

ZASTOSOWANIE METOD GEOFIZYCZNYCH DO IDENTYFIKACJI SKAŁ TRUDNO URABIALNYCH W KOPALNIACH ODKRYWKOWYCH

THE USE OF GEOPHYSICAL METHODS TO IDENTIFY HARD-TO MINE ROCKS IN OPENCAST MINES

Wiesław Koziol, Krzysztof Barański, Adrian Borcz, Łukasz Machniak - Wydział Górnicztwa i Geoinżynierii,
Katedra Górnicztwa Odkrywkowego, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

W artykule przedstawiono zarys problemów eksploatacyjnych wynikających z zalegania w złożach utworów trudno urabialnych. Omówiono wykorzystanie metod geofizycznych do wykrywania i rozpoznawania tego typu skał. Zaprezentowano na konkretnych przykładach możliwość zastosowania w kopalniach odkrywkowych różnych grup metod. Dokonano oceny skuteczności i efektywności działania poszczególnych metod geofizycznych w warunkach kopalnianych.

Słowa kluczowe: górnictwo odkrywkowe, geofizyka, utwory trudno urabialne, metoda georadarowa

In this thesis operational problems resulting from the deposition in the ore of hard-to mine rocks were presented. Discussed the use of geophysical methods for the detection and recognition of this type of rocks. It was shown on particular examples the possibility of using different groups in opencast mining. Evaluated efficacy and effectiveness of various geophysical methods in mining conditions.

Key words: opencast mining, geophysics, hard-to mine rocks, GPR method

Wprowadzenie

Kopalnie odkrywkowe surowców mineralnych, m.in. węgla brunatnego, zmagają się z wieloma przeszkodami, które w mniejszym bądź większym stopniu utrudniają prowadzenie wydobywania zgodnie z założonym harmonogramem eksploatacji. Jednym z poważniejszych problemów eksploatacyjnych są trudno urabialne utwory występujące w granicach konturu eksploatacji złoża. Dokładniejsza identyfikacja zjawisk składających się na to zagadnienie umożliwiłaby uniknięcie dodatkowych kosztów i strat wynikających ze zmian organizacji prowadzonej eksploatacji. Do identyfikacji utworów trudno urabialnych bardzo pomocne mogą się okazać dodatkowe badania geofizyczne wybranych rejonów złoża. W ramach rozważań przedstawionego problemu należy najpierw scharakteryzować w rozpatrywanym zakresie metody geofizyczne, których wykorzystanie może przyczynić się do dokładniejszego rozpoznania problemu. W niniejszym opracowaniu skupiono się na niektórych metodach geofizycznych, służących do identyfikacji trudno urabialnych utworów oraz pustek skalnych w odkrywkowych zakładach górniczych. Sformułowane zostały ich najważniejsze cechy na tle możliwości ich wykorzystania do prowadzenia prac rozpoznawczych w kopalniach.

Wpływ ośrodka skalnego na prowadzenie eksploatacji odkrywkowej

Rozpoznawcze badania geologiczne, których wyniki po części pozwalają na zaplanowanie technologii i harmonogramu

eksploatacji, dostarczają informacji m.in. dotyczących jakości interesującego nas surowca, budowy i formy zalegania kopaliny oraz nadkładu. Niejednokrotnie jednak rezultaty tych badań nie identyfikują zaburzeń budowy złoża jak i niejednorodności jego cech fizyko-mechanicznych, mogących wpływać negatywnie na prowadzoną eksploatację. Prace geologiczne wymagają dużych nakładów finansowych, dlatego też zagęszczenie siatki otworów rozpoznawczych, w stopniu na tyle dużym, aby móc rozpoznać złoża i występujące w nim ewentualne deformacje jest trudne do przeprowadzenia. W efekcie tego często identyfikacja złoża a szczególnie warstw nadkładowych, do badań których w pracach geologicznych przywiązuje się mniejszą uwagę, nie jest wystarczająco dokładna. Stąd też wykorzystanie metod geofizycznych ze względu na ich mało inwazyjny charakter może być bardzo pożądane [3].

Do utworów trudno urabialnych w kopalniach węgla brunatnego należy zaliczyć wszelkiego rodzaju grunty i skały, których urabianie prowadzi do niekorzystnych zmian (wzrostu lub obniżenia) wskaźników eksploatacyjnych koparek wielonaczyniowych oraz niekorzystnie wpływa na ich konstrukcje (duże obciążenia dynamiczne). Utwory trudno urabialne w strukturze geometrycznej wyrobisk eksploatacyjnych, charakteryzują się zazwyczaj bardzo dużym zróżnicowaniem przestrzennego usytuowania. Jednocześnie identyfikuje się partie skał nadkładowych o różnych, często bardzo zmiennych zespołach cech – od dużych, jednolitych jakościowo masywów, do ośrodków o zróżnicowanych zespołach cech warunkujących przebieg procesu urabiania (np. ośrodków luźnych z trudno urabianymi wtrąceniami skalnymi lub nieurabianymi głazami

narzutowymi). Stan taki stwarza trudności w doborze metody urabiania, wyposażenia technicznego oraz wyborze samej technologii w zakresie jej dostosowania do urabialności skał nadkładowych.

Mnogość parametrów charakteryzujących właściwości skał ogranicza możliwość rozpoznania oporów urabiania górotworu. Obecnie najczęściej do skał trudno urabialnych koparkami wielonaczyniowymi zaliczane są te, których liniowe opory urabiania przekraczają 100 kN/m [13,14,15]. Jest to granica umowna, zależna od możliwości technicznych w obecnie stosowanych maszyn podstawowych. W tabeli 1 przedstawiono zmodyfikowaną klasyfikację urabialności skał dla wielonaczyniowych koparek kołowych [10,11,12].

IX) oraz ciekłych (kategoria X) [19]. Dla potrzeb urabialności klasyfikację tę uproszczono do siedmiu klas (tab. 2).

Zauważyć można, iż najbardziej wytrzymałe skały charakteryzują się wartościami wskaźnika $f_p > 10$. Wynikiem mechanicznego urabiania skał o podwyższonym wskaźniku f_p jest szybsze zużywanie części koparek, duże obciążenia dynamiczne układu urabiania, a niekiedy ich katastrofy. Do najczęstszych zaliczyć należy uszkodzenia takie jak m.in. pęknięcia koła czerpakowego, pęknięcia konstrukcji wysięgnika urabiającego, pęknięcia korpusu przekładni głównej, a także zniszczenia taśmy przenośników. W takim przypadku, oprócz konieczności przeprowadzenia naprawy, dodatkowymi negatywnymi efektami wpływającymi na uzyskanie wyższych

Tab. 1. Zmodyfikowana klasyfikacja urabialności skał koparkami wielonaczyniowymi

Kat.	Nazwa klasy (rodzaj skał)	Nominalne opory urabiania skał	
		knL [kN/m]	knF [kN/m ²]
I	Łatwo urabialne (piaski, żwiry, piaski gliniaste, gliny piaszczyste, humus)	0 ÷ 40	0 ÷ 360
IIA	Średnio urabialne dla koparek starego typu (gliny, iły, węgiel brunatny)	40 ÷ 60	360 ÷ 540
IIB	Średnio urabialne dla koparek nowych (gliny, iły, węgiel brunatny)	40 ÷ 90	360 ÷ 800
IIIA	Trudno urabialne dla koparek starego typu (gliny i iły trudno urabialne, średnio twardy węgiel brunatny)	60 ÷ 90	540 ÷ 800
IIIB	Trudno urabialne dla koparek nowych (twarde gliny zwałowe i iły, łupek ilasty, twardy węgiel brunatny)	90 ÷ 120	800 ÷ 1100
IVA	Bardzo trudno urabialne dla koparek starego typu - skały średnio zwięzłe (margle, wapienie, kreda, gips, zlepieńce, piaskowce, twardy węgiel brunatny)	> 90	> 800
IVB	Bardzo trudno urabialne dla koparek nowych - skały średnio zwięzłe (margle, wapienie, kreda, gips, zlepieńce, piaskowce, bardzo twardy węgiel brunatny)	> 120	> 1100

Badanie oporów urabiania w warunkach kopalnianych jest dosyć uciążliwe, dlatego w praktyce górniczej podejmuje się próby wykorzystania innych znanych klasyfikacji ośrodków skalnych lub opracowuje się nowe klasyfikacje, które na ogół są przydatne w bardzo ograniczonym zakresie. Przykładem wykorzystania uniwersalnej klasyfikacji skał i gruntów jest klasyfikacja Protodiakonowa [13], w której to na podstawie znajomości wytrzymałości skał na ściskanie wyznaczany jest wskaźnik według następującej zależności:

$$f_p = \frac{R_c}{10 \text{ MPa}}$$

gdzie:

f_p – wskaźnik Protodiakonowa,

R_c – wytrzymałość skały na ściskanie [MPa].

W klasyfikacji tej wyróżnia się 10 podstawowych kategorii skał od nadzwyczaj zwięzłych (kategoria I) do sypkich (kategoria

kosztów jednostkowych wydobycia kopaliny jest osiąganie znacznie mniejszych wydajności, a także zwiększenie energochłonności pracy maszyn [16].

Zastosowanie metod geofizycznych do badań geologicznych oraz planowania eksploatacji

Metody geofizyczne stosowane w górnictwie typu sejsmologia, sejsmoakustyka czy sejsmometria, w porównaniu do tradycyjnych metod badawczych, stanowią tańszą i dokładniejszą formę pozyskiwania danych na temat rozpoznawania i lokalizacji złóż, a także przewidywania elementów w nich występujących, mogących negatywnie oddziaływać na prowadzenie eksploatacji górniczej. Umożliwiają w sposób bezinwazyjny, czyli bez bezpośredniej ingerencji w górotwór (wiercenie otworów), pozyskiwanie informacji na dużych obszarach. Klasyczne metody pozwalają tylko na identyfikację punktową budowy górotworu w otoczeniu badanego otworu,

Tab. 2. Zmodyfikowana klasyfikacja Protodiakonowa [11, 12]

Nazwa klasy	Wytrzymałość na ściskanie, R_c [MPa]	Wskaźnik f_p
Wyjątkowo mocna	>250	>25
Bardzo mocna	100-250	10-25
Mocna	50-100	5-10
Średnio mocna	25-50	2,5-5
Średnio słaba	5-25	0,5-2,5
Słaba	1-5	0,1-0,5
Bardzo słaba	<1	<0,1

natomiast obraz złoza tworzony jest na podstawie siatki wykonanych otworów.

Prowadzenie badań geofizycznych jest pożądane nie tylko w przypadku lokalizowania granic złoza, ale również na etapie prowadzenia eksploatacji. Jego celem jest zachowanie ciągłości wydobywania oraz zapewnienie bezpieczeństwa osób pracujących na kopalni, a ponadto uniknięcie kosztów związanych z usuwaniem awarii maszyn i zmianą technologii eksploatacji.

Prowadzone w wyrobisku górniczym badania geofizyczne umożliwiają rozwiązywanie niżej podanych problemów [6]:

- zadania geologiczne – w szczególności badanie cech ciągłości pokładów (lokalizowanie uskoków, zmian miąższości),
- zadania geomechaniczne – przewidywanie wpływów działalności górniczej na strukturę górotworu (tąpnięcia, osuwiska jako ruchy masowe),
- zadania ekologiczne – badanie wpływu eksploatacji na środowisko naturalne.

W górnictwie odkrywkowym, badania prowadzone w trakcie eksploatacji mają za zadanie głównie:

- lokalizować i rozpoznawać utwory trudno urabialne, pustki skalne, lokalne warstwy wodonośne itp.,
- identyfikację przypowierzchniowej budowy geologicznej oraz warunków tektonicznych.

Zastosowanie większości z dostępnych technik pomiarowych wymaga ograniczenia lub całkowitego przerwania prowadzenia prac wydobywczych maszyn, na czas trwania pomiaru, wliczając w to czas na odpowiednie przetworzenie i interpretację uzyskanych wyników.

Najlepsze rezultaty osiągane są dzięki sprawdzeniu zgodności wyników z różnych, możliwych do zastosowania, metod, a jeszcze lepsze gdy ich wyniki skorelowane są z informacjami uzyskanymi z profili wiertniczych.

Do szczególnie interesujących grup metod geofizycznych należą:

- metody georadarowe,
- metody geofizyki wiertniczej,
- metody sejsmiki otworowej,
- metody geoelektryczne.

Zasada działania oraz zastosowanie metody georadarowej

Najlepsze z perspektywy kopalni wydają się być metody proste, których przeprowadzanie odbywa się w trakcie trwania prac wydobywczych i takie, których rezultaty są natychmiastowe. W tym przypadku dobra wydaje się być metoda georadarowa. Zasada jej działania jest analogiczna jak metod radarowych stosowanych zarówno w technice cywilnej jak i wojskowej, z tym że polega ona na wysyłaniu fal elektroma-

gnetycznych w głąb przypowierzchniowych struktur górotworu [8]. Wysyłany przez antenę nadawczą sygnał ulega odbiciu od warstw geologicznych, które zazwyczaj różnią się od siebie parametrami petrofizycznymi, a następnie odbierany jest przez antenę odbiorczą. Z prostej analizy, przy znajomości prędkości wysyłanej fali elektromagnetycznej oraz czasu od jej nadania do odbioru, możemy wyznaczyć odległość napotkanej zmienności struktury geologicznej górotworu bądź obiektu. Głębsza analiza echogramów, daje możliwość sprecyzowania wielkości oraz kształtu napotkanej przeszkody, a ponadto pozwala dokonać charakterystyki otaczających go skał i struktur tektonicznych.

Ważnym czynnikiem przy tej metodzie jest częstotliwość fali wykorzystana do prowadzenia detekcji. Fale o wyższych częstotliwościach dają lepszą rozdzielczość (dokładność) pozyskiwanych wyników, jednak ich przenikalność w głąb struktury skał jest ograniczona i wraz ze wzrostem częstotliwości zasięg ich penetracji ulega zmniejszeniu. Z doświadczeń przyjmuje się, iż wartość ta nie przekracza 150 MHz. Z kolei, im zastosowana częstotliwość jest niższa tym otrzymujemy większy zakres penetracji fal w głąb badanego ośrodka skalnego, umożliwiając otrzymywanie wyników z głębokości do 80 metrów. Niskie częstotliwości dają jednak spadek rozdzielczości i istnieje możliwość niezarejestrowania mniejszych obiektów, czy cienkich warstw geologicznych [8].

Podstawowe cechy metody georadarowej można scharakteryzować następująco:

- czas i koszt wykonywania badań metodą georadarową jest nieznaczący, w szczególności w stosunku do zakupu samej aparatury pomiarowej,
- jako metoda bezinwazyjna nie powoduje degradacji środowiska, co pozwala na prowadzenie badań w rejonach obszarów szczególnej ochrony jak parki narodowe czy rezerваты przyrody,
- w celu odpowiedniego zinterpretowania wyników pomiarów, oprócz doboru parametrów ich wykonywania, ważny jest duży kontrast pomiędzy warstwami skalnymi, gdzie zachodzi odbicie propagujących fal,
- praca maszyn i urządzeń elektrycznych znajdujących się w pobliżu wykonywania pomiarów wpływa negatywnie na pozyskiwane informacje.

Rejestracja budowy warstw geologicznych uzależniona jest od parametrów fizycznych ośrodka, jak przenikalność elektryczną ϵ , przenikalność magnetyczną μ i przewodność σ , z którą związany jest współczynnik tłumienia α . Wraz ze wzrostem przewodności wzrasta wartość współczynnika tłumienia. Przykładowe wartości obu tych składników przedstawia tabela 3. Tłumienie spowodowane jest przez różne czynniki. Wpływ na jego wartość mają między innymi: skład mineralny, porowatość, wilgotność jak i temperatura ośrodka skalnego. Nie bez znaczenia również są

Tab. 3. Wartość przewodności i współczynnika tłumienia różnych ośrodków [8]

Ośrodek	Przewodność σ [mS/m]	Współczynnik tłumienia α [dB/m]
Powietrze	0,0	0,0
Piaski (suchy)	0,01	0,01
Piaskowce	0,5 – 2,0	0,4 – 1,0
Gliny	2,0 – 1000	300
Łupki	1,0 – 100	1,0 – 100
Muły	1,0 – 100	1,0 – 100
Granity	0,01 – 1,0	0,01 – 1,0

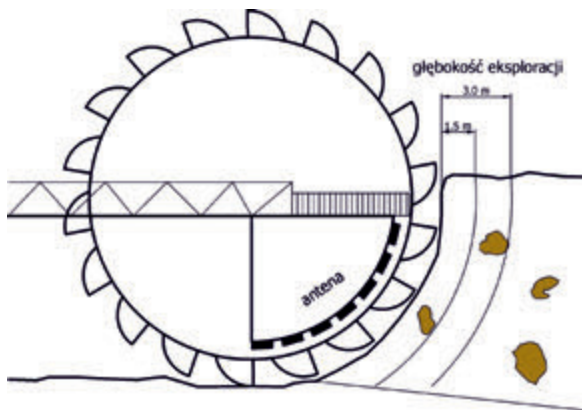
inne elementy jak struktura i tekstura skał, a także opisana wcześniej częstotliwość emitowanej fali elektromagnetycznej.

Wykorzystanie metody georadarowej w górnictwie odbyć się może na dwa sposoby. Mniej dogodny z punktu widzenia kopalni jest wariant, w którym następuje przerwa w prowadzonej eksploatacji i wycofanie maszyn z przodka. Taki rodzaj postępowania przyczynia się do zmniejszenia postępu eksploatacji i wydajności kopalni, a co za tym idzie do generowania strat. Dlatego też badania tego typu najlepiej wykonywać przed rozpoczęciem planowanej eksploatacji bądź podczas zaplanowanych postojów (np. remontowych, technologicznych, itp.).

Prowadzone na przełomie ostatnich lat prace nad wykonywaniem pomiarów w czasie rzeczywistym wykorzystano w łużyckich kopalniach węgla brunatnego, eksploatowanych przez koncern energetyczny Vattenfall. Występujące na przedpolu eksploatacyjnym łatwo urabialne utwory czwartorzędowe nadkładu stanowiły dobry kontrast z występującymi w nich głazami narzutowymi. Metodyka przeprowadzonych badań odbywała się przy użyciu fal o częstotliwościach do 500 MHz, co umożliwiło identyfikację ośrodka skalnego tylko do głębokości 15 metrów [14]. W efekcie przeprowadzonych badań wyznaczono mapę występujących zaburzeń, co umożliwiło w dużej ilości usunięcie głazów ze zdejmowanego nadkładu.

W zasadzie istnieją dwie możliwości instalowania anten georadaru: na kole czerpakowym lub obok niego. W przedstawionym przykładzie anteny zainstalowano na wysięgniku koła czerpakowego – rys. 1.

Występująca pomiędzy kołem czerpakowym a ociosem pustka przyczyniała się do zmniejszenia zasięgu georadaru i tym samym pogorszenia otrzymanych wyników pomiarów, w efekcie czego zmniejszyła się skuteczność wykrywania głazów narzutowych. Z powodu braku technicznych możliwości zmniejszenia szerokości tej pustki podjęto próbę zwiększenia



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia aparatury georadarowej na wysięgniku urabiającym [18]

rozdzielczości aparatury pomiarowej poprzez zwiększenie częstotliwości fal do 200 MHz. Podczas pozyskiwania danych zmianie podlegała prędkość obrotu wysięgnika. Ustalono, iż największą skuteczność w rozpoznawaniu anomalii w górotworze uzyskano przy wartości prędkości obrotu rzędu 0,5 m/s [20].

Kolejnym przykładem zastosowania metody georadarowej były przeprowadzone w latach 2000 i 2004 badania w KWB Bełchatów [5]. W pierwszym przypadku lokalizowano leje zapadliskowe, stanowiące deformacje nieciągłe, na obszarze 40 x 100 m, gdzie zastosowano anteny o częstotliwościach 80 i 500 MHz, dzięki czemu uzyskano dane do głębokości 32 m. Otrzymane wyniki zostały porównane z danymi z archiwalnymi z otworów rozpoznawczych, usytuowanych na obrzeżach badanego georadarem obszaru. Efektem analizy przeprowadzonych badań był model zachowania się występujących kawern w zależności od ich wielkości i głębokości zalegania, a także przewidywanie wielkości powstających na powierzchni lejów.

Kolejne pomiary przeprowadzono w 2004 r. na obszarze 200 x 200 m, przy ustawieniu anten na częstotliwość 50 MHz. Ich celem było wyznaczenie granicy pomiędzy utworami marglistymi kredy górnej a utworami węgla brunatnych, poprzez wykonanie profilowań wzdłuż 8 linii pomiarowych o długościach około 100 – 150 m.

Dwie spośród wszystkich linii zlokalizowane były blisko pracującego przenośnika taśmowego. Wpływało to istotnie na wyniki pomiarów, dlatego też zwiększona została rozdzielczość aparatury pomiarowej. Zasięg głębokościowy tej metody wynosił 20 metrów [17]. Korelacja wyników z danymi archiwalnymi pozwoliła na stwierdzenie występowania w badanym obszarze uskoków, a także istnienia struktur tektonicznych typu fleksuralnego. Zastosowanie metody georadarowej pozwoliło na dokładniejsze określenie lokalizacji wykrytych nieciągłości.

Generalnie rzecz biorąc metoda georadarowa ma szerokie zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu (m. in. w górnictwie) jak i w innych dziedzinach życia codziennego.

Zastosowanie metod geofizyki wiertniczej

Geofizyka wiertnicza (otworowa), jako zespół metod geofizycznych, dostarcza wielu szczegółowych informacji o parametrach fizycznych skał w postaci tzw. profilowań. Metody te dostarczają informacji o właściwościach ośrodka skalnego w warunkach naturalnego zalegania występujących w obrębie danego otworu warstw geologicznych. Pomiar wykonywany jest przy pomocy sond przymocowanych z reguły do świdrów wiertniczych. Pomiar odbywa się zazwyczaj podczas przemieszczania sondy z dołu do góry, z ciągłą rejestracją danych. Spośród parametrów rejestrowanych przez sondy wymienić można [2,7]:

- oporność elektryczna i polaryzacja samoistna,
- promieniotwórczość naturalna i wzbudzona,
- własności akustyczne skał,
- średnica otworu wiertniczego,
- temperatura otworu wiertniczego.

Wszystkie spośród wymienionych parametrów rejestrowane są w trakcie wyciągania sondy na powierzchnię. Przy pomocy uzyskanych z otworów informacji można:

- zlokalizować i określić ilościowo formacje o dużej porowatości i przepuszczalności,
- rozpoznać występowanie płynów złożowych oraz podać

- nasycenie nimi ośrodka skalnego,
- przy pomocy profilowań wielu otworów wyznaczyć korelację przestrzenną wydzielen stratygraficznych, litostratygraficznych oraz poziomów zbiornikowych,
- wspomagając się materiałem rdzeniowym analizować zmienność cech skał osadowych, które odzwierciedlają ich warunki sedymentacyjne – analiza profili zmienności

uziarnienia, rozpoznanie środowiska sedymentacyjnego, prognozowanie trendów porowatości i przepuszczalności. Na chwilę obecną stosowane metody pomiarowe geofizyki otworowej można podzielić na trzy grupy – tabela 4.

Metody profilowania geofizyki otworowej wykorzystywane są do identyfikowania budowy geologicznej nadkładu zalegającego nad węglem brunatnym w kopalniach Zagłębia BHP-Utah

Tab. 4. Znane i stosowane metody pomiarowe geofizyki otworowej [7]

Grupa profilowania	Podgrupa	Sposób działania metody	Uzyskane informacje	Zastosowanie
Elektrooporowe	Profilowania potencjałów naturalnych PS (polaryzacji samoistnej)	Infiltracja strefy przyodwiertowej filtrem płuczki bądź na skutek koncentracji jonowych w wodach złożowych i w filtracie	Powstaje potencjał filtracyjno-dyfuzyjny	<ul style="list-style-type: none"> • przestrzenna korelacja warstw, • wydzielenie warstw przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych, • określanie miąższości warstw, • określanie mineralizacji wód złożowych, • interpretacja środowisk sedymentacji
	Profilowanie oporności PO (oporności pozornej)	Pomiar oporności pozornej profilu warstw	Podstawa do określenia porowatości efektywnej oraz rodzaju i wielkości przestrzeni porowej skał	<ul style="list-style-type: none"> • wykrywanie surowców mineralnych (ropa, gaz, węgiel, itd.), • badanie litologii, • wyznaczanie współczynnika porowatości i przepuszczalności
Radiometryczne	Profilowanie gamma PG	Pomiar naturalnej promieniotwórczości emitowanej przez pierwiastki: tor (Th), uran (U), potas (K)	Całkowita wielkość radiacji uzyskana od wymienionych pierwiastków: Th, U, K	<ul style="list-style-type: none"> • określanie litologii, • określanie zasobów minerałów promieniotwórczych, • określanie zailenia, • korelacja międzyotworowa
	Spektralne profilowania sPG	Rejestracja naturalnej promieniotwórczości izotopów Th, U oraz K. Profilowanie wykonywane sondą wyposażoną w kryształ NaI (jodek sodu aktywowany talem Tl)	Zapis promieniowania gamma przekształcony w widmo umożliwiające rejestrację poszczególnych izotopów	<ul style="list-style-type: none"> • określanie litologii, • wykrywanie stref spękanych i stylolitów, • rozpoznanie środowisk sedymentacyjnych, • korelacja międzyotworowa
	Profilowanie gamma-gamma PGG	Rejestracja rozproszonego stężenia promieniowania wzbudzanego sztucznie generatorem w sondzie (np. aktywnym kobaltem)	Przeliczona z tzw. gęstości elektronicznej intensywność promieniowania wtórnego pozwala na określenie gęstości objętościowej	<ul style="list-style-type: none"> • ocena zmian gęstości objętościowej warstw (a także ich porowatości), • określanie składu mineralnego i litologii, • kontrola stanu zacementowania przestrzeni pozarurowej, • wykrywanie węglowodorów
	Profilowanie neutronowe PN	Bombardowanie strefy przyodwiertowej strumieniem neutronów wzbudzanych w sondzie	Określenie wielkości wtórnego promieniowania (gamma)	<ul style="list-style-type: none"> • określanie porowatości, • określanie litologii, • oznaczanie horyzontów gazonośnych
Akustyczne	Profilowanie akustyczne PA	Badanie zmienności prędkości rozchodzenia się fal sprężystych	Zależność fal sprężystych od parametrów ośrodka	<ul style="list-style-type: none"> • ocena współczynnika porowatości, • określanie litologii, • identyfikacja stref spękań, • określanie przepuszczalności

Tab. 5. Strefy oporów urabiania wyróżnione w Zagłębiu BHP-Utah Ltd. [4]

Nr strefy	Opory urabiania	Wymagana siła urabiania KA [kPa]	Czas przejścia fali akustycznej [$\mu\text{s/m}$]	Kryteria geologiczno - geofizyczne
1	Bardzo niskie	< 150	-	Nadkład niezdiagenezowany – osady trzeciorzędowe
2	Niskie	150 – 450	> 620	Bardzo słabe, zawadnione skały osadowe
3	Umiarkowane	450 – 600	490 – 620	Bardzo słabe, zawadnione skały osadowe, z możliwym niskim stopniem zdiagenezowania. Prędkość fali akustycznej 1500 – 2000 m/s
4	Wysokie	600 – 750	410 – 490	Słabe, zawadnione skały osadowe, z możliwym niskim stopniem zdiagenezowania. Prędkość fali akustycznej 1500 – 2000 m/s
5	Graniczne	750 – 1000	320 – 410	Słabe, umiarkowanie zawadnione skały osadowe z wkładkami łupkowymi, z możliwym umiarkowanym stopniem zdiagenezowania. Prędkość fali akustycznej 1500 – 3000 m/s
6	Utwory nie urabialne (konieczność użycia MW)	> 1000	< 320	Umiarkowanie mocne do mocnych skał o średnim stopniu zawadnienia. Zawierające spoiwo żelaziste. Prędkość fali akustycznej 1500 – 2500 m/s

Coal Ltd. (BUCL), usytuowanego w zachodniej części Australii. W obszarze tym występuje osiem pól węglowych, gdzie odwierconych zostało ponad 1500 otworów. We wszystkich spośród dostępnych otworów wykonano pomiary gamma, natomiast ponad 15 % z nich jest zawadnionych (od głębokości 10 m), w których to wykonano profilowania akustyczne a rzadziej neutronowe. Pomiary dostarczyły informacji geologicznych dotyczących warstw nadkładu dla kopalń Saraji oraz Blackwater.

W wyniku analizy danych wydzielono sześć stref geotechnicznych określających parametry urabiania nadkładu – tabela 5.

Wraz ze wzrostem głębokości (numeru strefy) wzrastają opory urabiania. Skały zlokalizowane w obszarach strefy 6 mogą być urabiane wyłącznie z użyciem MW. Analiza tego typu umożliwi zaplanowanie systemu eksploatacji pod zadane warunki geologiczne nadkładu.

Ze względu na małą średnicę otworów geofizyka wiertnicza pozwala na rozpoznanie złoża w ograniczonej strefie przyotworowej, jednak pozyskane w ten sposób informacje są najdokładniejsze spośród wszystkich metod geofizycznych. W przypadku nieregularnej bądź rzadkiej siatki otworów korelacja danych może być utrudniona. Sprawdzana jest więc zależność wyników pomiędzy różnymi profilowaniami. Przykładowo w tym celu można wykorzystać metody profilowań akustycznych oraz neutronowych – rysunek 2.

Charakterystyka i możliwości zastosowania metod sejsmiki otworowej

Pionowe profilowania sejsmiczne (PPS), to wariant pomiarów wykonywanych w otworach wiertniczych. Są metodą pośrednią pomiędzy geofizyką otworową oraz sejsmiką. Pomiary wykonywane są na zasadzie odbioru, przez umieszczone w otworze geofony, sygnału sejsmicznego, który generowany jest na powierzchni terenu [3,9]. Umieszczenie geofonów w otworze pozwala na zmniejszenie (w stosunku do metody sejsmicznej)

odległości horyzontu odbijającego od odbiornika, dzięki temu uzyskiwana jest lepsza rozdzielczość. Parametrem mierzalnym w metodzie PPS jest podobnie jak w przypadku klasycznej sejsmiki prędkość propagacji fali sejsmicznej. W wyniku badań ekstremalnych określona została zależność pomiędzy prędkością fali sejsmicznej a urabialnością skał zrywarkami. W tabeli 6 przedstawiono urabialność za pomocą kombajnów odkrywkowych dla głównych skał magmowych, osadowych oraz metamorficznych.

Pionowe profilowania sejsmiczne można wykorzystywać wszędzie tam, gdzie znajdują się otwory wiertnicze. Stosuje się niskoenergetyczny sygnał wibratorowy emitowany przez dłuższy czas. Wpływa to na zmniejszenie intensywności niekorzystnych drgań i wibracji, dzięki czemu jest on bezpieczny dla pracujących w kopalni ludzi i maszyn, w przeciwieństwie do sygnału pochodzącego z detonacji MW.

Dane uzyskiwane tą metodą są dokładne, jednak nie znalazła ona zastosowania w praktyce kopalnianej, ponieważ wykonywanie pomiaru i jego interpretacja wymaga użycia specjalistycznego sprzętu. W Polsce tylko kilka przedsiębiorstw dysponuje odpowiednim zapleczem technicznym wymaganym do prowadzenia badań tego typu, co dodatkowo podnosi ich koszty.

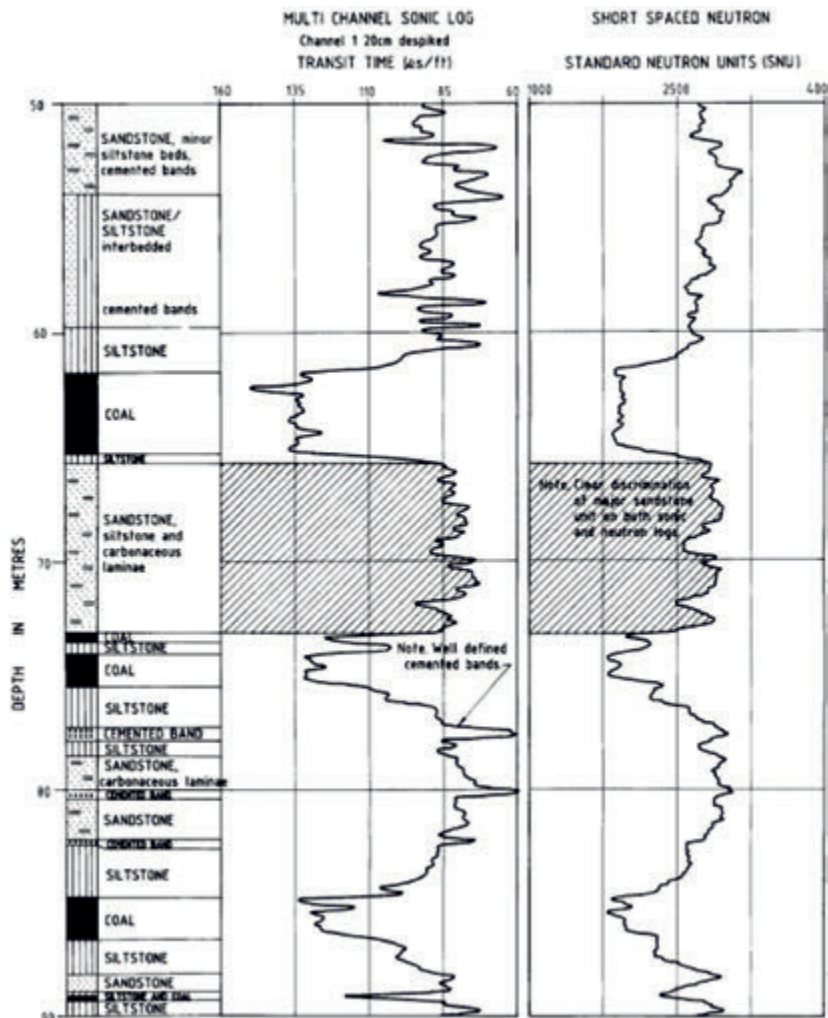
Charakterystyka i możliwości zastosowania metod geoelektrycznych

Działania tych metod oparte są na wykorzystaniu parametrów elektrycznych ośrodka skalnego. Najpowszechniej wykorzystywana jest metoda elektrooporowa. W metodzie tej wprowadzona jest sztucznie stała różnica potencjałów w systemie elektrod umieszczonych w ośrodku skalnym. Efektem tego dostarczane są informacje dotyczące oporności elektrycznej badanych skał. Metodę elektrooporową stosować można w dwóch wariantach pomiarowych: sondowania i profilowania.

Sondowanie polega na wykonaniu pomiarów oporu pozor-

Tab. 6 Zakres urabialności skał w zależności od prędkości fali sejsmicznej

Prędkość fali sejsmicznej [km/s]			Granica urabialności [m/s]	
Rodzaj skały/minerału			2750	
magmowe	Granit		2750	
	Bazalt		2800	
	Tuf		2800	
osadowe	Łupek		3600	
	Piaskowiec		3450	
	Piaskowiec drobnoziarnisty		3450	
	Iłowiec		3450	
	Zlepieniec		3250	
	Brekcja		3250	
	Wapień		3600	
meta- mor- ficzne	Łupek zmetamorfizowany		3000	
	Fylit		3100	
Mine- rally rudne	Węgiel		3250	
	Ruda żelaza - hematyt		3450	
		- skały urabialne	- skały urabialne warunkowo	- skały nieurabialne



Rys. 2. Identyfikacja litologiczna obszaru wykonania na podstawie profilowań akustycznych i neutronowych [4]

nego przy wzrastającej symetrycznie względem środka układu pomiarowego odległości między elektrodami zasilającymi A i B, podczas gdy odległość pomiędzy elektrodami MN pozostaje stała. Zwiększenie rozstawu AB powoduje wzrost zasięgu głębokościowego. Wykonywanie sondowań umożliwia uzyskanie generalizowanego głębokościowego profilu geoelektryczno-geologicznego.

do eksploatacyjnego rozpoznania złoża. W zależności od rodzaju zadania, specyfiki obszaru badań, a także oczekiwanych rezultatów niektóre metody będą aplikowały się lepiej do zadań górniczych od innych. Porównanie właściwości najważniejszych grup metod opisanych w tym opracowaniu przedstawia tabela 7.

W przypadku zasięgu głębokościowego określono mak-

Tab. 7. Zestawienie najważniejszych wad i zalet metod geofizycznych stosowanych do eksploatacyjnego rozpoznania złoża

Metoda geofizyczna	Zasięg głębokościowy	Wariant wykonywania pomiarów	Czas wykonywania pomiaru/interpretacji	Koszt wykonywania pomiarów	Dokładność uzyskanych wyników
Georadarowa	Do 80 m (efektywny zasięg do 20 m)*	Wariant klasyczny Wariant w czasie rzeczywistym	Krótki Natychmiastowy	Średni Niski	Dobra – warunkowo (występuje ekwiwalencja wyników)
Geofizyki otworowej	W zależności od głębokości otworu wiertniczego	Wariant klasyczny	Długi	Duży lub bardzo duży (w przypadku braku otworów)	Doskonała***
Sejsmiki otworowej	W zależności od głębokości otworu wiertniczego	Wariant klasyczny	Średni	Duży	Bardzo dobra
Elektrooporowe	150 – 200 m**	Wariant klasyczny	Krótki	Średni	Dobra – warunkowo (występuje ekwiwalencja wyników)

* zasięg głębokościowy uzależniony jest głównie od częstotliwości stosowanych anten, ** zasięg głębokościowy uzależniony jest głównie od szerokości rozstawu AB i MN, *** kompleksowe dane geofizyki otworowej stanowią wyznacznik do korelacji dla pozostałych metod

Profilowanie to wykonanie w różnych punktach linii profilu pomiarów oporu pozornego przy jednakowej odległości między elektrodami A i B oraz MN. W metodzie tej odległości między elektrodami nie zmieniają się. Cały układ pomiarowy przesuwany jest wzdłuż profilu pomiarowego. Głębokość penetracji w tym wariancie jest stała. Profilowania dostarczają informacji o poziomych zmianach oporności pozornej ośrodka [1].

Metoda elektrooporowa, spośród metod geoelektrycznych, jest obecnie najczęściej wykorzystywana w kopalniach. Sprawdza się najlepiej w sytuacji, gdy w ośrodku geologicznym występuje duży kontrast parametrów elektrycznych. Zdolność rozdzielczą ogranicza występowanie przypowierzchniowych warstw wysokooporowych (np. piaski wydymowe) oraz występowanie w profilu warstw ekranujących (wysokooporowych, np. gipsy). Zabudowa rejonu badań stanowi poważną przeszkodę w stosowaniu metody. Wysoki poziom zakłóceń, wynikający z występowania prądów przemysłowych, uniemożliwia wykonanie pomiarów. Zasięg głębokościowy badań geoelektrycznych prowadzonych metodami elektrooporowymi wynosi do 150 – 200 m, co z punktu widzenia rozpoznania eksploatacyjnego jest w pełni wystarczające. Podstawowym problemem metody elektrooporowej jest występowanie zjawiska ekwiwalencji wyników polegające na tym, że ich interpretacja jest wieloznaczna. Bezbledne odtworzenie modelu geologicznego bez korelacji z wynikami uzyskanymi inną metodą może być utrudnione. Stąd też badania elektrooporowe często wykorzystywane są jako metoda kontrolna.

Analiza porównawcza metod geofizycznych

Możliwości techniczne pozwalają na obecnym etapie rozwoju wykorzystywać bardzo wiele grup metod geofizycznych

symalne wartości. W zależności od warunków geologicznych oraz wielu czynników zdolność rejestracji może się znacząco zmniejszyć. W tabeli 7 zastosowano skalę porównawczą określającą zależności względne poszczególnych cech opisywanych metod.

Analizując zasięg głębokościowy widać wyraźnie, że każda z opisywanych metod spełnia oczekiwania rozpoznania geofizycznego prowadzonego dla potrzeb bieżącego wydobycia. W przypadku wszystkich metod (za wyjątkiem geofizyki otworowej) pojęcie zasięgu głębokościowego jest bardzo umowne. Zdolność detekcji danej warstwy lub struktury geologicznej uzależniona jest od kilku czynników m. in. rozdzielczości, miąższości rozpoznawanych utworów, głębokości zalegania, złożoności budowy geologicznej badanego obszaru oraz od kontrastu parametrów pola fizycznego wykorzystywanego przez daną metodę. Brak kontrastu w przypadku georadaru (stała dielektryczna), metody elektrooporowej (oporność elektryczna skał) i sejsmiki otworowej (prędkość propagacji fal sprężystych) powoduje duże utrudnienia w identyfikacji szukanych struktur. Może się także przyczynić do niezarejestrowania cienkich laminek lub pojedynczych wkładek przewarstwiających grube masywy. W tego typu przypadkach dana metoda powinna być eliminowana, a następnie zastępowana alternatywną wykorzystującą inne pole fizyczne.

Większość pomiarów w kopalniach wykonywanych jest w wariancie klasycznym. Obecnie podejmuje się próby modyfikacji sposobów prowadzenia pomiarów, a także wprowadzania specjalnych rozwiązań, celem dostosowania danych metod do warunków panujących w kopalni. Zabiegi te mają na celu przyspieszenie czasu pomiaru i interpretacji, minimalizację utrudnień w pracy kopalni oraz poprawę efektywności. Najlepsze rezultaty udało się osiągnąć w przypadku metody georadarowej,

co zostało szczegółowo opisane w rozdziale omawiającym zasadę działania oraz zastosowania metody georadarowej.

Ważnym czynnikiem jest także czas wykonania pomiaru i otrzymania wyników. Spośród metod realizowanych w wersji klasycznej najbardziej czasochłonna jest geofizyka otworowa i metoda pionowych profilowań sejsmicznych. W przypadku braku otworów rozpoznawczych do czasu wykonania pomiaru należy doliczyć czas wiercenia. Geofizyka otworowa jest także jedyną inwazyjną metodą geofizyczną. Długi czas wykonywania pomiarów sejsmicznych w wariancie otworowym związany jest z koniecznością rozstawienia ciężkiego sprzętu – pojazdu/pojazdów generujących sygnał (wibratora), a także rozmieszczenia geofonów w otworze. Niewielka liczba firm na terenie kraju specjalizuje się w tego typu pracach, co zgodnie z zasadami ekonomiki wolnego rynku w pewnym stopniu podwyższa i tak już wysokie koszty prowadzenia tego typu prac. W przypadku geofizyki otworowej znaczące są same koszty wiercenia i późniejszego utrzymania otworu, gdyż tego typu ingerencja w górotwór powoduje szereg komplikacji i zagrożeń eksploatacyjnych.

Dokładność geofizyki otworowej uzależniona jest głównie od warunków geologicznych oraz kompleksowości wykonywanych profilowań. Dane uzyskiwane w wyniku sejsmiki i geofizyki otworowej, wykorzystującej bardzo szeroki wachlarz profilowań, są zdecydowanie najdokładniejsze i stanowią reper korelacyjny dla stosowanych metod kontrolnych. Zdecydowanie tańsze i prostsze w zastosowaniu są metody geoelektryczne i georadarowe. Niestety, częstym problemem jest występujące

zjawisko ekwiwalencji wyników. W przypadku zaistnienia tego typu utrudnień stosuje się dowiązywanie wyników stosowanej metody do danych z otworów wiertniczych.

Podsumowanie

Przytoczone przykłady i rozważania dotyczące wykorzystania metod geofizycznych w górnictwie odkrywkowym wyraźnie świadczą o dużych możliwościach i użyteczności tej dziedziny badań. Pomimo szerokiego wachlarza dostępnych metod nie każda spełnia swoją funkcję ze względu na inwazyjność (np. geofizyka otworowa) oraz ograniczenia techniczne i organizacyjne pracy w kopalni. Dobra metoda badawcza przydatna w górnictwie musi spełniać szereg wymagań takich jak: niskie koszty, duża dostępność, krótki czas wykonania badań i otrzymania wyników, możliwość specjalnego wykorzystania i realizacji w czasie rzeczywistym, dokładność analizy itp. Nie powinna także nadmiernie zakłócać procesu eksploatacji. Wyżej wymienione restrykcje eliminują część rozwiązań, oraz ograniczają możliwości wykorzystania innych (np. geofizyki otworowej).

Podsumowując, na obecnym poziomie rozwoju geofizyka w dużym stopniu spełnia swoją rolę w procesie wykrywania utworów trudno urabialnych oraz lokalizacji pustek krasowych, a szczególnie przydatna wydaje się być metoda georadarowa. Należy oczekiwać w najbliższej przyszłości szybkiego rozwoju metod, których wykorzystanie nie będzie kolidowało z prowadzeniem eksploatacji górniczej.

Artykuł opracowano w ramach realizacji pracy statutowej 11.11.100.597

Literatura

- [1] Antoniuk J., *Materiały dydaktyczne z przedmiotu „Geoelektryka”* (nie publ.); Katedra Geofizyki, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH w Krakowie
- [2] Bała M., *Materiały dydaktyczne* (nie publ.)
- [3] Barański K., *Wykorzystanie filtracji F-K w przetwarzaniu danych sejsmiki powierzchniowej i otworowej*, Kraków 2009, praca magisterska (nie publ.)
- [4] Davies A.L., McManus D.A., *Geotechnical Applications of Downhole Sonic and Neutron Logging for Surface Coal Mining*, Exploration Geophysics 1990 21, 73-81
- [5] Dokumentacja pracy badawczo-usługowej: Rozpoznanie lokalizacji i struktury pustek krasowych w zachodnim obszarze północnego zbocza odkrywki „Bełchatów” wraz z oceną zagrożeń dla powierzchni i sposobów ich likwidacji, Kraków, 2000
- [6] Dubiński J., Pilecki Z., Zuberka W.M., *Badania geofizyczne w kopalniach*, Wydawnictwo GIG Katowice, 2001
- [7] Jarzyna J., Bała M., Zorski T., *Metody geofizyki otworowej: pomiary i interpretacja*, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 1999
- [8] Karczewski J., *Zarys metody georadarowej*. AGH, Kraków, 2007
- [9] Kasina Z., *Metodyka badań sejsmicznych*, Wydawnictwo Centrum PPGSMiE PAN, Kraków 1998
- [10] Kołkiewicz W., *Zastosowanie maszyn podstawowych w górnictwie odkrywkowym*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1974
- [11] Koziół W., Machniak Ł., *Problemy klasyfikacji i wydobywania trudno urabialnych skał i gruntów w kopalniach węgla brunatnego*, Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 34, Zeszyt 4, 2010

- [12] Kozioł W., Machniak Ł. *Wybrane technologie wydobycia skał trudno urabialnych w kopalniach węgla brunatnego*, *Górnictwo i Geoinżynieria* Rok 33, Zeszyt 2, 2009
- [13] Kozioł W., Sośniak E., Jończyk W., Machniak Ł., *Wydobycie skał trudno urabialnych w kopalniach węgla brunatnego*, *Górnictwo Odkrywkowe*, 5-6/2007
- [14] Kozioł W., Machniak Ł., *Metody rozpoznawania skał trudno urabialnych w kopalniach węgla brunatnego*, *Przegląd Górniczy*, 3-4/2009
- [15] Machniak Ł., Borcz A., *O możliwościach urabiania skał zrywarkami*, *Maszyny i surowce budowlane*, Nr 3, 2012
- [16] Machniak Ł., *Materiały dydaktyczne (nie publ.)*
- [17] P/Belchatów. *Profilowania radarem geologicznym RAMAC/GPR stropu podłoża mezozoicznego wraz z analizą wyników*, Politechnika Wrocławska, 2005
- [18] Petrich F., Kohler U., *Stone detection and stone excavation*, *World of Mining*, 2005, Part 57
- [19] *Poradnik Górnika T4* [pod redakcją Zuzuiak A.] wyd. 2, Katowice 1982
- [20] Rosenberg H., *Detection of materials and deposit as a basis for innovative operations management system employed as part of opencast mine process optimizations*, *World of Mining*, 2007, Part 59



fol. Renata S-K

Z cyklu: bogactwo struktury geologicznej skał