrednie przesyłanie wyznaczonych pozycji pryzmatu dalmierczego umieszczonego na antenie GPR jest realizowane dzięki dostępnej w tym instrumencie transmisji danych do portu zewnętrznego z zastosowaniem protokołu

Pseudo-NMEA. Pomiary wykonano w dowiązaniu do układu PL-2000 poprzez przygotowaną w tym rejonie osnowę pomiarową.

Zastosowanie rozwiązania opartego na tachymetrze zrobotyzowanym jest o tyle korzystne, że profilowania w warunkach leśnych występujących nad jaskinią realizowano z wysoką skutecznością pozycjonowania anteny georadaru. W ten sposób unika się także błędów pozycjonowania, które mogą wystąpić przy stosowaniu GNSS w sytuacjach ograniczonego horyzontu, szczególnie w przypadku pomiarów wysokościowych.

Dokładność zastosowanych rozwiązań pomiarowych umożliwia oszacowanie, że przestrzenna pozycja anteny georadaru powinna być wyznaczona nie gorzej niż z błędem 5 cm w układzie PL-2000. Wartości tej nie należy jednak utożsamiać z dokładnością lokalizacji elementów podpowierzchniowych, a jedynie reflektora na antenie. Określenie błędów położenia obiektów podpowierzchniowych jest bardziej złożone (Lehmann, Green, 1999; Ortyl, Owerko, 2007).

Opisana metodyka działań spowodowała, że pozyskane dane georadarowe i chmurę punktów reprezentującą salę jaskini sprowadzono do jednego układu współrzędnych, co daje wysoko precyzyjny materiał wyjściowy do ich konfrontacji przestrzennej. Rzeczywisty przebieg

zrealizowanych profili ze względu na warunki terenowe nieznacznie odbiega (szczególnie P2) od przebiegu planowanego (ryc. 6B).

METODOLOGIA PRZETWARZANIA

Warianty filtracji danych georadarowych

Pozyskane dane georadarowe poddano procedurze filtracji z zastosowaniem oprogramowania ReflexW firmy Sandmeier Software.

Na wstępie zastosowano następującą standardową sekwencję procedur:

- przesunięcie pierwszego wstąpienia do poziomu zerowego (*move start time*),
- wyrównanie średniego poziomu sygnału do zera (*subtract-DC-shift*),
- usunięcie składowej niskoczęstotliwościowej (*subtract-mean (dewow)*),
- usunięcie refleksów poziomych – odjęcie średniej trasy (*background removal*),
- usunięcie części echogramu, w których nie ujawniały się istotne refleksy (*time cut*) (ryc. 7A2, B2).

W dalszej kolejności skonfrontowano efekty działania kolejnych procedur filtracyjnych wg schematu podanego w tabeli 4.

Poddany procedurom z tabeli 4 echogram P1 zaprezentowano na rycinie 8, przy tej samej skali współczynnika przemnożenia amplitudy sygnału. Można zauważyć, że zastosowanie sekwencji 2 skutkuje obniżeniem szumu w dolnej części echogramu, przez co sygnał użyteczny jest lepiej wydobyty z tła. Wniosek ten potwierdza wykres średniej trasy i spektrum częstotliwościowe sygnałów.

Na echogramach pomimo zastosowania filtra *background removal* są widoczne liniowe refleksy. Filtr ten eliminuje stałe, powtarzalne we wszystkich trasach i wzajemnie skorelowane informacje. Jednocześnie generuje niekorzystny efekt liniowy tam, gdzie na danej głębokości występują obszary bez i z silnymi odbiciami (na profilu P1 przedział 80–140 ns). Jest to wynik globalnego uśrednienia tras jako podstawy działania filtra.

Tab. 4. Zestawienie dwóch sekwencji filtracyjnych, jakim poddano dane pomiarowe

Table 4. List of two filtration sequences used for measurement data

Sekwencja 1 Sequence 1	Sekwencja 2 Sequence 2
Filtracja częstotliwościowa pasmo 50–400 MHz <i>1D – filter bandpassbutterworth, band 50–400 MHz</i>	wzmocnienie sygnału (<i>EnergyDecay</i>) <i>Gain filter EnergyDecay</i>
Wygładzanie 3×3 <i>2D – filter average xy-filter 3×3</i>	filtracja częstotliwościowa pasmo 50–400 MHz <i>1D – filter bandpassbutterworth, band 50–400 MHz</i>
Wzmocnienie sygnału (<i>EnergyDecay</i>) <i>Gain filter EnergyDecay</i>	wygładzanie 3×3 <i>2D – filter average xy-filter 3×3</i>

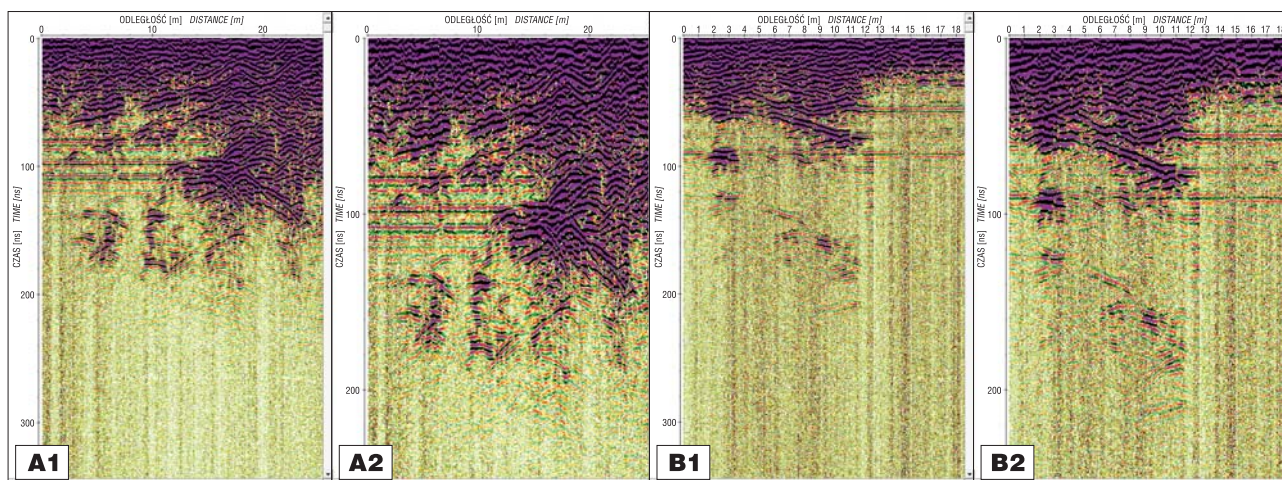
Eliminacja zjawisk liniowych jest możliwa poprzez zastosowanie co najmniej dwóch procedur filtracyjnych:

- średniej pełzającej (*subtracting average*),
- dwuwymiarowa transformacja Furiera pomiędzy dziedziną: czas–miejsce a częstotliwość–liczba falo-wa (*fk filter*).

Podczas stosowania średniej pełzającej należy zwrócić uwagę na dobór ilości tras (*traces*) georadarowych wchodzących do uśrednienia. Krótkie okno poniżej 10 tras osłabia sygnały użyteczne, długie zaś nie usuwa horyzontów liniowych. W przypadku analizowanych danych w ocenie jakościowej optymalna liczba tras to 100.

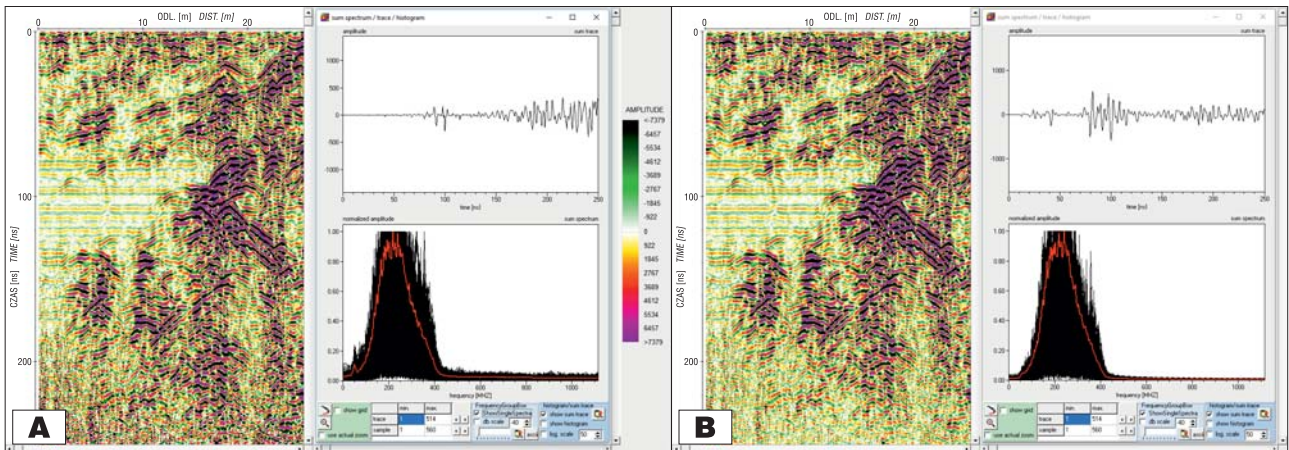
Przy stosowaniu filtracji *fk* w pierwszej kolejności jest generowane dwuwymiarowe spektrum *fk*. Wykorzystując filtr wycinający (*notchfilter*), należy wskazać obszar zakresu *k* bliski 0, gdzie gromadzi się energia horyzontów liniowych. Zbyt szeroki zakres obszaru w przestrzeni liczby falo-wej nie eliminuje zakłóceń horyzontalnych. Dobór wymaga wielu prób i jest bardziej czasochłonny od filtracji z zastosowaniem średniej pełzającej.

Zweryfikowano działanie wymienionych filtrów, wykorzystując przed zastosowaniem sekwencji 2. Filtracja *fk* nie poradziła sobie z usunięciem horyzontów liniowych (ryc. 9A2). Na rycinie 9B zaprezentowano dane tylko po

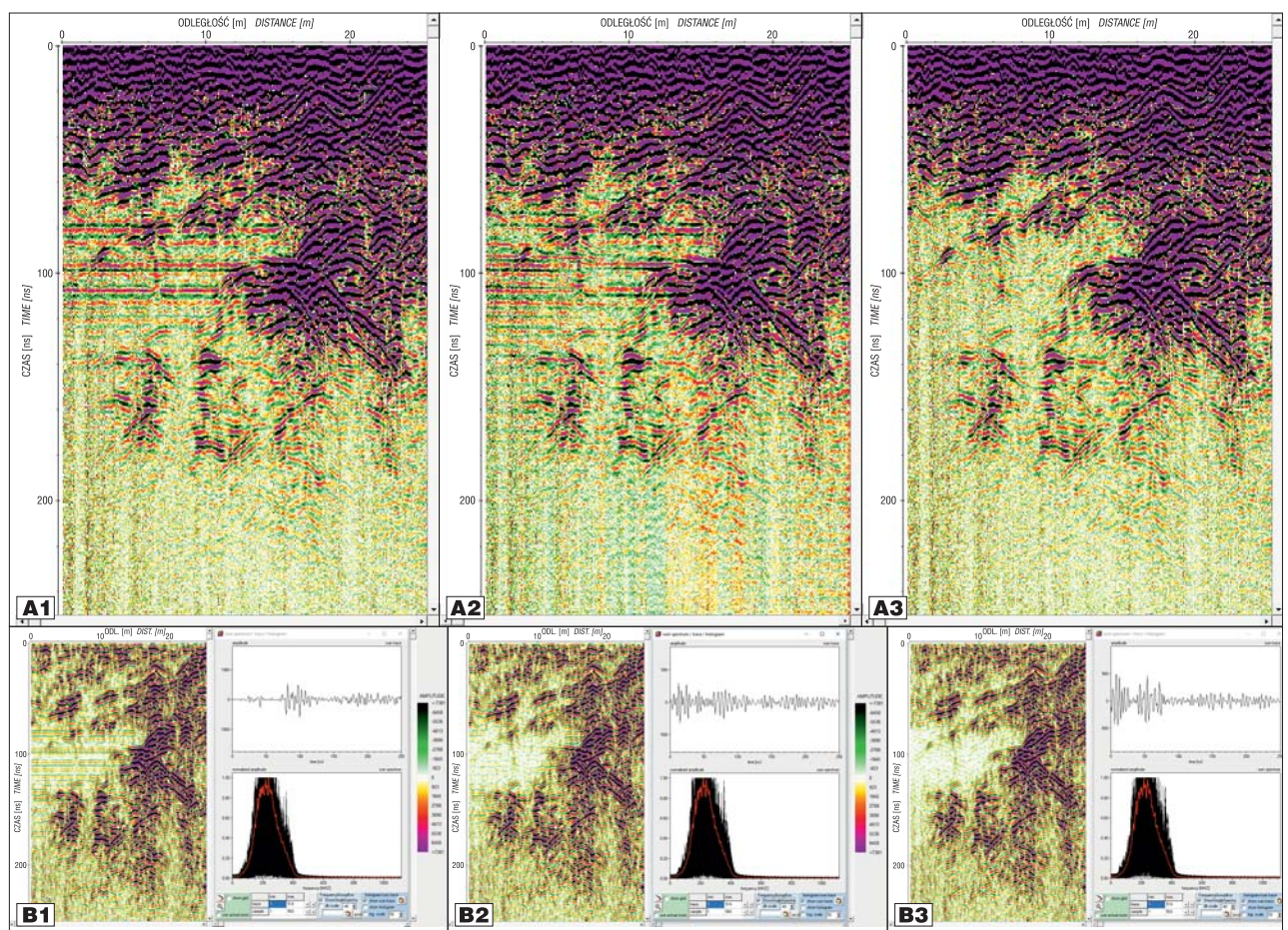


Ryc. 7. Echogramy: **A** – profilu podłużnego (P1) – wynik filtracji pełnej treści zarejestrowanego echogramu (**A1**) i po procedurze *time cut* (**A2**); **B** – profilu poprzecznego (P2) – wynik filtracji pełnej treści zarejestrowanego echogramu (**B1**) i po procedurze *time cut* (**B2**)

Fig. 7. Echograms: **A** – longitudinal profile (P1) – filtration result of the full content of the recorded echogram (**A1**) and after the time cut procedure (**A2**); **B** – transverse profile (P2) – filtration result of the full content of the recorded echogram (**B1**) and after the time cut procedure (**B2**)



Ryc. 8. Echogram P1 poddany procedurom sekwencji 1 (A) i sekwencji 2 (B)
 Fig. 8. Echogram P1 subjected to the procedures of sequence 1 (A) and sequence 2 (B)



Ryc. 9. Echogram P1: A – filtracja przed sekwencją 2 (A1), przed sekwencją 2 i z filtracją *fk* (A2), przed sekwencją 2 i ze średnią pełzającą (A3); B – filtracja po sekwencją 2 (B1), po sekwencji 2 i z filtracją *fk* (B2), po sekwencji 2 i ze średnią pełzającą (B3)
 Fig. 9. Echogram P1: A – filtration before sequence 2 (A1), before sequence 2 and with *fk* filter (A2), before sequence 2 and with subtracting average (A3); B – filtration by sequence 2 (B1), after sequence 2 and with *fk* filter (B2), after sequence 2 and with subtracting average (B3)

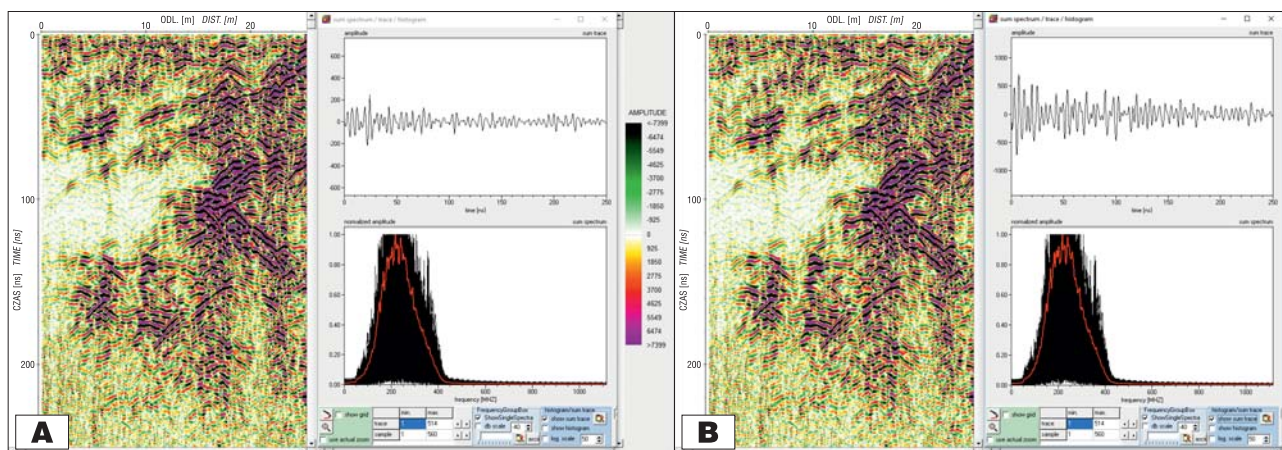
sekwencji 2 i wynik obu filtracji na danych po sekwencji 2. Średnia pełzającej skutecznie eliminuje występowanie horyzontów liniowych (ryc. 9B3). Dla działania filtracji *fk* sekwencja 2 ma korzystny wpływ (ryc. 9B2). Poprawia się skuteczność usunięcia horyzontów liniowych, natomiast na wykresie średniej trasy większe zróżnicowanie amplitudy sygnału pozostaje po filtracji średnią pełzającą.

Skonfrontowano również działanie średniej pełzającej stosowanej po i przed sekwencją 2 (ryc. 10). Jakościowo trudno uchwycić różnicę, jednak wykres sumarycznej trasy

wskazuje na wyraźniejszy kontrast sygnałów użytecznych do szumu, kiedy sekwencja 2 zostanie wykonana po zastosowaniu średniej pełzającej.

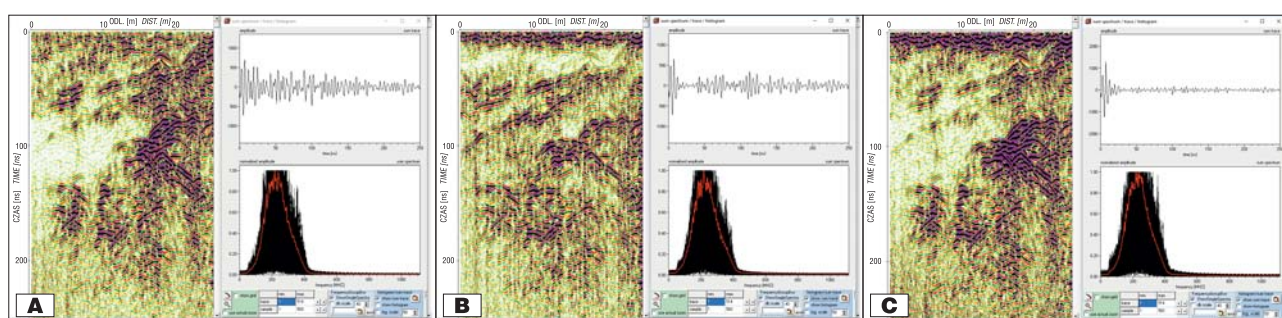
Porównano również działanie filtrów wzmacniających. Zastosowano trzy procedury:

- *EnergyDecay*;
- *Automatic gain control* – *AGC* – *Gain*, dla której optymalne przetworzenie obrazu uzyskano dla okna o długości 50 ns, dobranej iteracyjnie;



Ryc. 10. Echogram P1 po wykonaniu procedury średniej pełzającej po sekwencji 2 (A) i przed sekwencją 2 (B)

Fig. 10. Echogram P1 after the subtracting average procedure after sequence 2 (A) and before sequence 2 (B)



Ryc. 11. Echogram P1 po wykonaniu wg sekwencji 2 przy wzmacnieniu EnergyDecay (A), AGC (B) i Gain function (C)

Fig. 11. Echogram P1 after execution according to sequence 2 at EnergyDecay gain (A), AGC (B) and Gain function (C)

– *Gain function*, dla której optymalne przetworzenie obrazu uzyskano dla wartości wzmacnienia liniowego 0,6 [1/pulse width] i eksponencjalnego 1 [dB/m], dobranych iteracyjnie.

Efekt filtracji prezentuje rycina 11.

Ostatecznie dalsze prace na danych georadarowych realizowano po usunięciu części echogramu, w których nie ujawniały się istotne sygnały (*time cut*) na podstawie sekwencji filtrów: średnia pełzająca, wzmacnienie AGC, częstotliwościowy (*bandpassbutterworth*) – pasmo 50–400 MHz, wygładzanie 3×3 (*average xy-filter*).

Korekty geometryczne danych georadarowych i konwersja do postaci UgRS

Przefiltrowane dane georadarowe, nawet posiadające georeferencję, nie umożliwiają łatwego zestawienia przebiegu geometrycznego echogramu z przekrojem sali jaskini. Bezpośrednia konfrontacja wyników pomiarów georadarowych i geodezyjnych (chmura punktów) wymaga wzajemnej wizualizacji danych. W tym celu przetworzono echogramy do postaci chmury punktów.

Zdaniem autora dane georadarowe pozyskiwane z georeferencją bezpośrednią, przez analogię do danych ALS i TLS, można nazwać UgRS (*underground radar scanning* – podpowierzchniowe skanowanie radarowe). Analogicznie jak w przypadku pomiarów ALS/TLS, pomiar UgRS jest oparty na rejestracji emitowanej amplitudy fali elektromagnetycznej, która niesie informację o wartości intensywności odbitego od struktur ośrodka sygnału. Konwersja czasowa w oparciu o model prędkości pozwala na wyznaczenie przestrzennej pozycji punktu odbicia z dokładno-

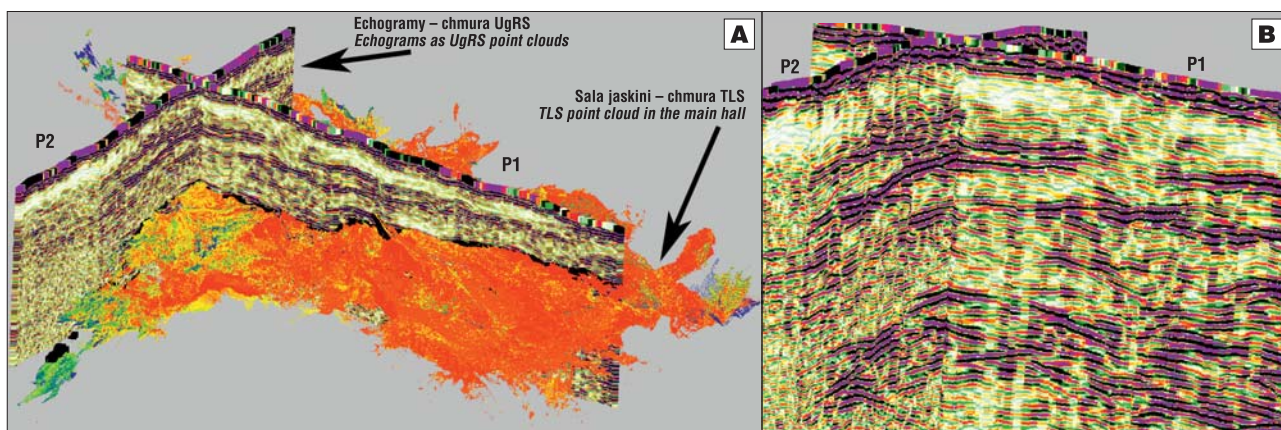
ścią adekwatną dla metody pomiaru i jej geopozycjonowania.

Przekształcen danych GPR do postaci chmury UgRS dokonano w oparciu o procedury autorskiego skryptu przygotowanego w środowisku Matlab i z wykorzystaniem możliwości programu ReflexW.

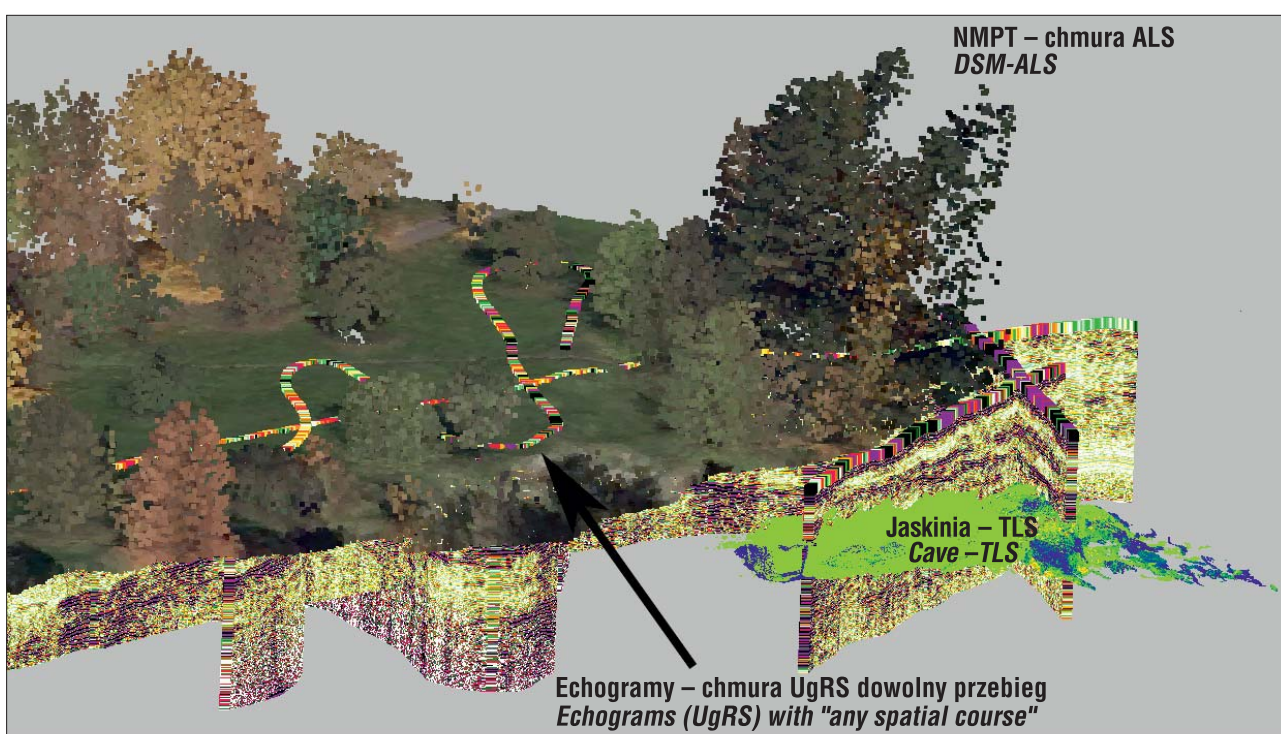
Przygotowane oprogramowanie składa się z dwóch modułów, które mają realizować w podanej kolejności następujące cele:

- konwersję danych terenowych, uzyskanych wspomnianym zestawem pomiarowym GPR – tachimetr zrobotyzowany, do postaci umożliwiającej przetwarzanie danych radarowych w wybranym programie, po dodaniu korekt związanych z ograniczeniami systemu do akwizycji danych (Ortyl, Owerko, 2007),
- przetworzenie danych georadarowych poddanych filtracji w programie realizującym przetwarzanie do postaci chmury punktów.

Pierwsza procedura jest realizowana na podstawie danych pozyskanych w wyniku przeprowadzanych prac terenowych zestawem GPR(Mala)-GNSS lub GPR–tachimetr zrobotyzowany. Moduł realizuje konwersję danych o położeniu anteny georadaru pozyskanych z programu GroundVision (zbiór *.lcf lub *.cor) do formatu programu ReflexW (zbiór *.utm). Aplikacja umożliwia zastosowanie procedury wygładzania danych wysokościowych, szczególnie z myślą o danych georadarowych pozyskanych z pozycjonowaniem GNSS. Stosowana jest średnia ruchoma z możliwością doboru okna uśredniania. Moduł posiada możliwość wprowadzenia korekt geometrycznych do pliku *.utm, zawierającego dane wejściowe do przeprowadzenia filtracji w programie ReflexW.



Ryc. 12. A – echogramy P1 i P2 jako chmury punktów UgRS w relacji chmury punktów TLS sali głównej Jaskini Twardowskiego; B – zgodność wyników georadarowych na przecięciu profili P1 i P2
Fig. 12. A – P1 and P2 echograms as UgRS point clouds in relation to the TLS point cloud in the main hall of the Twardowski Cave; B – consistency of GPR results at an intersection of P1 and P2 profiles



Ryc. 13. Prezentacja możliwości integracji danych ALS, TLS i echogramów (UgrS) o „dowolnym przebiegu” przestrzennym
Fig. 13. Presentation of the possibilities of data integration of ALS, TLS and echograms (UgrS) with “any spatial course”

Druga procedura skryptu korzysta z pliku wygenerowanego w programie ReflexW, umożliwia zapis przefiltrowanego echogramu z przypisaną georeferencją do pliku ASCII. Plik zawiera w pierwszym wierszu całkowitą liczbę punktów w chmurze, po której następuje strumień współrzędnych XYZ, wartości intensywności (intensywności odbicia wiązki laserowej) i kolorów w skali RGB dla kolejnych punktów. W oparciu o taki wzór przygotowujemy plik ASCII na podstawie echogramu, który będzie tożsamy chmurze punktów. Ważną opcją jest możliwość wyboru, czy trasy są prezentowane pionowo, czy jako pochylone, zgodnie z normalną do krzywej reprezentującej przebieg profilu na powierzchni terenu. Wartość pochylenia jest obliczana na podstawie wartości wysokości z danych geodezyjnych pliku *.utm.

Efektom finalnym opisanych przetworzeń jest możliwość pracy na danych georadarowych, jak na chmurach

punktów, co umożliwia ich łączną prezentację wraz z danymi innymi rodzajów: TLS (ryc. 12A), ALS (ryc. 13), wektorowymi i rastrowymi. Na uwagę zasługuje fakt zgodności treści echogramów pozyskanych na profilach poprzecznym i podłużnym, mimo pozyskania ich na terenie leśnym i o zmiennej niwelecie (ryc. 12B). Gwarantem takiego wyniku są obserwacje GPR – tachometr zrobotyzowany.

Zaprezentowane rozwiązanie przekształcania danych georadarowych stwarza możliwości szerszych analiz danych w aspekcie geometrycznym. Z tego powodu w projekcie *Wytucznych...* RID narzucono wymóg realizacji i dostarczenia danych georadarowych wraz z geopozycjonowaniem oraz wyeksportowanych do postaci plików ASCII zarówno surowych, jak i przetworzonych danych. Wymaga się również podania sekwencji procedur filtracyjnych i przyjętej prędkości dla konwersji czasowej. Pozwala to na pełną kontrolę pozyskanego materiału i swobodę w ponownym

przetwarzaniu danych oraz weryfikację ich interpretacji i możliwość integracji z dowolnymi danymi przestrzennymi (ryc. 13).

OPRACOWANIE I ANALIZA WYNIKÓW

Konfrontacja danych georadarowych z geometryczną reprezentacją sali jaskini (chmura TLS) wymaga nadania skali głębokościowej dla danych georadarowych. Teoretyczne wartości prędkości fali w skale wapiennej kształtują się w przedziale 0,09–0,12 m/ns (Karczewski i in., 2011).

Bezpośrednio w terenie, do określenia prędkości propagacji fali elektromagnetycznej w badanym ośrodku, realizuje się profilowanie prędkości WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*) lub CMP (*Common Mid-Point*) (Pasternak, 2015). W pracach terenowych zrealizowanych na potrzeby projektu RID, w bliskim sąsiedztwie Jaskini Twardowskiego i w podobnych warunkach wilgotnościowych (jesień, wiosna), wykonano profilowania prędkości WARR i CMP. Na podstawie 28 punktów charakteryzujących przebieg hiperboli (odległości od początku profilu i czasu akwizycji) wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów estymowaną wartość prędkości, która wyniosła 0,072 m/ns, a z metody CMP (20 punktów) – 0,082 m/ns (Ortyl i in., 2017). Wyznaczona wartość odbiega od danych tabelarycznych.

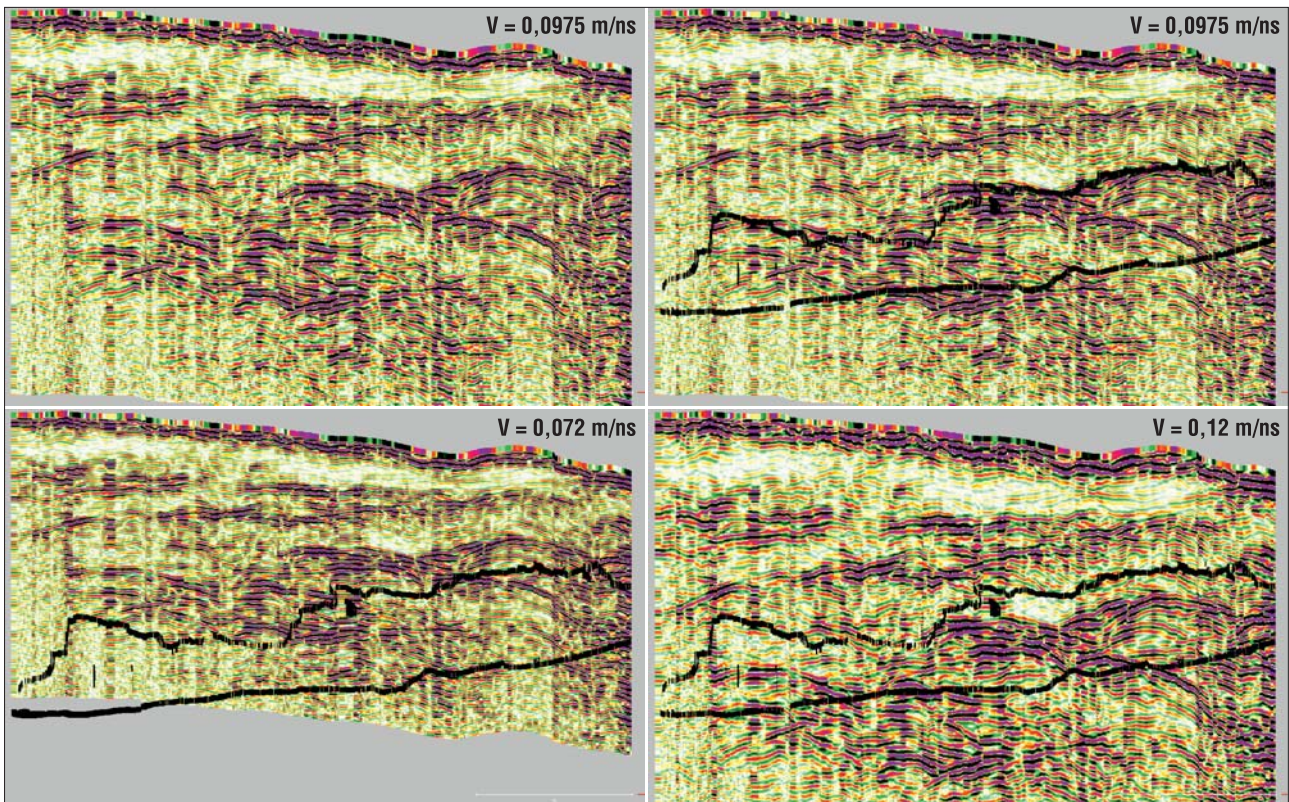
W przypadku danych zarejestrowanych na profilach P1 i P2 przyjęto podejście kalibracyjne. Przygotowano kilka wariantów chmur UgRS, którym zadano różne prędkości (0,07, 0,09, 0,12 m/ns). Stwierdzono, że anomalie reprezentujące kształt stropu jaskini wykazują najlepsze dopasowanie dla prędkości ok. 0,09 m/ns. W tym zakresie

dokonano kolejnych iteracji dla wartości 0,095 i 0,0975 m/ns, dla której nastąpiło najlepsze dopasowanie jakościowe. Jako kryterium przyjęto najlepszą zbieżność linii refleksyjnej reprezentującej na echogramie strop jaskini z kształtem wynikającym z przekroju chmury TLS wzdłuż profilu georadrowego. Dodatkowym miernikiem było ustalenie zbieżności maksymalnej wartości pozytywnej polaryzacji sygnału reprezentującego odbicie od stropu przez analogię do polaryzacji sygnału granicy między gruntem a przewodami z tworzywa sztucznego. Kryterium to wynika z doświadczeń prowadzonych przez autora z zastosowaniem anten 250 MHz firmy Mala GeoScience (Ortyl, 2007). Wynik jakościowego dopasowania dla wartości skrajnych i optymalnej przedstawiono na rycinie 14.

Wskazanie stropu na echogramie jest dość jednoznaczne. Natomiast wyznaczenie spągu jest obciążone dużą niepewnością.

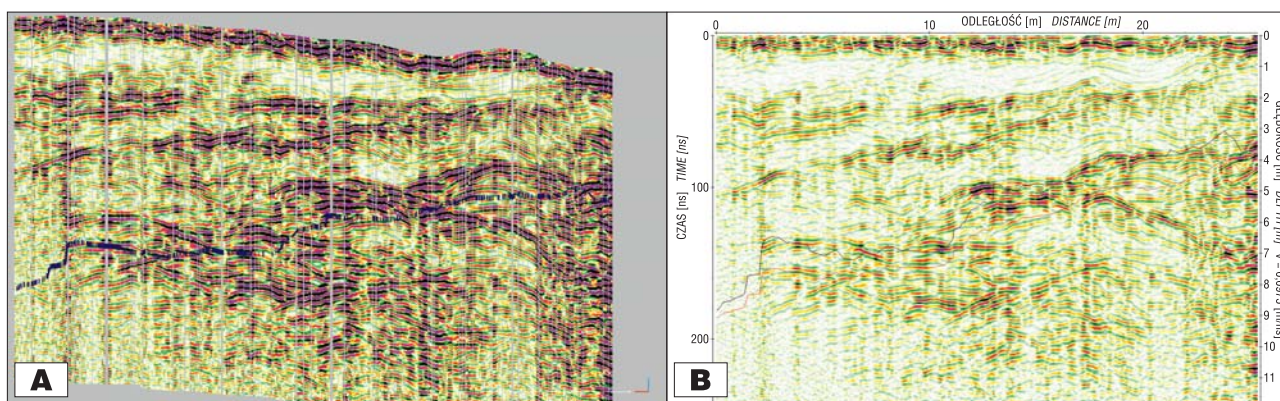
W celu oceny, gdzie w zarejestrowanym obrazie należy lokalizować spąg, wykorzystano i skonfrontowano ponownie dane UgRS i TLS. Wymagało to dodatkowych zabiegów obliczeniowych, dlatego:

- dokonano generalizacji chmury punktów TLS do postaci wektorowej dla stropu i spągu jaskini;
- wyznaczono (na podstawie współrzędnych X, Y, Z węzłów wektorów) wartość różnicy wysokości pomiędzy spągami a stropem;
- zredukowano różnicę wysokości pomiędzy spągami a stropem z uwzględnieniem faktu zmiany prędkości propagacji fali a ośrodkiem skalnym i powietrzem; współczynnik redukcji wyniósł 0,325 (0,0975/0,3);
- wygenerowano wektor będący różnicą wektora stropu i zredukowanej różnicy wysokości pomiędzy



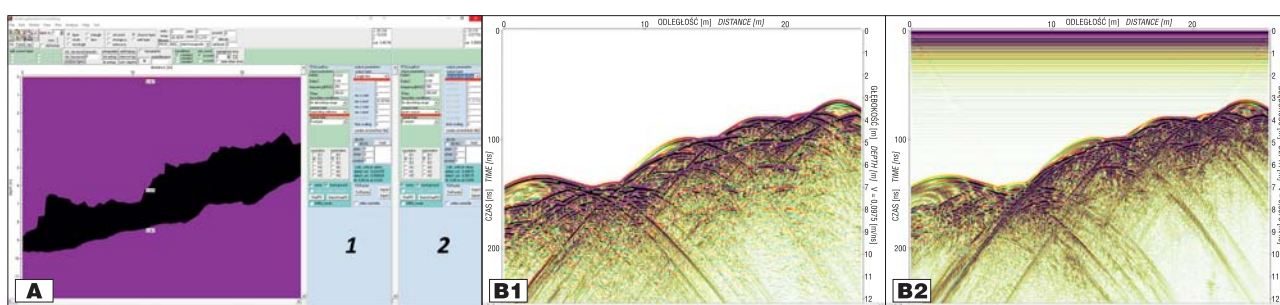
Ryc. 14. Prezentacja relacji między przekrojem jaskini (chmurą TLS – kolor czarny) a echogramem (chmurą UgRS) przy zadanych różnych prędkościach; lewy górny rysunek prezentuje celowo dane UgRS bez przekroju jaskini

Fig. 14. Presentation of the relationship between the cave section (TLS cloud – black color) and the echogram (UgRS cloud) at given various speeds; the upper left drawing deliberately shows UgRS data without the cave section



Ryc. 15. Przebieg wektora wskazującego miejsce, gdzie w obrazie georadarowym powinien odzworować się spąg na danych UgRS (A) i w programie ReflexW (B – linia czerwona)

Fig. 15. The course of the vector indicating the place where in the GPR image the footwall should be represented on the UgRS data (A) and in the ReflexW program (B – red line)



Ryc. 16. A – widok geometrii przekroju jaskini i zestawienie parametrów brzegowych dla modelowania rozkładu pola elektromagnetycznego; B – wynik modelowania (źródło fali: B1, B2) bez filtracji

Fig. 16. A – view of the geometry of the cave cross-section and a list of boundary parameters for modeling of the electromagnetic field distribution; B – result of modeling (wave source: B1, B2) without filtration

spągami a stropem; wektor ten odniesiono do danych UgRS przy prędkości 0,0975 m/ns.

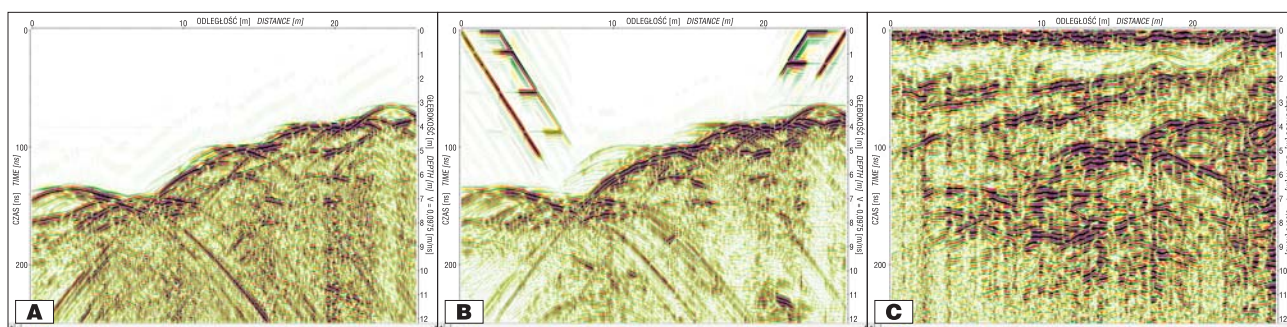
Przebieg wyznaczonego w ten sposób wektora wskazuje miejsce, gdzie w obrazie georadarowym powinien się odzworować spąg (ryc. 15). Teoretyczna rozdzielczość pionowa wyznaczona w tabeli 2 daje podstawę sądzić, że potencjalnie strop i spąg dla pustki o 3-metrowej wysokości powinny być dość jednoznacznie widoczne w obrazie. Zaprezentowany wynik wskazuje, iż w przypadku spągu nie jest to tak oczywiste. Przyczyny niejednoznaczności należy być może upatrywać w rozdzielczości poziomej i oddziaływaniu zjawiska Fresnela, które negatywnie wpływają na odzworowanie się spągu.

Aby głębiej przeanalizować wpływ geometrii na zapis obrazu jaskini na echogramie przeprowadzono modelowanie danych metodą FDTD, zaimplementowaną w oprogramowaniu ReflexW. Jest to metoda numeryczna umożliwiająca rozwiązanie równań Maxwella w domenie czasu, najbardziej rozpowszechniona w modelowaniu rozkładu pola elektromagnetycznego. Jej założeniem jest podział obszaru analizowanego na komórki o niewielkich rozmiarach, tzw. komórki Yee (od nazwy twórcy metody) (Yee, 1966), oraz zastąpienie pochodnych cząstkowych w równaniach Maxwella ilorazami różnicowymi. Realizując modelowanie, należy mieć na uwadze ograniczenia metody i warunki przygotowania parametrów modelowania (Gołębiowski, 2006; Karczewski i in, 2011; Pasternak 2015).

Proces modelowania propagacji sygnału wymaga wektorowej reprezentacji geometrii warstw przestrzeni propagacji i podania zakładanych prędkości fali w poszczególnych

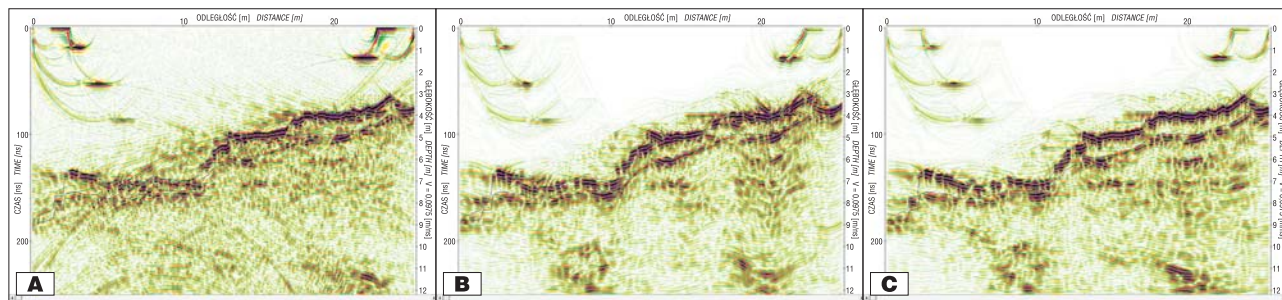
strukturach. Wektorowa reprezentacja granic warstw stropu i spągu powstała na bazie generalizacji ich przebiegu, którą opisano powyżej. Prędkość w wapieniu przyjęto z najlepszego wpasowania, czyli 0,0975 m/ns, a przewodność na poziomie 0,001 s/m (Pasternak, 2015). Podczas rozwiązania układu równań Maxwella uwzględniono dwa rodzaje źródeł sygnału i odpowiednich parametrów tworzenia siatki modelu (ryc. 16). Modelowanie przeprowadzono dla źródeł fali: eksplodująco-odbijającego z opcją pojedynczego profilu (ryc. 16B1) oraz punktowego z możliwością stworzenia wielu profili (ryc. 16B2).

Dane modelowe i terenowe poddano wzajemnej konfrontacji. Wymagało to przetworzenia danych modelowych z zastosowaniem takich procedur filtracyjnych, jakie zastosowano w przypadku danych terenowych po sekwencji 2 (ryc. 17). W danych modelowych silnie ujawniają się hiperbole dyfrakcyjne (ryc. 17). W celu eliminacji tego zjawiska w procesie przetwarzania echogramów modelowych i terenowych wprowadzono również filtry migracji. Zastosowano migracje: Stolta, Kirchhoffa (porównanie wyniku działania) (Daniels, 2004) i topograficzną, jako zalecaną (Lehman, Green, 2000) ze względu na deniwelację terenu na linii profilowej wynoszącą ok. 8%. Efekt działania filtrów migracji na danych modelowych 2 po sekwencji 2 zestawiono na rycinie 18. Na echogramach celowo umieszczone wektory reprezentujące przebieg stropu i spągu. Należy zwrócić uwagę na efekt działania procedury migracji topograficznej w relacji do wektora. Zweryfikowano również wyniki działania migracji topograficznej przed zastosowaniem sekwencji 2 (ryc. 19).



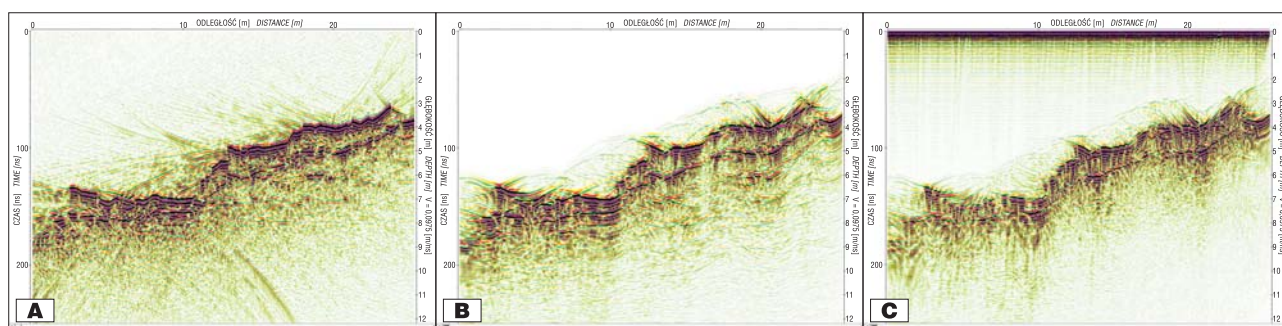
Ryc. 17. Obraz danych po wykonaniu sekwencji 2: model 1 (A), model 2 (B), dane terenowe (C)

Fig. 17. Image of data after execution of sequence 2: model 1 (A), model 2 (B), field data (C)



Ryc. 18. Efekty działania migracji po sekwencji 2: migracja fk (Stolt) (A), migracja Kirchhoffa (B), migracja topograficzna (C) na danych modelowych 2

Fig. 18. Migration effects after sequence 2: fk migration (Stolt) (A), Kirchhoff migration (B), topography migration (C) on model data 2



Ryc. 19. Różne działania migracji bez sekwencji 2: migracja fk (Stolt) (A), migracja Kirchhoffa (B), migracja topograficzna (C) na danych model 2

Fig. 19. Different migration actions without sequence 2: fk migration (Stolt) (A), Kirchhoff migration (B), topography migration (C) on given model 2

Na danych modelowych jest zauważalny fakt dobrego odwzorowania przebiegu stropu, ale znaczne osłabienie przebiegu spągu. Dodatkowo dane terenowe odzwierciedlają się z mniejszą rozdzielczością niż dane modelowe. Z tego powodu zastosowano i zweryfikowano działanie procedury filtracyjnej dekonwolucji spikowej, której zadaniem jest poprawa rozdzielczości pionowej. Dekonwolucja jest filtracją odwrotną, która na podstawie modelu trasy georadarowej wyznacza model rozkładu współczynników odbicia, i na bazie tego modelu dąży do usunięcia innych czynników zaburzających sygnał.

Procedurę dekonwolucji zastosowano:

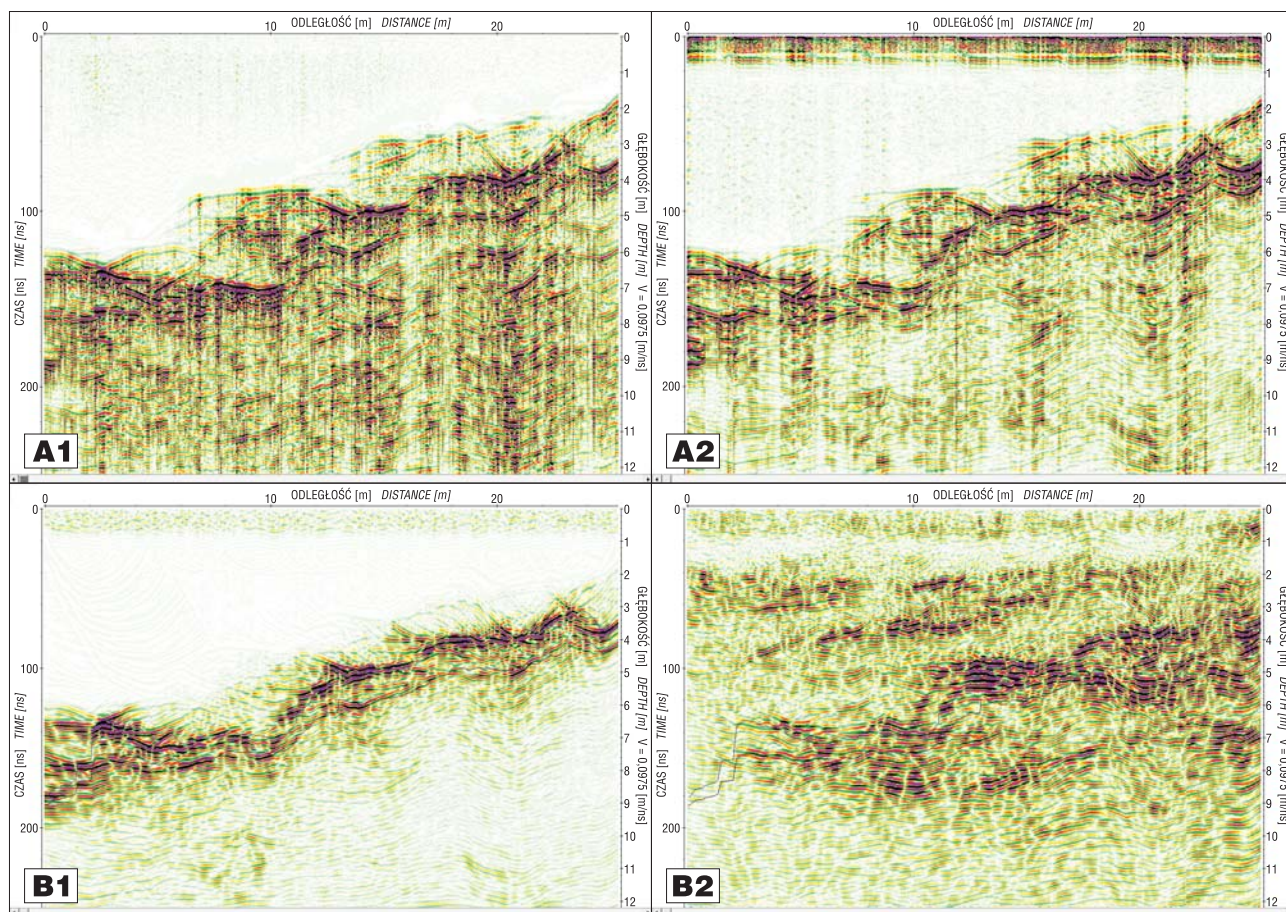
- po wprowadzeniu migracji topograficznej i sekwencji 2 (ryc. 20A1, A2); efekt: wzrost artefaktów,
- przed sekwencją 2 i migracją topograficzną tylko dla modelu 2 (ryc. 20B1) i danych terenowych (ryc. 20B2) (dla modelu 1 brak wyniku); efekt: brak obrazu.

Sprawdzono również następujące konfiguracje dla modelu 2 i danych terenowych:

- migracja topograficzna, dekonwolucja, sekwencja 2,
 - dekonwolucja, migracja topograficzna, sekwencja 2.
- W ten sposób potwierdzono fakt pojawiania się artefaktów, gdy migracja procedowana jest na etapie początkowym, adekwatnie jak na rycinie 19.

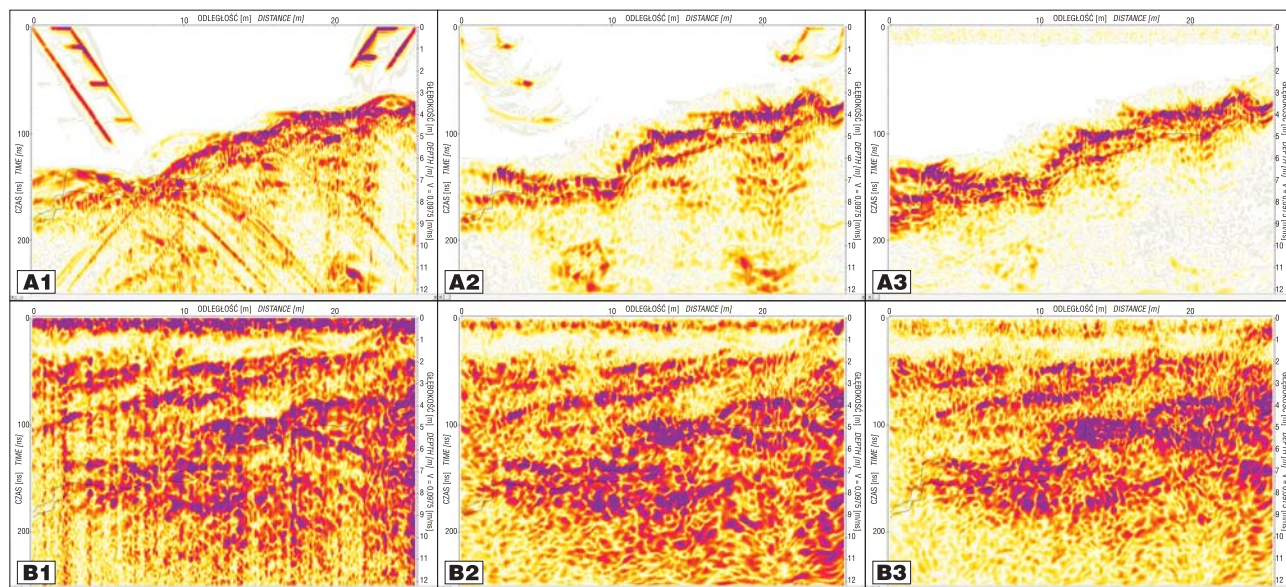
Ostatni etap przetworzeń filtracyjnych obejmował zastosowanie na danych procedury *envelope*, czyli analizy amplitudy chwilowej sygnału. Obliczenie amplitudy chwilowej sygnału, czyli modułu jego sygnału analitycznego, jest przeprowadzane w oparciu o transformatę Hilberta (Karczewski i in., 2011). Procedurę *envelope* zastosowano jako filtr końcowy dla danych terenowych i dla modelu 2 przy różnych kombinacjach filtracji poprzedzających (ryc. 21).

Z punktu widzenia odwzorowania się struktur pustki warto przeanalizować wyniki z rycin 20 i 21, gdzie zaprezentowano relację geometrii pustki do wyniku profilowań georadarowych przy różnych sekwencjach przetwarzania. Uzyskany wynik dla danych modelowych wskazuje na fakt zdecydowanej różnicy energii amplitudy odbitej od spągu w porównaniu z odbiciem od stropu jaskini. Efekt ten jesz-



Ryc. 20. Wynik działania dekonwolucji: po migracji topograficznej i sekwencji 2 (A1), model 2 (A2), przed sekwencją 2 i migracji topograficznej(B1), dane terenowe (B2)

Fig. 20. Result of deconvolution: after topography migration and sequence 2 (A1), model 2 (A2), before sequence 2 and topography migration (B1), terrain data (B2)

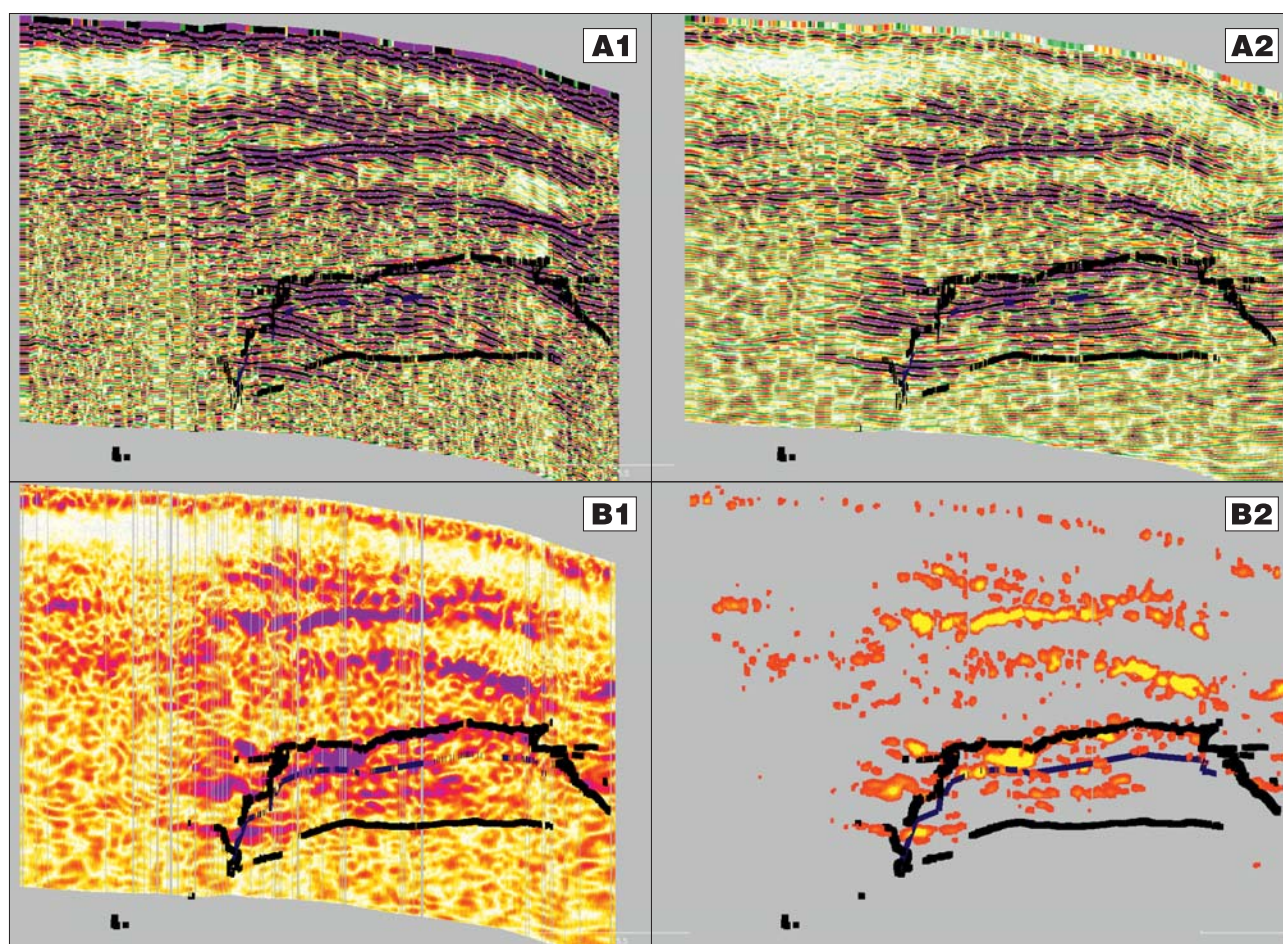


Ryc. 21. Wynik działania procedury envelope na modelu 2 (A) i danych terenowych (B) po filtracji: tylko sekwencja 2 (A1, B1), sekwencja 2 i migracji topograficznej (A2, B2), dekonwolucja, sekwencja 2 i migracji topograficznej (A3, B3)

Fig. 21. Result of envelope procedure action on model 2 (A) and field data (B) after filtration: only sequence 2 (A1, B1), sequence 2 and topography migration (A2, B2), deconvolution, sequence 2 and topography migration (A3, B3)

cze silniej ujawnia się dla danych terenowych. Mimo że teoretycznie spąg powinien być ujawniony, to jednak jest bardzo słabo widoczny, a wręcz nieinterpretowalny jako granica. Na uwagę zasługuje fakt, który ujawnia się

w danych terenowych głębszej części jaskini, gdzie rozdział tych dwóch warstw jest lepiej widoczny niż w odcinku płytszym, mimo podobnej wysokości pustki. Analizując filtrację *envelope*, można rozważać, czy jej efekt



Ryc. 22. Zestawienie danych UgRS dla profilu poprzecznego P2: **A** – filtracja po sekwencji 2 (**A1**), dekonwolucja, sekwencja 2 i migracja topograficzna (**A2**), **B** – dekonwolucja, sekwencja 2, migracja topograficzna i *envelope* (**B1**), filtr progowy na amplitudzie danych UgRS dla danych po filtracji: dekonwolucja, sekwencja 2, migracja topograficzna i *envelope* (**B2**)

Fig. 22. Comparison of the UgRS data for the transversal profile P2: **A** – filtration after sequence 2 (**A1**), deconvolution, sequence 2 and topography migration (**A2**), **B** – deconvolution, sequence 2, topography migration and envelope (**B1**), threshold filter on UgRS data amplitude for post-filtration data: deconvolution, sequence 2, topography migration and envelope (**B2**)

nie ma przyczyny w występowaniu rumoszu w dnie sali głównej jaskini. Jednak ze względu na ograniczone informacje w tym zakresie jest to tylko sugestia, która wymaga weryfikacji. Woparciu o opisaną analizę profilu P1 wyznaczono optymalne procedury które zastosowano do przetworzenia profilu poprzecznego P2, gdzie nachylenie terenu na profilu wynosiło ok. 13%. Efekt działania filtru migracji topograficznej ujawnia się tu w sposób znaczący (ryc. 22A), a filtracji *envelope* potwierdza wnioski z analizy profilu P1. Ponieważ dane georadarowe zyskały charakter chmury UgRS, można na nich przeprowadzić procedury typowe dla danych TLS i selektywnie dokonać filtracji danych reprezentujących silne refleksy (ryc. 22B). Stosując taką metodykę na kilku echogramach, łatwo uzyskać z danych UgRS przestrzenny model anomalii zlokalizowanej georadarem. Przytoczony przykład wskazuje na dużą wygodę pracy i przydatność w procesie interpretacji danych GPR sprowadzonych do postaci UgRS.

PODSUMOWANIE

W pracy podjęte zostały zagadnienia oceny możliwości geometryzacji zjawisk krasowych lokalizowanych metodą georadarową z zastosowaniem anten ekranowanych o częstotliwości 250 MHz. Przetwarzanie echogramów P1 i P2

z zastosowaniem podstawowych i zaawansowanych procedur filtracyjnych podano szczegółowej analizie. Analizę wykonano dla danych pozyskanych bezpośrednio w terenie i danych modelowych wygenerowanych z zastosowaniem metody FDTD.

Obiektem badań jest sala główna jaskini krasowej o dominującej wysokości 3 m, zlokalizowana na głębokości od 3 do 7 m p.p.t., o kształcie zinwentaryzowanym pomiarami geodezyjnymi z zastosowaniem naziemnego skanowania laserowego.

Dzięki przetworzeniu danych georadarowych do postaci chmury punktów UgRS (podpowierzchniowe skanowanie radarowe) była możliwa konfrontacja sygnału georadarowego odwzorowującego kształt sali głównej jaskini z jej reprezentacją w postaci chmury TLS.

Na podstawie bezpośredniego dopasowania danych UgRS i TLS wykazano rozbieżność prędkości fali w ośrodku nad jaskinią (0,0975 m/ns) względem wyników pozyskanych metodą profilowania prędkości CMP (0,072 m/ns). Różnica wyniosła 0,0255 m/ns (ryc. 14) i stanowi punkt wyjścia dla osobnej analizy zaistniałego zjawiska.

Dane modelowe i terenowe poddano jednakowym procedurom filtracji w celu optymalizacji sekwencji ich stosowania. Ich dobór przebiegał wieloetapowo i iteracyjnie, co umożliwiło prezentację efektywności filtracji danych geo-

radarowych. Podano także przykłady wpływu kolejności stosowanych procedur na efektywność działania filtrów (ryc. 8, 9, 10, 18, 19, 20). Skonfrontowano działania filtrów 2D (odjęcie średniej trasy – *background removal*, średnia pełzająca – *subtracting average*) i filtru dwuwymiarowego w dziedzinie częstotliwości – *fk filter* (ryc. 9), wskazując na ograniczenie tego ostatniego w obszarze eliminacji wielokrotnych refleksów poziomych.

Skonfrontowano również między sobą działanie filtrów wzmacniających: *EnergyDecay*, *AGC*, *Gain function* (ryc. 11), wskazując przewagę filtracji *AGC*. Zweryfikowano przetwarzanie z zastosowaniem procedury migracji (Stolta, Kirchhoffa, topograficzna – ryc. 18 i 19) i dekonwolucji spikowej.

Realizując różne kombinacje filtrów, za najwłaściwszą sekwencję optymalną uznano następującą kolejność procedur:

- przesunięcie pierwszego wstąpienia do poziomu zerowego (*move start time*),
- dekonwolucja spikowa,
- wyrównanie średniego poziomu sygnału do zera (*subtract-DC-shift*),
- usunięcie składowej niskoczęstotliwościowej (*subtract-mean (dewow)*),
- usunięcie refleksów poziomych – odjęcie średniej trasy (*backgroundremoval*),
- usunięcie refleksów poziomych – średnia pełzająca (*subtracting average*),
- wzmocnienie sygnału *AGC*,
- filtracja częstotliwościowa (*bandpassbutterworth*),
- wygładzanie (*average xy-filter*),
- migracja topograficzna (*topography migration*).

Dla przyjętej prędkości fali 0,0975 m/ns w danych terenowych jednoznacznie uwidacznia się i koreluje głębokościowo i geometrycznie przebieg stropu sali głównej jaskini (ryc. 14). Należy podkreślić, że bez materiału kalibracyjnego TLS kalibracja głębokościowa i identyfikacja stropu są znacznie utrudnione i obciążone dużą niepewnością na etapie interpretacji.

Odpowiednie przetworzenie danych TLS z zachowaniem redukcji do prędkości przyjmowanej w przetwarzaniu danych georadarowych pozwoliło na ustalenie wektora reprezentującego geometryczny przebieg spągu na echogramie (ryc. 15 i 20). Mimo że dominująca wysokość sali głównej jaskini to ok. 3 m, a teoretyczna rozdzielczość pionowa pomiaru to 0,3 m (tab. 1), nie było możliwe jednoznaczne wskazanie spągu na echogramach P1 i P2, zwłaszcza, co ciekawe, w strefie płytszego zalegania.

W celu zbadania przyczyn tego zjawiska, dzięki znanej geometrii przekroju sali głównej jaskini, przeprowadzono modelowanie danych georadarowych metodą *FDTD* (ryc. 16). Przyjęto dwa źródła fali: eksplodująco-odbijające dla pojedynczego profilu oraz punktowe z opcją stworzenia wielu profili. W danych modelowych silnie ujawnia się hiperbole dyfrakcyjne, dużo bardziej widoczne niż w danych terenowych, co w naturalny sposób wymusza stosowanie filtrów migracji (ryc. 17). Trudno podjąć dyskusję nad przewagą wpływu źródła fali, gdyż oba, poddane filtracji, dostarczają podobnych jakościowo wyników zobrazowania jaskini. Zagadnienie to wymaga szerszego potraktowania również z oceną ilościową.

Wyznaczenie przebiegu spągu dla danych modelowych jest możliwe, ale sygnał odbity reprezentujący spąg jest znacznie słabszy, zwłaszcza w strefie płytszego zalegania. Efekt ten koreluje się również z danymi terenowymi, gdzie w warstwie głębszego zalegania jaskini widać zbieżność danych.

Dane modelowe i terenowe poddano procedurze *envelope*, czyli analizie amplitudy chwilowej sygnału (ryc. 21). Analizując dane, szczególnie modelowe, widać istotę wpływu procedur dekonwolucji i migracji geometrycznej. Ich wprowadzenie nie poprawia jednak rozpoznania spągu. Możliwe, iż rozkład natężenia sygnału wskazuje na występowanie zasypisk, ale jest to niepotwierdzony odkrywkami wniosek.

Zastosowanie procedur migracji topograficznej podnosi dopasowanie geometryczne danych georadarowych, szczególnie dla danych z profilu P2. Jednak rozdzielczość danych i ograniczona objętość publikacji nie pozwala na jednoznaczną analizę ilościową zagadnienia i wymaga szerszego potraktowania w dalszych badaniach.

Zdaniem autora przedstawiona i szeroko udokumentowana sekwencja procedur przetwarzania filtracyjnych może być traktowana jako wyjściowa nie tylko w zakresie krasu, ale ogólnie w przetwarzaniu danych georadarowych pozyskiwanych podczas rozpoznania podłoża gruntowego w budownictwie.

W pracy podano parametry większości filtrów, ale nie należy ich traktować jako optymalne w kwestii innych danych. Dla analizowanych echogramów okazały się optymalne poprzez dobór drogą kolejnych iteracji i na podstawie oceny jakościowej.

Niewątpliwie ważnym aspektem pracy jest przedstawienie sposobu przetwarzania danych georadarowych do postaci chmury punktów, określonego jako podpowierzchniowy skaning radarowy *UgRS*. Wykazano duże znaczenie i możliwości wykorzystania danych przygotowanych w ten sposób w procesie interpretacji samych obserwacji georadarowych oraz ich integracji z innymi danymi geoprze-strzennymi (ryc. 13).

Praca została wykonana w ramach badań AGH nr 16.16.150.545. Serdeczne podziękowania dla: Jerzego Karczewskiego, Marty Gabryś za wsparcie w pracach terenowych oraz Jerzego Mościckiego i Grzegorza Bani za udostępnienie przetworzonych profilowań z metody ERT. Autor składa serdeczne podziękowania Recenzentom publikacji.

LITERATURA

- ANNAN A.P. 2000 – Ground Penetrating Radar, Workshop Notes, Sensors & Software.
- ANNAN A.P. 2001 – Ground Penetrating Radar, Workshop Notes, Sensors & Software.
- BERES M., LUETSCHER M., OLIVIER R. 2001 – Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves. *J. Appl. Geoph.*, 46: 249–262.
- BESTYŃSKI Z., PACANOWSKI G., SIEŃSKI E. 2017 – Badania geofizyczne i klasyfikacje geotechniczne w ocenie stateczności karpackich zboczy fliszowych. *Prz. Geol.*, 65: 717–724.
- BORECKA A., OSTROWSKI SZ. 2017 – Analiza obowiązujących przepisów prawnych w zakresie stosowania metod geofizyki inżynierskiej. *Prz. Geol.*, 65: 678–684.
- CZARNIAK P., PACANOWSKI G., SOBÓTKA P. 2017 – Zastosowanie badań konduktometrycznych z użyciem inwersji 1D, jako narzędzia do kartowania przestrzennego przypowierzchniowych warstw geologicznych. *Prz. Geol.*, 65: 803–810.

- DANIELS D. 2004 – Ground Penetrating Radar – 2nd Edition, Institution of Electrical Engineers.
- DEC J. 2010 – High resolution seismic investigations for the determination of water flow directions during sulphur deposits exploitation. *Acta Geoph.*, 58: 5–14.
- DEMAIO A., GRECO M. S. (red.) 2016 – Modern Radar Detection Theory. *Sci. Tech. Publ.*
- GOŁĘBIEWSKI T. 2006 – Numeryczne modelowanie pola georadarowego przy pomocy metody FDTD. *Geoinformat. Pol.*, 8: 23–36.
- GOSAR A. 2012 – Analysis of the capabilities of low frequency ground penetrating radar for cavities detection in rough terrain conditions: The case of Divača cave, Slovenia. *Acta Carsologica*, 41: 77–88.
- GÓRNY A. 2007 – Co nowego na Zakrzówku? *Jaskinie*, 46: 7–8. <http://jaskiniepolski.pgi.gov.pl/>
- INSTRUKCJA badań podłoża gruntowego budowli drogowych i mostowych. Część 1 i 2. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, Warszawa, 1998.
- JĘDRYS J., KRAJEWSKI M. 2002 – Poszukiwanie jaskiń na Zakrzówku metodą georadarową. *Jaskinie*, 46: 28–30.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M. 2011 – Zarys metody georadarowej. Wydaw. AGH, Kraków.
- KONDRACKI J. 2002 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- LEHMANN F., GREEN A. G. 2000 – Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing. *Geoph.*, 65: 836–848.
- LEHMANN F., GREEN A. G. 1999 – Semiautomated georadar data acquisition in three dimensions. *Geoph.*, 64: 719–731.
- ŁÓJ M., GOŁĘBIEWSKI T., PORZUCEK S. 2014 – Geophysical surveys and modelling for recognizing of gypsum karst. *Geoinformat. Pol.*, 13: 83–97.
- ŁYCZAK M., ADAMIEC J., SKUPIEŃ T., MAŁYSA T., GROFFIK A. 2018 – Georadar surveys of the flooring in the St. Francis of Assisi basilica in Krakow. *Geol., Geoph. Env.*, 44: 357–372.
- MADEJ J., ŁÓJ M., PORZUCEK S., JAŚKOWSKI W., KARCZEWSKI J., TOMECKA-SUCHOŃ S. 2018 – The geophysical truth about the “Gold Train” in Walbrzych. *Archaeol. Prospect.*, 25: 137–146.
- MAŚLAKOWSKI M., JÓZEFIAK K., BRZEZIŃSKI K., SUPERCZYŃSKA M. 2017 – ERT i GPR – geofizyczne metody badań podłoża wykorzystywane w budownictwie liniowym. *Prz. Geol.*, 65: 765–771.
- MIESZKOWSKI R., ZAWRZYKRAJ P., WÓJCIK E., ŻMUDZIN D., POPIELSKI P. 2017 – Ocena możliwości zastosowania metody georadarowej i elektrooporowej do identyfikacji rozluźnionych stref gruntów niespoistych. *Prz. Geol.*, 65: 779–784.
- MOŚCICKI W.J., BANIA G., ĆWIKLIK M., BORECKA A. 2014 – DC resistivity studies of shallow geology in the vicinity of Vistula River flood bank in Czernichow village (near Krakow in Poland). *Stud. Geotech. Mech.*, 36: 63–70.
- NEAL A. 2004 – Ground-penetrating radar and its use in sedimentology, principles, problems and progress. *Earth Sci. Rev.*, 66: 261–330.
- NOON D.A., STICKLEY G.F., LONGSTAFF D. 1998 – A frequency-independent characterisation of GPR penetration and resolution performance. *J. Appl. Geoph.*, 40: 127–137.
- ORTYL Ł. 2007 – The investigation of repeatability of georadar measurement results using radargrams. *Proceedings of the Geodesy and Environmental Engineering Commission, Geodesy*, 43: 85–97.
- ORTYL Ł., KARCZEWSKI J., MAZURKIEWICZ E. 2017 – Sprawozdanie z przeprowadzonych badań podłoża gruntowego i skalnego na poligonach testowych w ramach realizacji zadania 3 „Walidacja metod badawczych wykorzystywanych w rozpoznaniu podłoża gruntowego – poligon testowy 11-Z Zakrzówek”, Projekt RID „Nowoczesne metody rozpoznania podłoża gruntowego w drogownictwie”, materiał niepublikowany. Raporty Projektu RID przekazane do jednostek finansujących projekt GDDKiA oraz NCBiR oraz u lidera projektu PIG-PIB.
- ORTYL Ł., KURAS P., KĘDZIERSKI M., PODSTOLAK P. 2015 – Metody pomiaru częstotliwości drgań własnych i logarytmicznego dekrementu tłumienia kominów stalowych w sytuacjach wymaganych przez Eurokod. *Mat. Bud.*, 9: 107–109.
- ORTYL Ł., OWERKO T. 2007 – Korekta wpływu deniwelacji terenu oraz częstotliwości wyznaczenia pozycji przez system GNSS lub tachymetry TCA w procesie przestrzennej lokalizacji obiektów wykrywanych Georadarem. *Zesz. Nauk. POEL., Górnictwo*, 278: 335–352.
- ORYŃSKI S., OKOŃ M., KLITYŃSKI W. 2016 – Very Low Frequency electromagnetic induction surveys in hydrogeological investigations; case study from Poland. *Acta Geoph.*, 64: 2322–2336.
- PACANOWSKI G., MUSIATEWICZ M. 2005 – Zastosowanie metody georadarowej w prospekcji archeologicznej na przykładzie badań w katedrze we Fromborku. [W:] Gąssowski J. (red.), *Castra Dominae Nostrae Litterae Annales*, 2: 41–53.
- PASTERNAK M. (red.) 2015 – Radarowa penetracja gruntu. Wydaw. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- PAVLIC M.U., PRAZNIK B. 2011 – Detecting karstic zones during highway construction using ground-penetrating radar. *Acta Geotech. Slovenica*, 8: 17–27.
- PILECKI Z., POPIOŁEK E., KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J., KŁOSIŃSKI J., BARANOWSKI A., PILECKA E., ORTYL Ł., PSZONKA J., KRAWIEC K. 2008 – Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska. *Ag. Wydaw.-Poligraf. ART-TEKST, Kraków.*
- PN-EN 1997-2:2007 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 2: Badania podłoża gruntowego (oryginalna wersja językowa).
- POPIOŁEK E., PILECKI Z. 2005 – Ocena przydatności do zabudowy terenów zagrożonych deformacjami nieciągłymi za pomocą metod geofizycznych. *Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.*
- RAJCHEL B. 2017 – Ocena zastosowania georadaru do wykrywania podziemnych instalacji budowlanych w warunkach zimowych. *Prz. Geol.*, 65: 790–795.
- REYNOLDS J.M. 1997 – An Introduction To Applied Geophysics. Wiley & Sons, New York.
- SERMET E., ROLKA G. 2013 – Pogórnicy spadek na zrębie Zakrzówka. [W:] Zagożdżon P.P., Madziarz M., *Dzieje górnictwa – element europejskiego dziedzictwa kultury. Wrocław*: 5: 329–338.
- SOKOŁOWSKA M., CHADA M., ROGUSKI A., MAJER E. 2017 – Ocena badań geologiczno-inżynierskich wykonanych na potrzeby inwestycji drogowych w latach 2007–2016. *Prz. Geol.*, 65: 672–677.
- ŠTĚPANIČKOVÁ P., DOHNAL J., PÁNEK T., ŁÓJ M., SMOLKOVÁ V., ŠILHÁN K. 2011 – The application of electrical resistivity tomography and gravimetric survey as useful tools in an active tectonics study of the Sudetic Marginal Fault (Bohemian Massif, central Europe). *J. Appl. Geoph.*, 74: 69–80.
- TOMECKA-SUCHOŃ S., MARCAK H. 2015 – Interpretation of ground penetrating radar attributes in identifying the risk of mining subsidence. *Archiv. Mining Sci.*, 60: 645–656.
- TOMECKA-SUCHOŃ S., ŻOGAŁA B., GOŁĘBIEWSKI T., DZIK G., DZIK T., JOCHYMCZYK K. 2017 – Application of electrical and electromagnetic methods to study sedimentary covers in high mountain areas. *Acta Geoph.*, 65: 743–755.
- YEE K.S. 1966 – Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Trans. Antennas. Propagation*, 14: 302–307.
- ZARZĄDZENIE nr 58 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 23 listopada 2015 r. w sprawie dokumentacji do realizacji inwestycji.
- ZIELIŃSKI A., MAZURKIEWICZ E., ŁYSKOWSKI M. 2016 – GPR mapping of karst formations under a historic building in Szydłów, Poland. *Geofizyka*, 3: 101–111.
- ŻUK T., SAMBROOK SMITH G.H. 2015 – Stratygrafia radarowa – metoda analizy danych georadarowych 3D w badaniu środowisk sedymentacyjnych na przykładzie osadów rzecznych. *Prz. Geogr.*, 87: 439–456.

Praca wpłynęła do redakcji 5.02.2019 r.
Akceptowano do druku 15.02.2019 r.