



Zenon PILECKI*, Elżbieta PILECKA**

Podstawowe zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami

Streszczenie: Badanie osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami należy do najtrudniejszych zagadnień geofizycznych ze względu na ich wieloprzyczynowość i skomplikowany charakter przebiegu procesu osuwiskowego. Właściwe rozpoznanie geofizyczne wymaga uprzedniego, możliwie szerokiego zebrania i analizy danych geologiczno-inżynierskich o terenie badań, jak również specjalnej metodyki pomiaru, przetwarzania i interpretacji danych geofizycznych.

W pracy zdefiniowano przedmiot rozpoznania w badaniach osuwisk i terenów zagrożonych metodami geofizycznymi. Wyróżniono metody geofizyczne, które mają najważniejsze znaczenie w warunkach geologiczno-inżynierskich typowych osuwisk na terenie Polski. Zalicza się do nich metodę georadarową, sejsmiczną i elektrooporową. Przedstawiono podstawowe zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami. Autorzy wyróżnili w nich etap przygotowania do pomiarów geofizycznych oraz realizacji badań z podkreśleniem metodyki pomiarowej, przetwarzania i interpretacji danych geofizycznych. Podkreślono również podstawowe zalety i ograniczenia metod geofizycznych.

Słowa kluczowe: osuwiska, metody geofizyczne, metodyka badań

Basic rules of geophysical methods use on the landslide and on the terrain at risk of landslide

Abstract: The study of landslides and terrains at risk of landslide is one of the most difficult geo-physical issues due to their multi-causality and complex nature of the landslide process. A proper geophysical recognition requires precedent, broad collection of geological-engineering data and their analysis about the area of research, as well as a special methodology for measuring, processing and interpretation of geophysical data.

The object of recognition in landslide geophysical investigation has been defined in the paper. Geophysical methods, which are of the utmost importance in geological-engineering conditions of typical landslides in Poland have been distinguished. These include the method of GPR, seismic and electrical resistivity. The basic rules

* Dr hab. inż., prof. IGSMiE PAN, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: pilecki@min-pan.krakow.pl

** Dr hab. inż., prof. PK, Politechnika Krakowska, Kraków; e-mail: epilecka@pk.edu.pl

for the application of geophysical methods in the study of landslides and terrains at risk of landslide have been presented. The authors have identified them in the stage of preparing for the geophysical surveys and in the stage of research with an emphasis on the methodology of measurement, processing and interpretation of geophysical data. It also highlights the main advantages and limitations of geo-physical methods.

Keywords: landslide, geophysical methods, methodology

1. Wstępne informacje o metodach geofizycznych

Badanie osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami należy do najtrudniejszych zagadnień geofizycznych ze względu na ich wieloprzyczynowość i skomplikowany charakter przebiegu procesu osuwiskowego. Właściwe rozpoznanie geofizyczne wymaga uprzedniego, możliwie szerokiego zebrania i analizy danych geologiczno-inżynierskich o terenie badań, jak również specjalnej metodyki pomiaru, przetwarzania i interpretacji danych geofizycznych. W związku z coraz dokładniejszą geofizyczną aparaturą pomiarową i bardziej zaawansowanym i często zautomatyzowanym oprogramowaniem, podkreślenia wymagają uniwersalne zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami.

Metody geofizyczne służą do bezinwazyjnego badania właściwości i budowy ośrodka geologicznego oraz procesów fizycznych w nim zachodzących. Bezinwazyjność tych badań świadczy o braku potrzeby bezpośredniego dostępu do ośrodka za pomocą wykopu badawczego, otworu badawczego lub innych wyrobisk. W zależności od metody geofizycznej badane są parametry różnych pól fizycznych: właściwości elektromagnetycznych, sprężystości, oporności elektrycznej i innych.

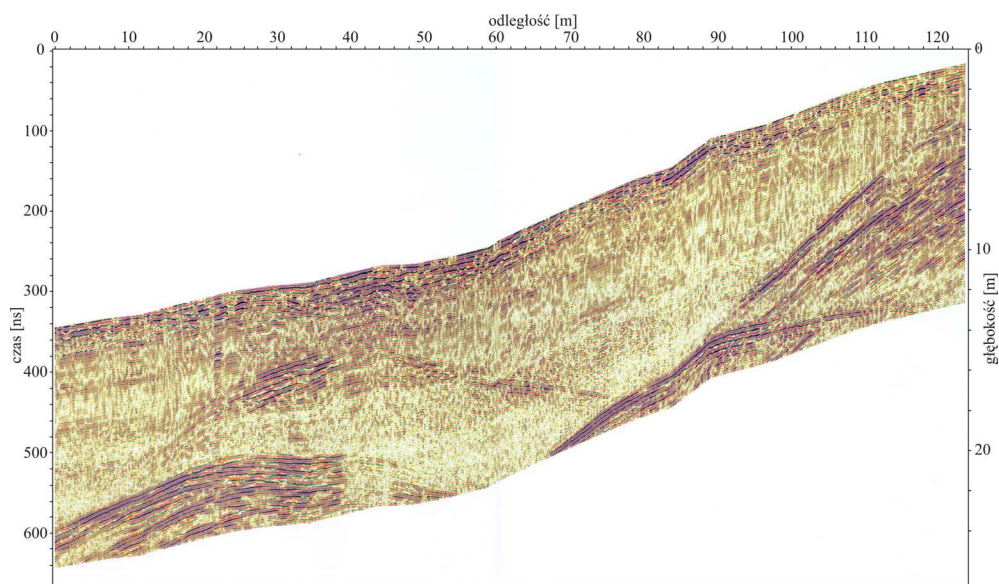
Metody geofizyczne rozwijają się niezwykle szybko wraz z postępem techniki komputerowej, w tym przetwarzania danych i transmisji cyfrowej. Większa precyzja pomiaru parametrów pól fizycznych ośrodka geologicznego i większe możliwości przetwarzania i interpretacji danych pomiarowych stwarzają korzystne warunki dla rozwoju nowych metod geofizycznych i doskonalenia dotychczasowych. W związku z postępem metodologicznym dokonał się wyraźny podział na specjalizacje geofizyczne. Nie zawsze jest jednak możliwe ściśle przypisanie rozwiązywanego zadania geofizycznego do konkretnego rodzaju specjalizacji geofizycznej. Na przykład problematyka budowy i właściwości osuwisk skarp i zboczy i terenów zagrożonych osuwiskiem może być przedmiotem geofizyki środowiska w aspekcie rozpoznania geozagrożeń, lub geofizyki inżynierskiej w aspekcie zaprojektowania konstrukcji budowlanej dla zabezpieczenia jego stateczności, albo geofizyki górniczej, jeżeli dotyczy stateczności skarpy eksploatowanego wyrobiska odkrywkowego.

W przypadku badania osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskiem przedmiotem rozpoznania na ogół są:

- przebieg przypuszczalnych powierzchni poślizgu, będących jednocześnie kontrastem właściwości ośrodka,
- granice geofizyczne w ośrodku geologicznym, w tym litologiczne, większych spękań, lub położenia zwierciadła wód gruntowych,
- zmiany właściwości warstw ośrodka, a zwłaszcza identyfikacja strefy osłabienia.

Wiele metod geofizycznych może znaleźć zastosowanie w badaniach osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami. W warunkach geologiczno-inżynierskich typowych osuwisk na terenie Polski największe znaczenie mają takie metody geofizyczne jak:

- georadarowa GPR (ang. *Ground Penetrating Radar*) w schemacie profilowania 2D i 3D (rys. 1),
- sejsmiczna w technice profilowania refrakcyjnego 2D i 3D, a o mniejszym znaczeniu tomografia sejsmiczna, wielokanałowa analiza fal powierzchniowych MASW (ang. *Multichannel Analysis of Surface Waves*), a ostatnio interferometria sejsmiczna (rys. 2),
- elektrooporowa w technice profilowania (ang. *Electrical Resistivity Profiling*) i tomografii elektrooporowej ERT (ang. *Electrical Resistivity Tomography*) (rys. 3).



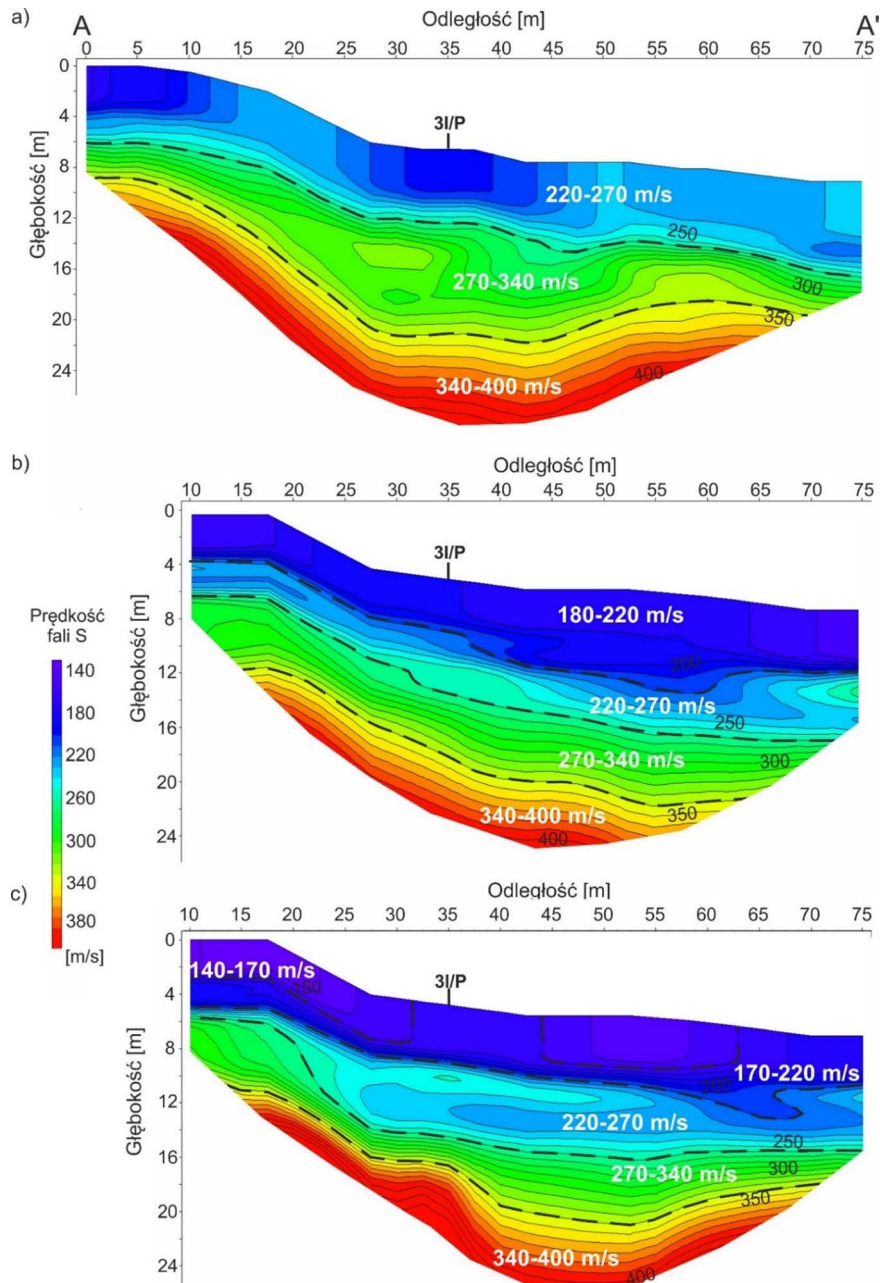
Rys. 1. Przykład radarogramu wzdłuż osi podłużnej osuwiska z widocznymi silnymi refleksami od zwięzłego podłoża tworzącego przypuszczalną powierzchnię poślizgu (Popiołek i in. 2007)

Fig. 1. An example of a radarogram along landslide axis with visible, strong reflections from a compact basement forming a presumed failure surface (Popiołek et al. 2007)

Wymienione metody zostały również wyróżnione jako najważniejsze w rozpoznaniu budowy i właściwości gruntów i skał przez Amerykańskie Stowarzyszenie Testowania i Materiałów (ASTM 1999). Znane są również przykłady zastosowania innych metod, takich jak: indukcji elektromagnetycznej EM (ang. *Electromagnetic Terrain Conductivity*), sejsmiki refleksyjnej, prześwietlania otworowego różnymi metodami geofizycznymi, mikrograwimetrycznej czy teledetekcyjnej.

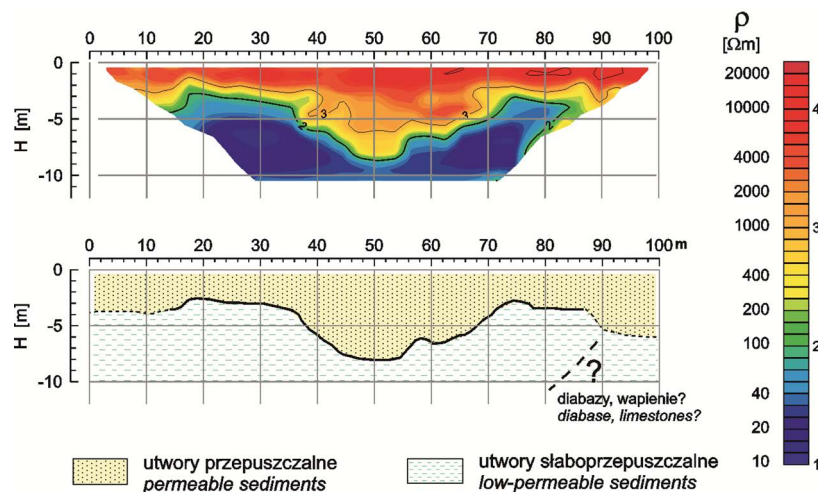
Zagadnienie rozpoznania osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami metodami geofizycznymi posiada bogatą literaturę zagraniczną i niezbyt liczną krajową, a przykładem prac krajowych mogą być publikacje Bestyńskiego i Trojana (1975), Ślusarczyka (2001), Dziewańskiego i Pileckiego (2002), Karczewskiego i Ziętka (2002), Pileckiego i in. (2007), Popiołka i in. (2008) lub Kamińskiego i in. (2014).

W pracy przedstawiono zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami w sposób możliwie konkretny. Autorzy wyróżnili w nich



Rys. 2. Przykład przekrojów sejsmicznych pola prędkości fali S wzdłuż osi podłużnej osuwiska wykonanych metodą interferometrii sejsmicznej w okresach różnego stopnia zawodnienia koluwiów (trzy warstwy od góry): pomiar w styczniu (a), w marcu (b), w lipcu (c) (na podstawie Pilecki i Harba 2015)

Fig. 2. An example of seismic cross-sections of S-wave field along a landslide axis carried out with the help of seismic interferometry in periods of a different degree of coluvium watering (three layers from the top): measurements in January (a), March (b), July (c) (on the basis of Pilecki and Harba 2015)



Rys. 3. Przykład wyników tomografii elektrooporowej (rysunek górny) wzdłuż profilu prostopadłego do osi podłużnej osuwiska wraz z interpretacją geologiczną (rysunek dolny) (Mościcki i Antoniuk 2006)

Fig. 3. An example of results of electrical resistivity tomography (upper) along the profile perpendicular to the landslide axis with a geological interpretation (lower) (Mościcki and Antoniuk 2006)

etap przygotowania do pomiarów oraz etap realizacji badań z podkreśleniem metodyki pomiarowej, przetwarzania i interpretacji danych geofizycznych. W tekście pominięto zagadnienie analizy wyników badań, gdyż każde tego typu zadanie jest inne i wymaga specjalnego opisu. W końcowej części pracy zebrano najważniejsze zalety i ograniczenia metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami.

2. Podstawowe zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami

Zastosowanie metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami wymaga spełnienia kilku podstawowych zasad przed realizacją pomiarów:

- Wstępnie rozeznac problem badawczy, w tym przedmiot i zakres badań oraz zebrać dostępne informacje kartograficzne, geologiczno-inżynierskie i geofizyczne o terenie badań. Niezbędna jest wizja terenowa dla oceny warunków pomiarowych. Należy rozeznac sprawę zgody na wejście w teren.
- Określić rodzaj metod geofizycznych, najbardziej efektywnych w rozwiązaniu problemu badawczego w rozważanych warunkach pomiarowych. Dobór metody geofizycznej zależy od możliwości rozróżnienia różnego rodzaju granic w ośrodku geologicznym. Należy wybrać metodę, w której wpływ szumu na sygnał użyteczny pozwoli na wystarczająco skuteczne przetworzenie i interpretację danych pomiarowych. W przypadku braku informacji geologiczno-inżynierskich, wskazany jest dobór co najmniej dwóch metod geofizycznych bazujących na różnych parametrach ośrodka. Zastosowanie jednej metody geofizycznej związane jest z dużym prawdopodobieństwem wieloznaczności rozpoznania. Wieloznaczność tę ogranicza się,

uwzględniając w analizie wyników wszystkie dostępne dane archiwalne z wiercenia otworów, wykopów i innych metod.

- Opracować metodykę pomiarową oraz interpretacyjną dla osiągnięcia planowanego celu badań. Pomiar należy zaprojektować w bezpośrednim sąsiedztwie stref o znanej budowie i/lub właściwościach np. w sąsiedztwie otworów lub wykopów. W razie potrzeby należy wykonać otwór badawczy dla skorelowania wyników badań geofizycznych. W warunkach osuwisk w utworach fliszu karpackiego, wykonanie badań geofizycznych po opadach atmosferycznych pozwala osiągnąć korzystniejsze wyniki. Należy ustalić sposób opracowania wyników badań. Informacja taka powinna być przedstawiona w projekcie badań geofizycznych, sporządzonym niezależnie od tego czy jest wymagana przez przepisy i zatwierdzonym przez zlecającego badania.

Pomiary geofizyczne powinny być rzetelnie i wiarygodnie wykonane i opracowane, a ich wyniki zrozumiale i czytelnie przedstawione. W ogólnym ujęciu realizacja badań geofizycznych powinna przebiegać w następujących kolejnych etapach:

- *Rejestracja danych pomiarowych, nazywana również akwizycją.* W aktualnie produkowanych aparaturach dane są rejestrowane w postaci cyfrowej. Profile pomiarowe lub punkty pomiarowe należy wyznaczyć metodą geodezyjną. Wystarczającą dokładność lokalizacji punktu pomiarowego osiąga się za pomocą odbiornika systemu GPS i taśmy mierniczej.
- *Porządkowanie rejestracji, archiwizacja i przetwarzanie danych pomiarowych.* Przetwarzanie jest najczęściej zbiorem procedur mających na celu poprawę stosunku sygnału użytecznego do szumu.
- *Interpretacja danych.* Najczęściej jest związana z procedurami inwersyjnymi polegającymi na dopasowaniu modeli matematycznych ośrodka geologicznego i obliczenie ich parametrów mających możliwie dokładne odwzorowanie w danych pomiarowych. Należy korzystać ze sprawdzonych algorytmów. Interpretację danych pochodzących z konkretnego terenu badań powinna wykonywać jedna osoba.
- *Prezentacja (wizualizacja) wyników obliczeń.* Wyniki obliczeń powinny być opracowane w sposób ogólnie czytelny i zrozumiały, niestwarzający tego rodzaju wątpliwości. Wskazana jest prezentacja wyników badań geofizycznych na mapach kompleksowych z uwzględnieniem możliwie pełnej informacji o terenie badań. Wizualizacje wyników badań geofizycznych można przedstawić w postaci wykresów jednowymiarowych (1D), przekrojów lub map (2D) lub przestrzennie (3D).
- *Kompleksowa analiza wyników badań geofizycznych.* Kompleksowa analiza wyników badań powinna uwzględniać możliwie wszystkie użyteczne informacje. Analiza ta powinna być opracowana z wykorzystaniem możliwie szerokich doświadczeń własnych i literaturowych. Na podstawie analizy opracowywane są wnioski z badań mające znaczenie dla podejmowania dalszych decyzji, w tym inżynierskich dla potrzeb zaprojektowania zabezpieczenia osuwiska. Istotną częścią analizy jest informacja o błędach i ograniczeniach zastosowanej metody.
- *Opracowanie raportu lub dokumentacji.* Dokument ten powinien zawierać możliwe szczegółowy i logiczny opis badań geofizycznych, w tym metodyki pomiarowej i interpretacyjnej w taki sposób, aby można było powtórzyć badania na podstawie tego opisu. Prezentacja wyników i opis badań geofizycznych powinny być zrozumiałe dla konstruktora budowlanego lub innego specjalisty.

3. Zalety i ograniczenia metod geofizycznych

Metody geofizyczne mają swoje zalety i ograniczenia. Do podstawowych zalet tych metod należy przyjąć:

- Metody geofizyczne są efektywne, gdyż pozwalają na rozpoznanie względnie dużych obszarów możliwie szybko i możliwie w sposób ciągły w porównaniu np. do rozpoznania lokalnego (punktowego) za pomocą otworu badawczego, szybiku, lub wykopu. Badania geofizyczne powinny być niemal w każdym przypadku bardziej atrakcyjne finansowo od wykonania siatki wykopów lub otworów.
- Metody geofizyczne są bezinwazyjne, gdyż nie wymagają bezpośredniego dostępu do ośrodka za pomocą wykopu badawczego, otworu badawczego lub innych wyrobisk.
- Metody geofizyczne wykorzystują różne pola fizyczne w ośrodku geologicznym. W związku z tym możliwe jest zobrazowanie ośrodka w różny sposób, z wzajemnym uzupełnieniem informacji.
- Pomiary geofizyczne mogą być wykonywane na powierzchni terenu lub w otworach badawczych. Zagęszczenie profili pomiarowych pozwala uściślać analizę rozpoznania ośrodka.
- Zasięg głębokościowy dla konkretnej metody geofizycznej może być zróżnicowany w zależności od przyjętej metodyki pomiarowej. Badania geofizyczne wykonywane dla potrzeb rozpoznania osuwiska są ukierunkowane na rozpoznanie ośrodka geologicznego do głębokości kilkunastu metrów, a w razie potrzeby do kilkudziesięciu metrów (do 20–50 m), co jest na ogół wystarczające do zaprojektowania konstrukcji zabezpieczającej osuwisko.
- Rozdzielczość rozpoznania, podobnie jak w przypadku zasięgu głębokościowego, jest zróżnicowana w zależności od przyjętej metodyki pomiarowej. W podstawowych metodach: georadarowej, sejsmicznej i elektrooporowej, większa rozdzielczość skutkuje mniejszym zasięgiem głębokości rozpoznania.

Do podstawowych ograniczeń metod geofizycznych należy zaliczyć:

- Wieloznaczność wyników interpretacji geofizycznych. W związku z tym zaleca się lokalizację profilu pomiarowego w bezpośrednim sąsiedztwie otworu badawczego lub wykonanie pomiarów dwoma uzupełniającymi się metodami.
- Wrażliwość rejestracji danych geofizycznych na różnego rodzaju zakłócenia w trakcie pomiarów.
- Ograniczoną rozdzielczość rozpoznania, zwłaszcza ze wzrostem odległości od źródła (anteny nadawczej, źródła drgań czy elektrody prądowej). W metodach geofizycznych aktywnych zachodzi kompromis między rozdzielczością a głębokością rozpoznania. W metodach pasywnych występuje niejednoznaczność rozpoznania, gdyż obiekt na konkretnej głębokości może generować podobną anomalię jak większy obiekt na większej głębokości.
- Czas przetwarzania i interpretacji danych jest zróżnicowany w zależności od rodzaju metody geofizycznej. W przypadku zadania bardziej skomplikowanego czas realizacji może być wydłużony, z czym wiążą się również koszty badań.

Podsumowanie

Metody geofizyczne znajdują powszechne zastosowanie w badaniach osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami. W warunkach geologiczno-inżynierskich typowych osuwisk na terenie Polski największe znaczenie mają takie metody geofizyczne jak: georadarowa, sejsmiczna oraz elektrooporowa. Znane są również przykłady zastosowania innych metod, takich jak: indukcji elektromagnetycznej, prześwietlania otworowego różnymi metodami geofizycznymi, mikrograwimetrycznej czy teledetekcyjnej. W zależności od metody geofizycznej badane są parametry różnych pól fizycznych – właściwości elektromagnetycznych, sprężystości, oporności i inne. W przypadku badania osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskiem przedmiotem rozpoznania są: przebieg przypuszczalnych powierzchni poślizgu, granice litologiczne, większe spękania, położenia zwierciadła wód gruntowych, zmiany właściwości warstw ośrodka, a zwłaszcza identyfikacja strefy osłabienia.

W pracy omówiono podstawowe zasady stosowania metod geofizycznych dla osiągnięcia możliwie rzetelnych i wiarygodnych wyników w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami. Autorzy wyróżnili w nich etap przygotowania do pomiarów oraz realizację badań z podkreśleniem metodyki pomiarowej, przetwarzania i interpretacji danych geofizycznych. W pracy przedstawiono również najważniejsze zalety i ograniczenia metod geofizycznych.

Metody geofizyczne rozwijają się w sposób niezwykle szybki wraz z postępem techniki komputerowej, w tym przetwarzania danych i transmisji cyfrowej. Większa precyzja pomiaru parametrów pól fizycznych ośrodka geologicznego daje większe możliwości badawcze. Z drugiej strony, w związku z coraz doskonalszą aparaturą i oprogramowaniem rozwija się również coraz większy automatyzm w posługiwaniu się nimi, a użycie metod geofizycznych jest łatwiejsze. W takiej sytuacji należy pamiętać o podstawowych zasadach posługiwania się metodami geofizycznymi przedstawionymi w tej pracy.

Praca została zrealizowana w ramach działalności statutowej IGSMiE PAN.

Literatura

- American Society for Testing and Materials, 1999. Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods. Designation D-6429, Philadelphia.
- Bestyński, Z. i Trojan, J. 1975. Metody geofizyczne w badaniach stateczności zboczy skalnych. *Mat. Badawcze seria specjalna* nr 4. Warszawa: IMiGW.
- Ślusarczyk, R. 2001. Możliwości zastosowania geofizyki inżynierskiej w problematyce budownictwa lądowego i wodnego. *Mat. Konf. Geofizyka w inżynierii i ochronie środowiska*, s. 109–124.
- Dziewański, J. i Pilecki, Z. 2002. Ocena warunków geologiczno-inżynierskich na terenie powierzchniowych ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Zgłobicach. *Studia, Rozprawy, Monografie* 109. Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Kamiński i in. 2014 – Kamiński, M., Zientara, P. i Krawczyk, M. 2014. Wykorzystanie tomografii elektrooporowej do badania osuwisk – osuwisko Dzianisz (południowo-zachodnie Podhale). *Przegląd Geologiczny* t. 62, nr 4, s. 198–203.
- Karczewski, J. i Ziętek, J. 2002. Wykorzystanie metody georadarowej w geofizyce środowiska. *Materiały i Prace Instytutu Geofizyki PAN M-27(352)*, s. 223–232.
- Mościcki, W. J. i Antoniuk, J. 2006. Badania geoelektryczne na przedpolu osuwiska w kopalni diabazu „Niedźwiedzia Góra” koło Krzeszowic. *Kwartalnik AGH Geologia* t. 32/4, s. 389–404.

- Popiołek i in. 2008 – Popiołek, E., Pilecki, Z., Karczewski, J., Ziętek, J., Kłosiński, J., Baranowski, A., Pilecka, E., Ortyl, L., Pszonka, J. i Krawiec, K. 2008. *Wpływ rozdzielczości metod falowych na efektywność rozpoznania granic nieciągłości osuwiska* Pilecki Z. red. Kraków: Agencja Wydawniczo-Poligraficzna „ART-TEKST”.
- Pilecki, Z. i Harba, P. 2015. Wstępne wyniki badania budowy i właściwości osuwiska metodą interferometrii sejsmicznej z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego. *Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN* nr 89, s. 63–76.
- Pilecki i in. 2007 – Pilecki, Z., Ziętek, J., Karczewski, Pilecka, E. i Kłosiński, J. 2007. The effectiveness of recognizing of failure surface of the Carpathian flysch landslide using wave methods, *Proc. 13th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, 3–5 September 2007, Istanbul.

