

## Zastosowanie metody inwersji danych z pomiarów elektrooporowych do oceny stanu termicznego hałdy pogórnicy w Chorzowie

Andrzej Kotyrba<sup>1</sup>, Sławomir Siwek<sup>1</sup>



A. Kotyrba

S. Siwek

**The use of the electrical resistivity data inversion method for thermal state assessment of a coal mine heap in Chorzów.** *Prz. Geol.*, 65: 496–504.

*Abstract.* Air conditions in post-mining areas are threatened by thermal activity of old spoil tips of coal mines. Reclamation operations cause only time-limited suppression of the oxidation process of carbon particles in the spoil heap. There are different reasons for that process. One of them is the incorrectly recognized geometry of the combustion spots in the spoil tip mass and the ways in which they are powered by oxygen from the atmosphere. The 1D inversion of vertical resistivity sounding data (VES) allows visualizing the down-going thermal effects and concluding about transport of atmospheric air (oxygen) and combustion gases in the whole mass.

The resistivity distribution within waste can effectively support interpretation of geochemical and geothermic observations made on the spoil tip. The article describes the results of resistivity measurements made on an old spoil tip with waste from coal production in a heavy urbanized area of Chorzów City. Currently, the area of the former spoil heap is used for recreation and sports purposes (a park).

**Keywords:** Upper Silesia, coal, waste, spoil tip, geothermics, geoelectrics

Jednym z elementów krajobrazu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, będącym następstwem prowadzonej od ponad 200 lat eksploatacji złóż węgla kamiennego, są hałdy odpadów pokopalnianych. Na składowiskach tych deponowano produkty uboczne z eksploatacji złóż węgla, m.in. skały płonne wydobywane razem z węglem, do których często dodawano odpady z przeróbki kopalni rudnych oraz odpady z hut. Zwałowano na nich również, w sposób zorganizowany lub niezorganizowany, odpady komunalne. Zdeponowany materiał skalny pochodzenia górniczego składa się głównie z lokalnych łupków i piaskowców karbońskich, lecz zawiera także węgiel kamienny o różnej granulacji – są to pyły, miąły i okruchy skalne. Zawartość węgla w składowiskach wynosi od kilku do kilkudziesięciu procent. Przeważnie jest ona odwrotnie proporcjonalna do wieku składowiska i jest pochodną stosowanych technologii sortowania oraz płukania węglowego urobku.

Węgiel zawarty w składowanym materiale ulega utlenianiu w procesie wietrzenia, które inicjuje jego spalanie. Proces ten stwarza zagrożenie dla ludzi, zanieczyszcza środowisko. W wyniku spalania węgla następuje wzrost temperatury zwałowanego gruntu i emisja do atmosfery toksycznych gazów oraz nieprzyjemnych zapachów. Wysoka temperatura gruntu przyczynia się do zanikania szaty roślinnej na powierzchni zwałowiska.

### CEL I OBIEKT BADAŃ

Celem badań było rozpoznanie wglębnej struktury zwałowiska odpadów powęglowych i pohnitcznych, usytuowanego w Chorzowie przy ul. Floriańskiej (ryc. 1), wraz z lokalizacją obszarów, w których zachodzą w nim procesy spalania węgla. Składowisko to od wielu lat jest nieczynne, w wyniku rekultywacji zostało przekształcone w park i znajduje się w gęsto zabudowanym rejonie miasta.

W górnej części zwałowiska dominują lokalne łupki karbońskie, a podrzędnymi składnikami są węgiel i piaskowce. Z archiwalnych danych wynika (Gogola i in., 2015), że w dolnej części tego obiektu zostały zdeponowane odpady pohnitczne (spieki kamienia wsadowego). Domieszki węgla są rozproszone w masie składowiska. Lokalnie mogą się układać w warstwy o mniejszym i większym procentowym udziale węgla. Pod względem granulometrycznym wszystkie składniki składowiska występują w szerokim przedziale frakcji – od pyłowej do kamienistej. Przypowierzchniową warstwę składowiska stanowią gleby humusowe, które leżą na gruntach zwietrzelinowych powstałych z łupków, piaskowców i węgla.

W części północno-zachodniej powierzchnia składowiska ma podwyższoną temperaturę. Wyraźnie widać na niej efekty pożaru w postaci wypalonych odpadów, a poprzez szczeliny i spękania powstałe na skutek skurczu temperaturowego tego materiału następuje emisja gazów. W części tej przebiega proces spalania węgla i innych składników gruntu odpadowego. Emisja gazów do środowiska jest odczuwana przez mieszkańców okolicznych budynków i bardzo dla nich uciążliwa.

Od strony wschodniej wierzchowina zwałowiska jest płaska, pod niewielkim kątem nachylona w kierunku zachodnim. Rzędne wierzchowiny są zbliżone do rzędnych powierzchni terenu przylegającego do wschodu i wynoszą ok. 298–299 m n.p.m. Od strony północnej i zachodniej materiał składowiska został zdeponowany nadpoziomowo względem otoczenia, a bryła składowiska przybiera kształt stożka o ostro zarysowanych skarpach. U jego podstawy rzędne powierzchni oscylują wokół 288–289 m n.p.m. Od strony południowej skarpa jest mniej stroma. Jej podstawa znajduje się na wysokości 296–297 m n.p.m. Miąższość składowiska zmienia się od kilku metrów w rejonie skarpy zachodniej do ok. 20 m w części wschodniej.

<sup>1</sup> Zakład Geologii i Geofizyki, Główny Instytut Górnictwa, pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice, akotyryba@gig.eu, ssiwek@gig.eu.

## METODYKA

Zróznicowanie właściwości elektrycznych skał i gruntów sprawia, że do obrazowania budowy strukturalnej składowisk wykorzystuje się metodę elektrooporową. Parametrem oznaczanym podczas pomiarów wykonywanych tą metodą jest pozorna oporność elektryczna skał  $\rho_p$  (stanowiąca odwrotność przewodnictwa  $\sigma$ ) w funkcji rozstawu elektrod zasilających AB, który jest analogiem głębokości.

Większość skał przewodzi prąd elektryczny w wyniku ruchu jonów w zawartej w nich wodzie – zatem oporność elektryczna skał zależy od ich wilgotności. Oporność elektryczna skał jest też zależna od ich temperatury – wzrasta w wyniku parowania wody (w temperaturach dodatnich) lub sublimacji (w temperaturach ujemnych).

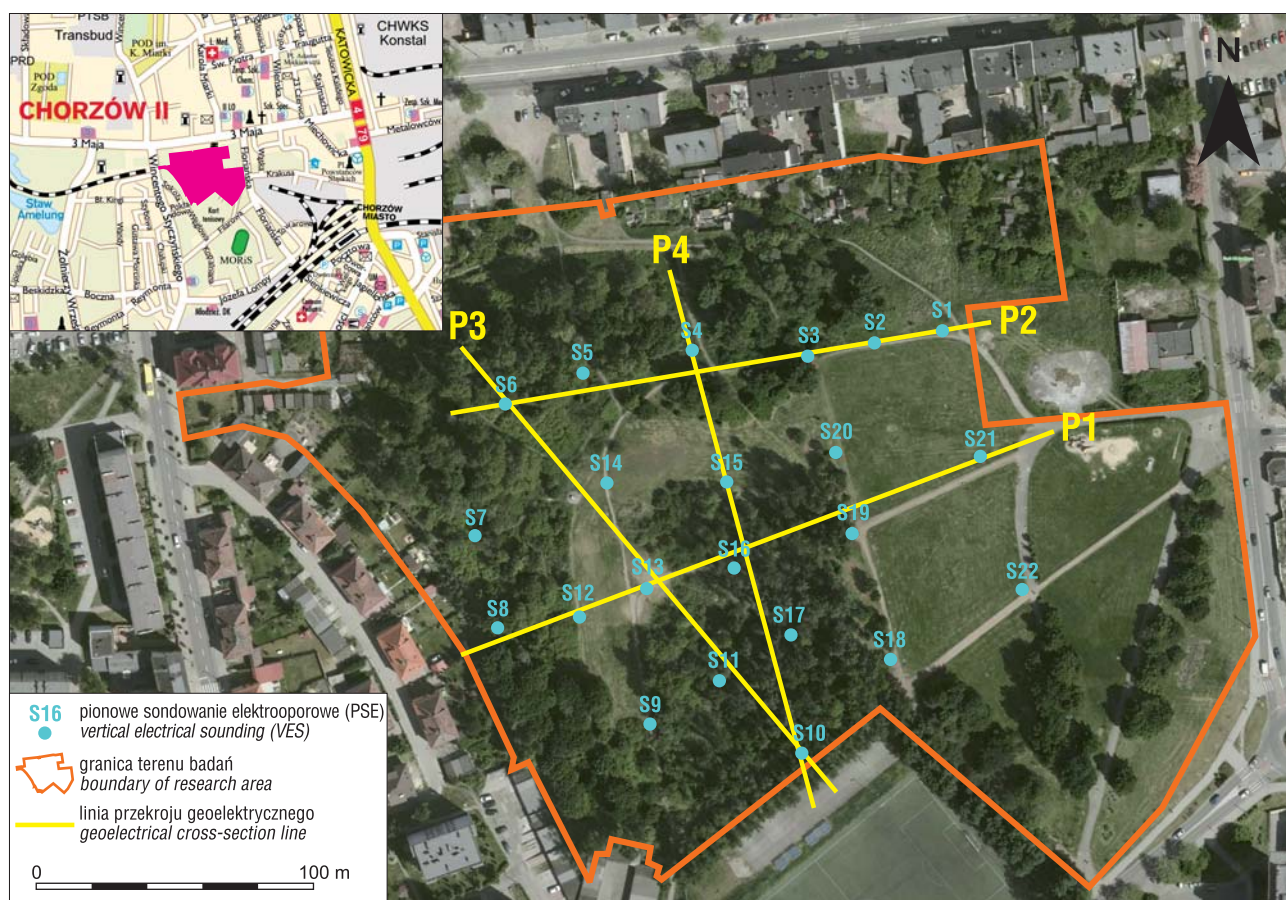
Każda ze skał ma odmienną zależność temperaturową oporności elektrycznej (Plewa, Plewa, 1992). Analitycznie może być ona aproksymowana funkcjami liniowymi lub potęgowymi. Odmiennie zachowują się węgle, które mają właściwości półprzewodników. Zależność ich oporności elektrycznej od temperatury najlepiej opisują funkcje wielomianowe (Kotyrbą, 1999).

Istotą zastosowania pomiarów elektrooporowych do badania zwałowisk odpadów z produkcji węgla jest właśnie silna zależność oporności elektrycznej gruntu skalnego od temperatury.

Metody elektrooporowe umożliwiają określenie cech strukturalnych oraz termicznych składowisk odpadów

powęglowych w przestrzeni trójwymiarowej (Kotyrbą i in., 2009; Łączny i in., 2012; Kotyrbą i in., 2012). Na podstawie wyników pomiarów elektrooporowych można określić geometrię i sposób ułożenia odpadów, typ i rodzaj odpadów oraz zaburzenia ich jednorodności przez kawerny i szczeliny powstałe w miejscach, w których węgiel uległ wypaleniu. Wyniki tych badań ukazują również rejonizację stref przepalonego gruntu w zwałowisku, zasięg procesów wietrzenia w masie składowiska oraz miąższość warstw gruntów spoistych, np. glin użytych do izolacji składowiska od atmosfery. Cechy te można określać za pomocą badań elektrooporowych na zwałowiskach odpadów, w których nie zachodzą procesy egzotermiczne. Natomiast na składowiskach, w których doszło do zapłonu składowanego odpadu pokopalnianego, dominujący wpływ na oporność elektryczną zwałowanego gruntu ma temperatura.

Grunt tworzący wierzchołkę składowiska, w którym procesy egzotermiczne przebiegają z dużą intensywnością, charakteryzuje się temperaturą rzędu 100°C i wyższą (Gogola i in., 2015), czego konsekwencją jest prawie całkowity brak w nim wody (i brak możliwości wytworzenia pola elektrycznego w gruncie sposobem galwanicznym). W powietrzu ponad takim składowiskiem utrzymują się zaś toksyczne gazy o znacznej koncentracji. Czynniki te sprawiają, iż wykonanie pomiarów elektrooporowych jest trudne i może być niebezpieczne dla zdrowia. Dotyczy to zwłaszcza pomiarów z zastosowaniem układów wieloelektrodowych, np. tomografii, z uwagi na konieczność zacho-



Ryc. 1. Lokalizacja sondowań i linii przekrojów elektrooporowych wykonanych na składowisku odpadów w Chorzowie na podkładzie sytuacyjnym ortofotomapy

Fig. 1. Location of VES measurement points and geoelectrical cross-sections within the coal mine heap in Chorzów on orthophotomap

wania jednoczesnego i ciągłego kontaktu z podłożem wielu elektrod oraz długi czas pomiaru w jednym profilu (minimum 6–8 godzin trwa rozłożenie, pomiar i złożenie układu). Z tych względów spośród trzech najczęściej stosowanych technik powierzchniowych pomiarów elektrooporowych, do których należą sondowanie, profilowanie i tomografia, do rozpoznania stanu termicznego zwałowisk odpadów z produkcji węgla rekomendujemy metodę sondowań elektrooporowych (PSE).

Stosując metodę PSE, można doświadczalnie wyszukać miejsca zapewniające zamknięcie obwodu prądu, a także szybko przeprowadzić prace terenowe i to zarówno na wierzchowinie zwałowiska, jak i na skarpach ograniczających jego bryłę, często bardzo stromych, przy relatywnie niskich kosztach prac i minimalizacji zagrożeń dla zdrowia zespołu wykonującego pomiary. Czynnikiem ekonomicznym ma tu istotne znaczenie ze względu na fakt, iż w procesie ustalania stanu termicznego składowiska, wielkości emisji gazów oraz ich oddziaływania na środowisko konieczne jest zastosowanie wielu dodatkowych metod badawczych (Łączny i in., 2012).

### POMIARY TERENOWE

Pomiary geofizyczne wykonano w 22 punktach badanego składowiska, rozmieszczonych w odległości 30–50 m (ryc. 1). Wykonano je metodą PSE w symetrycznym układzie Schlumbergera, co umożliwiło określenie zmian właściwości elektrycznych materiału składowiska w układzie pionowym (x, z). Zastosowano przy tym układ geometryczny elektrod o nazwie PBG, o stałych w skali logarytmicznej interwałach odległości pomiędzy elektrodami zasilającymi.

Rozstawy elektrod prądowych w układzie PBG są następujące: AB/2 = 1,5; 2; 2,6; 3,4; 4,5; 6; 8; 10,5; 14; 18; 24; 32; 42 i 55 m (14 punktów pomiarowych). Minimalny rozstaw między elektrodami prądowymi AB wynosił więc 3 m, a maksymalny 110 m. Rozstaw elektrod potencjałowych MN dla punktów 1–9 wynosił 0,5 m, natomiast dla kolejnych – 3,5 m (punkty 9–14).

Przyjęcie takiej metodyki pomiarów umożliwiło odwzorowanie właściwości elektrycznych składowanych odpadów do głębokości ok. 22 m p.p.t.

### INWERSJA DANYCH POMIAROWYCH

Parametrem uzyskiwanym z pomiarów elektrooporowych jest pozorna oporność elektryczna, będąca funkcją zastosowanego układu pomiarowego oraz strukturalnej budowy ośrodka gruntowego. W celu wyliczenia z tego parametru wartości elektrycznej oporności właściwej ośrodka (wielkość fizyczna niezależna od układu pomiarowego), konieczne jest zastosowanie metody inwersji danych elektrooporowych. Za pomocą tej metody na podstawie wyników filtracji liniowej (zadanie proste) przeprowadza się powtórna nieliniową filtrację danych elektrooporowych (zadanie odwrotne) w celu wyznaczenia oporności elektrycznej i grubości kolejnych warstw analizowanego modelu ośrodka. Związek pomiędzy pozorną opornością elektryczną i parametrami warstw jest wyrażony za pomocą równań całkowych, co szczegółowo opisali m.in. Koefoed (1970), Pekeris (1940) oraz Ekinici i Demirci (2008).

Dane pomiarowe poddano przetwarzaniu za pomocą inwersji 1D, dzięki czemu oszacowano rzeczywiste wartości oporności elektrycznej gruntów odpadowych znajdujących się w różnych stadiach aktywności termicznej. Następnie na podstawie otrzymanych krzywych modelowych utworzono dwuwymiarowe przekroje geoelektryczne przez badane składowisko. Konstrukcja przekrojów geoelektrycznych w układzie pseudo-2D umożliwiła identyfikację rejonów aktywnych termicznie (w których doszło do zapłonu węgla) oraz analizę i zobrazowanie dróg zasilania zwałowiska w tlen zawarty w powietrzu atmosferycznym.

Inwersja danych geofizycznych ma na celu znalezienie takiego modelu ośrodka, którego parametry wyznaczone w sposób matematyczny są zbliżone z wartościami pomierzonymi w terenie. Budowany model jest więc wyidealizowaną matematyczną reprezentacją fragmentu podłoża i opisuje się zestawem parametrów modelu. Parametry te są właściwościami fizycznymi, które należy wyznaczyć z pomierzonych danych.

Najczęściej stosowaną metodą jednowymiarowej inwersji danych elektrooporowych jest metoda najmniejszych kwadratów w wariancie regresji krawędziowej, której celem jest znalezienie takiej pary parametrów modelu (oporność właściwa warstwy, miąższość warstwy), które są najlepiej dopasowane do zebranych danych pomiarowych (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963; Inman, 1975; Dimri, 1992).

Możliwość zastosowania metody inwersji do analizy danych elektrooporowych jest szeroko opisana w literaturze naukowej, poczynając od inwersji danych jednowymiarowych (Koefoed, 1979; Loke, Barker, 1996a; Yin C.H., 2000; Slaoui i in., 2003; Vedanti i in., 2005) przez modelowanie dwuwymiarowe (Dahlin, Loke, 1998; Olayinaka, Yaramanci, 2000; Nguyen i in., 2003; Kotyrba, 2003; Loke, 2016) po modelowanie 3D (Loke, Barker, 1996b; Dahlin, 2001; Loke, 2016) i 4D, uwzględniające zmiany w czasie (Loke i in., 2013).

Budowę modelu ośrodka za pomocą metody inwersji uznaje się za rozwiązana, gdy w wyniku kolejnych kroków inwersji otrzymuje się taki sam model ośrodka (w tym przypadku – krzywą syntetyczną), a jego dopasowanie do danych pomiarowych (krzywa pomiarowa) jest najbliższe.

Modelowaniu numerycznemu z zastosowaniem inwersji danych elektrooporowych poddano wyniki z 22 punktów sondowań.

### WYNIKI BADAŃ I ICH INTERPRETACJA

Wyniki pomiarów elektrooporowych przeprowadzonych na składowisku (I – natężenie prądu w obwodzie AB,  $\Delta V$  – różnica potencjałów w obwodzie MN) zostały przeniesione do arkusza kalkulacyjnego, w którym wyliczono wartości pozornej oporności elektrycznej  $r$  dla każdego odczytu. Z danych tych utworzono zbiór charakteryzujący przewodnictwo elektryczne gruntów w zwałowisku. Statystyczną charakterystykę tych zbiorów przedstawiono w tabeli 1.

Przedział zmienności wartości pomiarowych jest bardzo szeroki. Po części wynika on ze zróżnicowania składu

**Tab. 1.** Parametry statystyczne zbioru wartości pomiarowych pozornej oporności elektrycznej zwałowiska odpadów powęglowych w Chorzowie przy ul. Floriańskiej

**Table 1.** Statistical parameters for apparent electrical resistivity measurements of the spoil heap in Chorzów in Floriańska Street

Wartość średnia <i>Mean value</i> [ $\Omega\text{m}$ ]	Przedział zmienności <i>Variation range</i> [ $\Omega\text{m}$ ]	Odchylenie standardowe <i>Standard deviation</i> [ $\Omega\text{m}$ ]
277	16–1815	330

gruntów w zwałowisku, a po części z ich stanu temperaturowo-wilgotnościowego.

Modelowanie numeryczne przeprowadzono za pomocą programu *IX1Dv3* amerykańskiej firmy Interpex Ltd na podstawie zbioru danych, który obejmował współrzędne punktów pomiarowych  $x$ ,  $y$ ,  $z$  oraz parametry krzywych (wartości pozornej oporności elektrycznej i rozstawy elektrod). Wysokość powierzchni zwałowiska w punktach wykonanych pomiarów określono na podstawie mapy sytuacyjno-wysokościowej. W wyniku modelowania dla każdej pomiarowej krzywej PSE określono rozkład warstw, do którego obliczona teoretycznie krzywa PSE jest najlepiej dopasowana.

Krzywe PSE zarejestrowane na badanym zwałowisku są różnego typu. Dominują układy trój- i czterowarstwowe typów K, H i HK (Stencel, Szymanko, 1973).

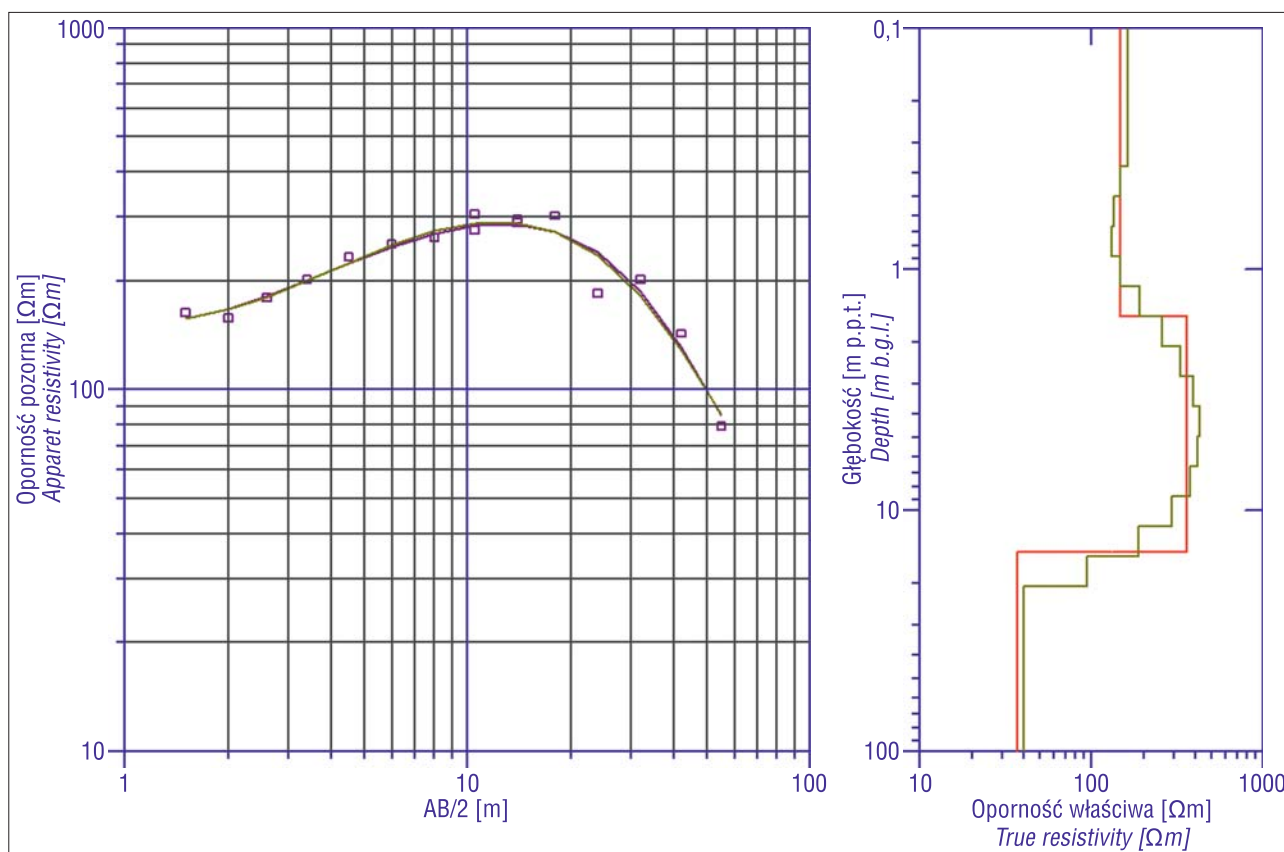
Na krzywych typu K oporność elektryczna podłoża rośnie do pewnej głębokości, a następnie maleje. Ilustruje to krzywa z sondowania w punkcie S4, przedstawiona na ryc. 2. Krzywe PSE typu K uzyskano na skarpach analizowanego

składowiska i na jego wierzcholinie w bezpośrednim sąsiedztwie skarp.

Na krzywej typu H oporność elektryczna gruntu maleje wraz z głębokością, a następnie rośnie. Natomiast na krzywej typu HK oporność elektryczna gruntu wpraw maleje wraz z głębokością, potem rośnie, a na większej głębokości ponownie maleje. Krzywe tego typu dominują w sondowaniach wykonanych na wierzcholinie składowiska (ryc. 3).

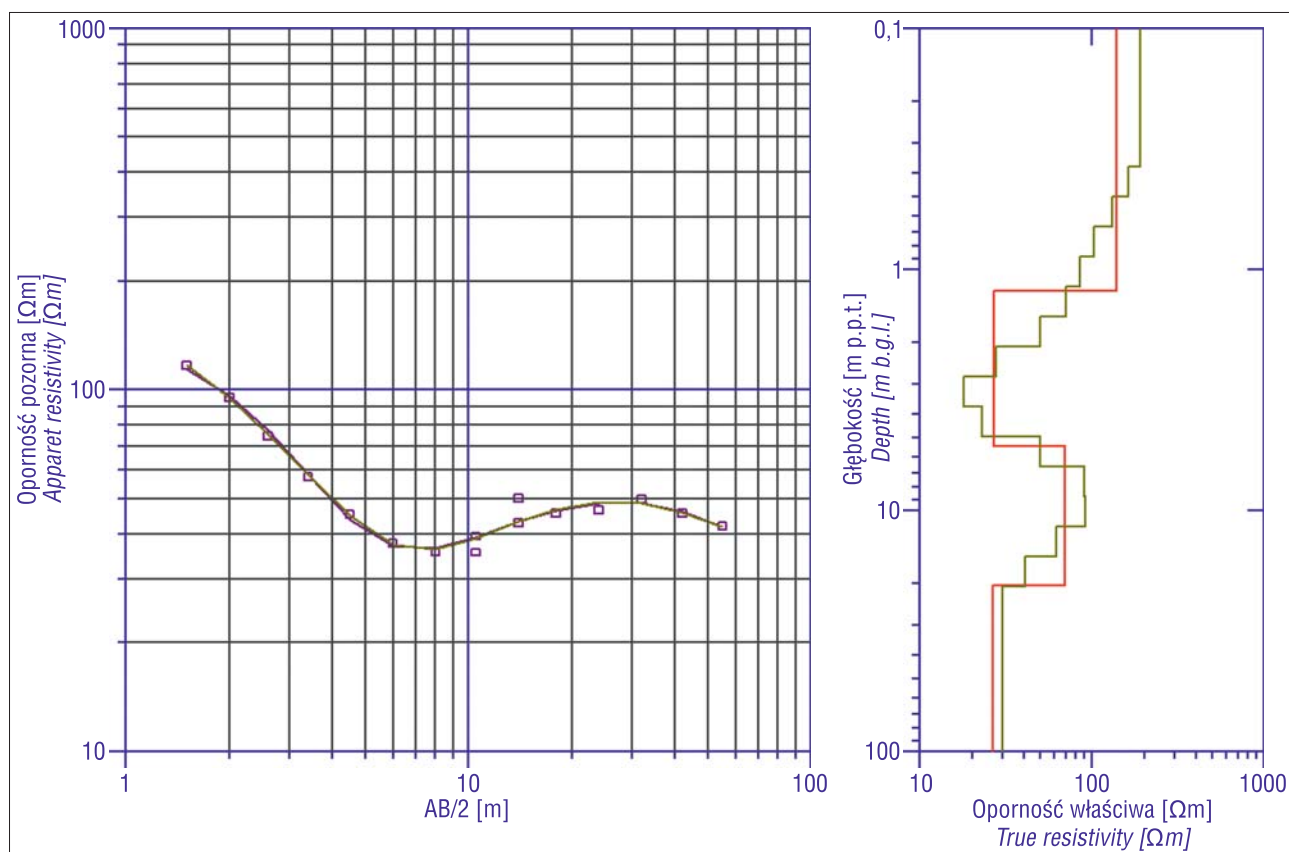
Elektryczna oporność właściwa utworów zwałowiska zmieniała się w przedziale od 10 do ok. 2000  $\Omega\text{m}$ . Oporność elektryczna o wartości zbliżonej do dolnej granicy tego przedziału jest charakterystyczna dla nieprzeobrażonych termicznie łupków karbońskich. Natomiast oporność elektryczna o wartości rzędu 2000  $\Omega\text{m}$  znacznie przekracza wartości charakterystyczne dla skał występujących w bryle zwałowiska, czyli łupków, piaskowców i węgla.

Na krzywej uzyskanej z modelowania wyników pomiarów w profilu sondy S1 widać, że na głębokości od 1,5 do 8 m p.p.t. (ok. 6 m miąższości) dominują małe wartości oporności elektrycznej (10–20  $\Omega\text{m}$ ), zbliżone do oporności elektrycznej glin ilastych (ryc. 3). Najprawdopodobniej jest to związane z utrzymywaniem się wody w tej warstwie lub jej wysokim zawilgoceniem. Głębiej zalegająca warstwa, o oporności rzędu 40–70  $\Omega\text{m}$ , najprawdopodobniej charakteryzuje materiał izolowany od wpływów atmosferycznych. Spadek wartości oporności elektrycznej na odcinku krzywej S1, obrazującym najgłębszą część składowiska, należy wiązać z penetrowaniem gruntów występujących w podłożu składowiska, którymi są czwartorzędowe gliny i piaski gliniaste.



**Ryc. 2.** Syntetyczna i pomiarowa krzywa PSE w punkcie S4 oraz model warstwowy

**Fig. 2.** A synthetic VES curve and a measured VES curve at point No. S4, and a layered model



**Ryc. 3.** Syntetyczna i pomiarowa krzywa PSE w punkcie S1 oraz model warstwowy  
**Fig. 3.** A synthetic VES curve and a measured VES curve at point No. S1, and a layered model

Obserwowane na krzywych wyższe wartości oporności (powyżej 80 Ωm) są najprawdopodobniej związane z procesem rozgrzewania się cząstek węgla w niskim zakresie temperatur, rzędu 20–40° Celsjusza, na skutek utleniania z wydzielaniem CO<sub>2</sub>. Gdy dochodzi do zapłonu węgla, temperatura gruntu odpadowego przekracza 160–200° Celsjusza, a jego oporność elektryczna gwałtownie wzrasta o kilka rzędów (Kotyrbka, 1999).

W celu zobrazowania położenia w bryle zwałowiska miejsc aktywnych termicznie, na podstawie krzywych syntetycznych PSE opracowano przekroje geoelektryczne ukazujące stan składowiska w październiku 2015 r. (ryc. 4–7). W górnej części każdego z rysunków umieszczono krzywe pomiarowe (dane bezpośrednie). Natomiast w dolnej ich części ukazano interpolowane rozkłady rzeczywistych wartości oporności elektrycznej w płaskim układzie 2D (dane z inwersji).

Rozkład wartości oporności właściwej utworów składowiska przedstawiony na przekroju P1 (ryc. 4) ukazuje, że granica pomiędzy podłożem, w którym występują niskooporowe gliny, a materiałem składowiska przebiega na wysokości 278–280 m n.p.m.

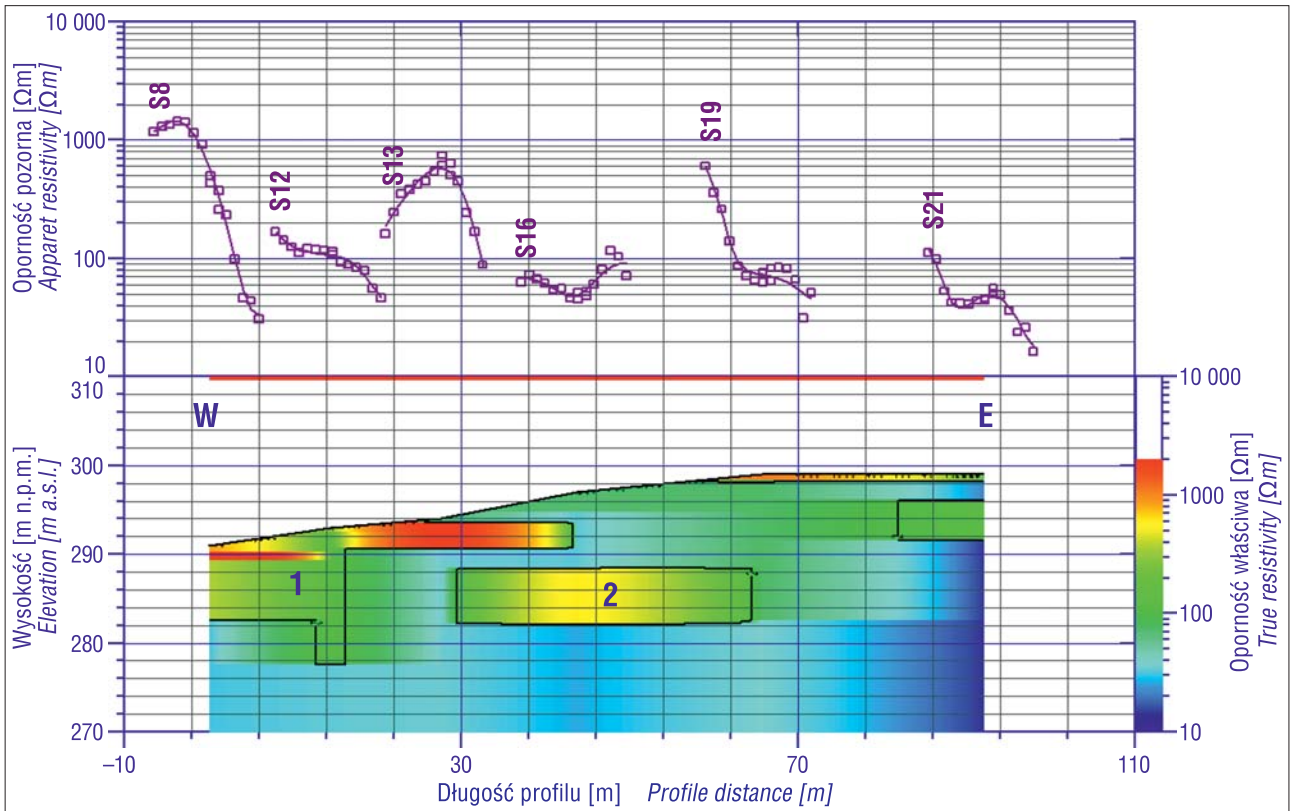
W bryle składowiska wyraźnie zaznaczają się dwie strefy o dużej oporności elektrycznej – od 200 do blisko 2000 Ωm (ryc. 4). Tak duża oporność elektryczna gruntów jest efektem zachodzącej w składowisku reakcji spalania węgla. Referencyjny poziom wydzielania ze zbioru danych elektrooporowych jako anomalii wartości większych od 200 Ωm dobrze koreluje z wyższą temperaturą gruntu i większą zawartością w nim tlenków węgla (CO i CO<sub>2</sub>), która

została określona na podstawie wyników pomiarów termicznych i gazowych przeprowadzonych na składowisku (Gogola i in., 2015).

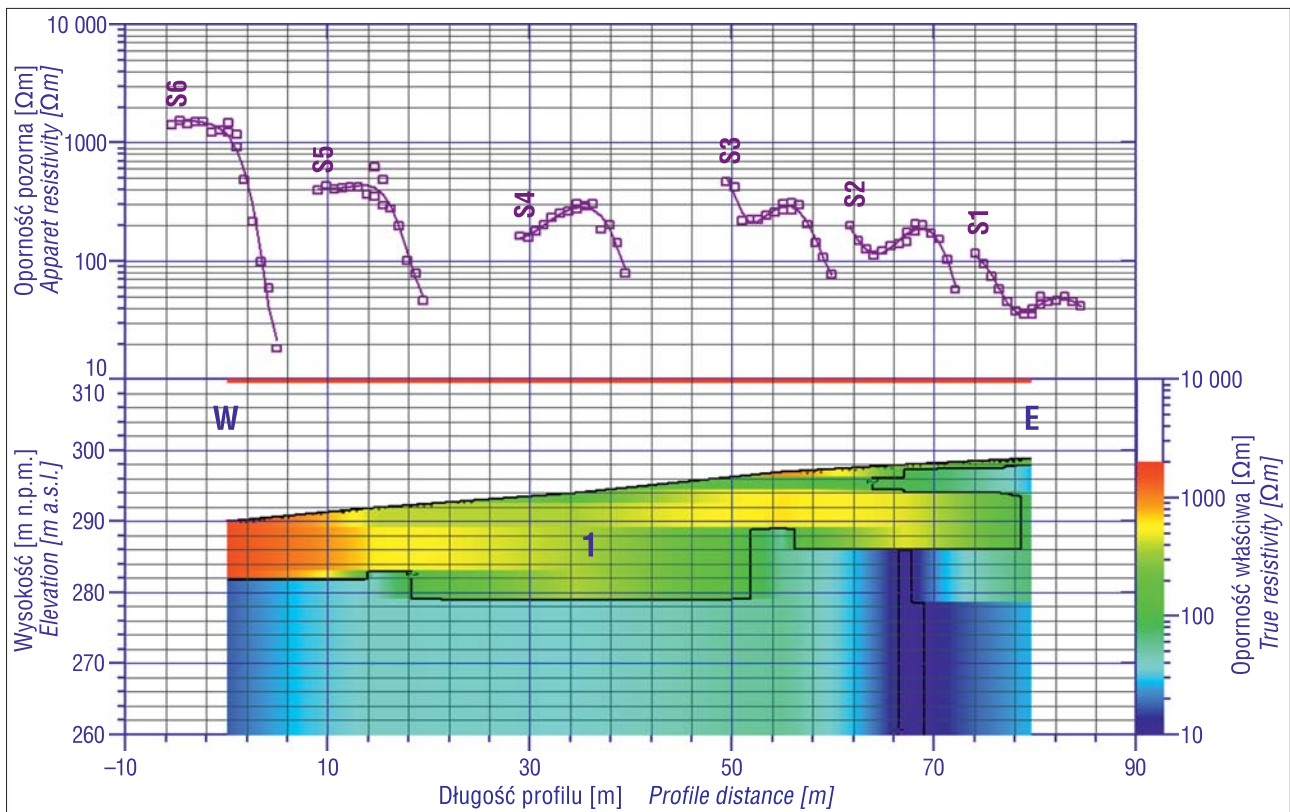
Pierwsza strefa o dużej oporności występuje w nadpoziomowej, zachodniej części składowiska, w rejonie skarpy o wysokości 6–8 m. Na powierzchni składowiska znajdującej się ponad tą strefą wyraźnie widać efekty pożaru w postaci wypalonego, zagranego materiału składowiska. W strefie tej oporność elektryczna gruntu przekracza miejscami wartość 1000 Ωm (np. w profilu sondy S13). Świadczy to o silnym i postępującym procesie palenia się węgla w warunkach swobodnego dostępu tlenu z powietrza atmosferycznego.

Strefę pożaru w nadpoziomowej części składowiska wyraźnie widać również na przekroju P2 o przebiegu W–E, sporządzonym na podstawie sondowania wykonanego wzdłuż północnej krawędzi wierzchołki (ryc. 5). Prawie na całej linii tego przekroju odpady pokopalniane podlegają procesowi spalania, i to od powierzchni do podstawy składowiska. Jedynie w rejonie sondy S1, zlokalizowanej na wierzchołku wschodniej krawędzi składowiska, nie zaobserwowano objawów pożaru. Proces spalania najsilniej przebiega w zachodniej części hałdy. Również profil P3 (ryc. 6), sporządzony na linii NW–SE, obrazuje ten sam proces pożarowy.

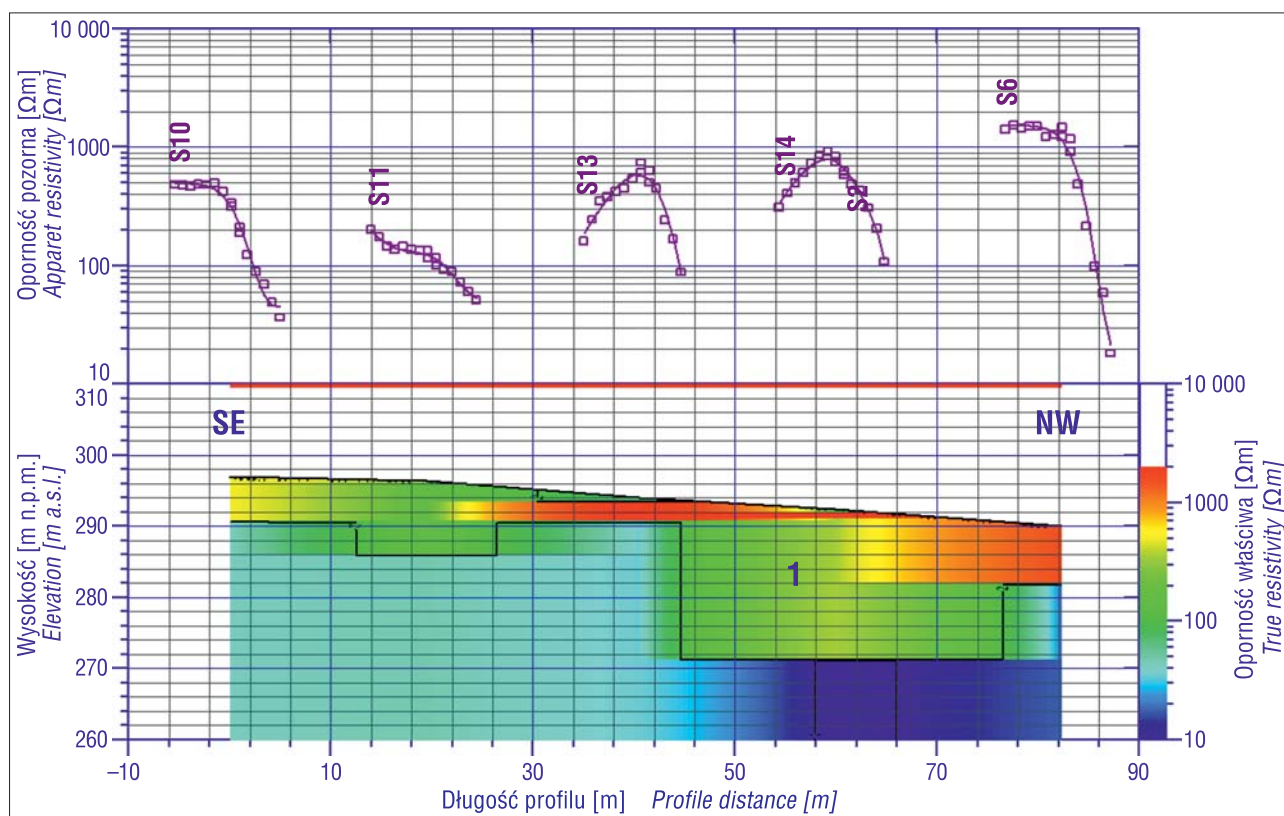
Na podstawie analizy przekrojów P1, P2 i P3 można wnioskować, że pożar rozwijający się w przypowierzchniowej warstwie objął już sporą część składowiska, w której materiał odpadowy był składowany nadpoziomowo względem otoczenia. Przy czym w północno-zachodnim



**Ryc. 4.** Przekrój geoelektryczny P1 przez środkową część składowiska odpadów powęglowych w linii W–E (październik 2015 r.)  
**Fig. 4.** W-E-trending geoelectrical cross-section P1 through the central part of the spoil heap (October 2015)



**Ryc. 5.** Przekrój geoelektryczny P2 przez składowisko odpadów powęglowych w linii W–E wzdłuż północnej krawędzi wierzchołku (październik 2015 r.)  
**Fig. 5.** W-E-trending geoelectrical cross-section P2 along the north top edge of the spoil heap (October 2015)



**Ryc. 6.** Przekrój geoelektryczny P3 przez składowisko odpadów powęglowych w linii SE–NW w części zachodniej (październik 2015 r.)  
**Fig. 6.** SE–NW-trending geoelectrical cross-section P3 along the west top edge of the spoil heap (October 2015)

narożniku procesy spalania zachodzą bardzo intensywnie, a od strony skarpy północnej są przytłumione. Z obrazów elektrooporowych wynika, że pożar sięga do centralnej części składowiska (rejon punktu S19).

Druga strefa o podwyższonej oporności, oznaczona numerem 2 na przekroju P1 (ryc. 4), ma inne właściwości. Wyinterpolowane maksymalne wartości właściwej oporności elektrycznej w obrębie tej strefy oscylują wokół 400  $\Omega\text{m}$ . Leży ona w środkowej części składowiska, na głębokości od ok. 6 do 10 m pod poziomem wierzchołki. Miąższość tej strefy wynosi kilka metrów, a rozciągłość – kilkadziesiąt. Ponad tą strefą (np. w rejonie sondy S16) nie zaobserwowano na powierzchni składowiska żadnych objawów palenia się materiału. Najprawdopodobniej jest to strefa drugiego ogniska pożaru w składowisku, którego rozwój jest ograniczony bardzo małym dopływem powietrza atmosferycznego. Wykonanie w obrębie tej strefy otworu lub wkopu może spowodować bardzo szybki rozwój pożaru.

Strefa nr 2 zaznacza się również na przekroju P4 (ryc. 7), wykonanym prostopadłe do P1. Na przekroju tym wyraźnie widać, że pomiędzy strefą intensywnego pożaru w przy powierzchniowej części składowiska (1) a strefą głęboką (2) istnieje połączenie. Świadczy ono o drodze migracji tlenu, który jest przyczyną rozwoju pożaru w strefie 2.

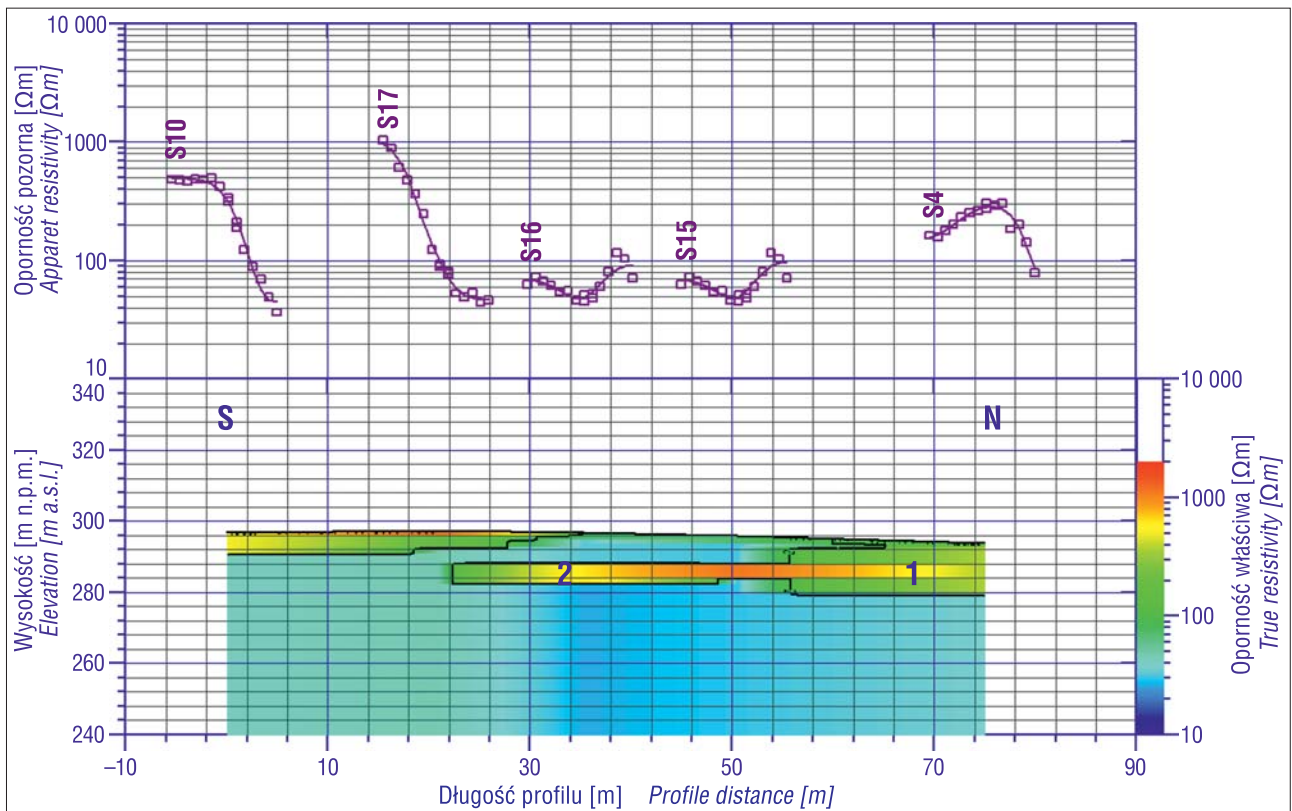
Z rozkładu wartości oporności elektrycznej na przekrojach wynika, że w północno-zachodniej i północnej części zwałowiska procesy spalania węgla zachodzą w całym przekroju hałdy, jednak różna jest ich intensywność. Na podstawie analizy przekrojów elektrooporowych można wnioskować, że tlen zawarty w powietrzu atmosferycznym wędruje do aktywnych termicznie rejonów składowiska

z przyległych do wierzchołki skarpy. Jedynie południową część hałdy można uznać za nieaktywną termicznie. Być może w tej części hałdy były składowane żużle hutnicze. Położenie stref 1 i 2 w planie badanego składowiska przedstawiono na ryc. 8.

Wyniki badań elektrooporowych są zgodne z informacjami uzyskanymi podczas terenowych obserwacji składowiska, dotyczącymi m.in. kondycji porastającej je roślinności oraz emisji spalin do atmosfery (Gogola i in., 2015).

## PODSUMOWANIE

Interpretując dane z pomiarów elektrooporowych wykonanych na zwałowiskach odpadów z produkcji węgla należy uwzględnić fakt, iż oporność elektryczna tych odpadów zależy od wielu ich właściwości fizycznych. W związku z tym interpretacja zbioru zarejestrowanych danych pomiarowych może być niejednoznaczna. Anomalie oporności elektrycznej materiału składowiska w obrazowaniach płaskich lub przestrzennych mogą być bowiem powodowane zarówno przez podwyższoną temperaturę w trakcie wykonywania pomiaru, jak i przez przeobrażenie gruntu odpadowego pod wpływem procesu termicznego działającego w przeszłości. Wieloznaczność tę można jednak wyeliminować, korelując dane elektrooporowe z wynikami pomiarów geotermicznych (np. za pomocą termowizji lub pomiarów temperatury gruntu w płytkich otworach) i geochemicznych (prowadząc pomiary składu i zawartości tlenków węgla w glebie i atmosferze) lub wykonując wiercenia sprawdzające.



Ryc. 7. Przekrój geoelektryczny P4 przez środkową część składowiska odpadów powęglowych w linii N-S (październik 2015 r.)  
 Fig. 7. N-S-trending geoelectrical cross-section P4 through the central part of the spoil heap (October 2015)



Ryc. 8. Wizualizacja zasięgu procesów pożarowych w składowisku odpadów pokopalnianych w Chorzowie (październik 2015 r.)  
 Fig. 8. Visualization of the thermally active area within the spoil heap in Chorzów (October 2015)



Pomiary elektrooporowe wykonywane okresowo po likwidacji aktywności termicznej składowiska umożliwiają prowadzenie monitoringu jego stanu. Na podstawie zbioru danych elektrooporowych z różnych momentów czasowych można jednoznacznie określić genezę anomalii oporności elektrycznej w danym rejonie składowiska, która może być efektem występowania przepalonego łupku lub strefy kawernisto-szczelinowej po spalonych w przeszłości nagromadzeniach węgla albo może być powodowana przez podwyższoną temperaturę odpadów na skutek utleniania się cząstek węgla.

## WNIOSKI

Metoda sondowań elektrooporowych wykonywanych w nieregularnej siatce punktów pomiarowych okazała się przydatna do precyzyjnego okonturowania w składowisku odpadów powęglowych w Chorzowie dwóch stref ogarniętych pożarem oraz do określenia dynamiki zachodzących w nich procesów spalania.

Proces spalania cząstek węgla intensywnie zachodzi w przypowierzchniowej warstwie składowiska (czyli w strefie nr 1), co powoduje wzrost temperatury niepalnych składników gruntu odpadowego i emisję gazów do środowiska.

W głębszej części składowiska (w strefie nr 2) proces spalania jest przytłumiony przez ograniczony dostęp tlenu i nie powoduje uciążliwych skutków na powierzchni, jednak będzie dużo trudniejszy do zlikwidowania.

Działania mające na celu ugaszenie pożaru składowiska powinny objąć przede wszystkim północną i zachodnią jego część. Należy jak najszybciej odciąć dopływ powietrza atmosferycznego do wnętrza składowiska, ze szczególnym uwzględnieniem zamknięcia dróg migracji powietrza do głębokich partii objętych pożarem.

Badania nad wykorzystaniem oporności elektrycznej skał do zwalczania zagrożeń pożarowych w kopalniach węgla kamiennego zostały rozpoczęte w latach 1994–1996 w polsko-amerykańskim projekcie badawczym sfinansowanym przez fundusz im. Marii Curie Skłodowskiej (Maria Skłodowska Curie Fund II) pt. „Wykrywanie ognisk pożarów w kopalniach węgla i na składowiskach odpadów przez pomiary oporności elektrycznej” (sygn. MP-BOM-93-150). Były one kontynuowane w latach 2008–2011 w projekcie POIG 1.3 pt. „System zarządzania likwidacją emisji CO<sub>2</sub> ze zwałowisk powęglowych” i są rozwijane nadal w ramach prac własnych Głównego Instytutu Górniczego. Autorzy artykułu dziękują Recenzentom za cenne uwagi, a Redakcji Przeglądu Geologicznego za przygotowanie artykułu do druku.

## LITERATURA

DAHLIN T. 2001 – The development of DC resistivity imaging techniques. *Computer & Geosciences*, 27: 1019–1029.  
DAHLIN T., LOKE M.H. 1998 – Resolution of 2D Wenner resistivity imaging as assessed by numerical modelling. *J. Appl. Geophys.*, 38: 237–249.  
DIMRI V.P. 1992 – Deconvolution and inverse theory Application to geophysical Problems. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co.: 139–146.  
EKINCI Y.L., DEMIRCI A. 2008 – A damped Least-squares Inversion Program for the interpretation of Schlumberger Sounding Curves. *J. Appl. Geophys.*, 8: 4070–4078.

GOGOLA K., BAJERSKI A., OLSZEWSKI P., KOTYRBA A., FROLIK A., KORTAS Ł., SIWEK S., GRĄDZIEL M., CHRYST R., PAWLAK A., JAREMA P., ZMORA U., KAWALEC E. 2015 – Badania stanu termicznego wraz z opracowaniem koncepcji likwidacji zjawisk termicznych oraz koncepcji zagospodarowania terenu zlokalizowanego na (zrehabilitowanej) haldzie pogórczej w Chorzowie u zbiegu ulic Floriańskiej i Filarowej. Dokumentacja Konsorcjum Firmy Haller S.A. i Głównego Instytutu Górniczego. Katowice (praca nie publikowana).  
INMAN J.R. 1975 – Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40 (5): 798–817.  
KOEFOED O. 1970 – A fast method for determining the layer distribution from the raised kernel function in geoelectrical soundings. *Geophys. Prospect.*, 18: 564–570.  
KOEFOED O. 1979 – *Geosoundings Principles 1: Resistivity Soundings Measurements*. Elsevier Scientific Pub. Co. Amsterdam.  
KOTYRBA A. 1999 – Przewodnictwo elektryczne a zdolność do samozagrzewania się węgla kamiennych. *Arch. Mining Sciences*, 44 (3): 435–447.  
KOTYRBA A. 2003 – Obrazowanie pustek pogórczych metodą elektrotomografii. *WUG. Bezp. Pracy i Ochr. Środ.* w Górnictwie, 1 (101): 21–27.  
KOTYRBA A., GRĄDZIEL M., GOGOLA K. 2012 – Zastosowanie metody elektrooporowej w badaniach stanu termicznego składowisk odpadów z produkcji węgla. *Prz. Gór.*, 4: 53–61.  
KOTYRBA A., KORTAS Ł., SIWEK S. 2009 – Obrazowanie ognisk pożarów w składowiskach odpadów z produkcji węgla metodą sondowań elektrooporowych. Poster. II Konferencja nt. Geologia, hydrogeologia i geofizyka w rozwiązywaniu problemów górnictwa i energetyki, UŚL, Sosnowiec 4–7 października 2009.  
LEVENBERG K. 1944 – A method for the solution of certain non-linear problems in least-squares. *Quart. Appl. Math.*, 2: 164–168.  
LOKE M.H. 2016 – Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. *Geotomo Software*, Malaysia.  
LOKE M.H., BARKER R.D. 1996a – Rapid least square inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi Newton method. *Geophys. Prospect.*, 44: 131–152.  
LOKE M.H., BARKER R.D. 1996b – Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys. Prospect.*, 44: 499–523.  
LOKE M.H., CHAMBERS J.E., RUCKER D.F., KURAS O., WILKINSON P.B. 2013 – Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *J. Appl. Geophys.*, 95: 135–156.  
ŁĄCZNY M.J., BAJERSKI A., BARAN J., CICHY M., GOGOLA K., GRĄDZIEL M., JANIK A., JANOSZEK T., KOTYRBA A., MICHALAK M., OLSZEWSKI P., RYSZKO A., SZAFRANIEC A., ŚWINDER H. 2012 – Opracowywanie i wdrażanie innowacyjnych technologii środowiskowych stosowanych na zwałowiskach odpadów powęglowych. Podstawy teoretyczno-metodyczne i przykłady praktyczne. Pr. zbior. Wyd. Nauk. Inst. Technologii Eksploatacji - PIB.  
MARQUARDT D.W. 1963 – An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J. Soc. Industr. Appl. Math.*, 11 (2): 431–441.  
NGUYEN F., GARAMBOIS S., JONGMANS D., PIRARD E., LOKE M.H. 2003 – Image processing of 2D resistivity data for imaging faults. *J. Appl. Geophys.*, 57: 260–277.  
OLAYINAKA A.I., YARAMANCI U. 2000 – Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion. *J. Appl. Geophys.*, 45: 63–81.  
PEKERIS C.L. 1940 – Direct method of interpretation in resistivity prospecting. *Geophysics*, 5: 31–42.  
PLEWA M., PLEWA S. 1992 – *Petrofizyka*. Wyd. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.  
SLAOUI F.H., GEORGES S., LAGACE P.J., DO X.D. 2003 – The inverse problem of Schlumberger resistivity sounding measurements by ridge regression. *Elect. Pow. Syst. Res.*, 67: 109–114.  
STENCEL P., SZYMANKO J. 1973 – Metody geofizyczne w badaniach hydrogeologicznych i geologiczno-inżynierskich. Wyd. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.  
VEDANTI N., SRIVASTAVA R.P., SAGODE SAGOWE., DIMRI V.P. 2005 – An efficient 1D Occam's inversion algorithm using analytically computed first- and second-order derivatives for DC resistivity soundings. *Computers & Geosciences*, 31.  
YIN C.H. 2000 – Geoelectrical inversion for one-dimensional anisotropic model and inherent non-uniqueness. *Geophysics J.*, 140: 11–23.

Praca wpłynęła do redakcji 26.09.2016 r.  
Akceptowano do druku 31.01.2017 r.