



Maciej BARNAS*

Zalety i ograniczenia systemu Seismobile

Streszczenie: W artykule przedstawiono zalety i ograniczenia systemu Seismobile zebrane w wyniku wstępnych badań terenowych. Jest to system mobilny przystosowany do wykonywania równocześnie pomiarów sejsmicznych oraz georadarowych. Ta cecha wyróżnia ten system od dotychczas opracowanych strimerów. W pracy przedstawiono metodykę pomiarową systemu Seismobile, obejmującą przygotowanie sprzętu, akwizycję danych oraz wykonanie pomiaru danych sejsmicznych. Na podstawie dotychczasowych testów omówiono zalety systemu Seismobile, do których należy zaliczyć m.in. ograniczenie pracochłonności podczas pomiarów, bezprzewodową komunikację pomiędzy elementami systemu, niezależność modułów pomiarowych od siebie, możliwość zmiany rozstawu w zależności od zadania badawczego, mobilny wzbudnik, możliwość zastosowania dowolnego typu czujników sejsmicznych, zapis danych na powszechnie dostępnych kartach pamięci SDHC, stację dokującą służącą do archiwizowania i ładowania baterii modułów pomiarowych. System Seismobile, podobnie do innych tego typu urządzeń, posiada również różnego rodzaju ograniczenia, głównie o charakterze technicznym. Przygotowanie systemu do pierwszego pomiaru jest czasochłonne i wymaga dość dużego nakładu pracy. Zestawy czujników na metalowych podstawach mogą być niestabilne w trudnych warunkach terenowych, a ich kontakt z ośrodkiem jest słabszy niż w przypadku geofonów wbijanych w grunt. Czas pracy baterii modułów pomiarowych ulega skróceniu z upływem czasu. Mogą też występować problemy z rejestracją poprawnego sygnału GPS w trudnych warunkach terenowych, wykorzystywanego do lokalizacji systemu i synchronizacji czasu pracy jego elementów. Niezależnie od wskazanych ograniczeń wyniki uzyskiwane systemem Seismobile wskazują na jego dużą przydatność w badaniach defektów płytkiego podłoża.

Słowa kluczowe: system Seismobile, strimer sejsmiczny, profilowanie sejsmiczne, model sejsmiczny 3D, profilowanie GPR, szlaki komunikacyjne

Advantages and limitations of the Seismobile system

Abstract: In the article advantages and limitations of the Seismobile system, which were recognized during initial field measurements, were described. This is a mobile system adapted to performing seismic and GPR surveys simultaneously. It is a fundamental attribute which distinguishes this system from streamers that were developed

* Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: mbarnas@min-pan.krakow.pl

thus far. In the paper measurements methodology of the Seismobile system, containing preparing equipment, data acquisition, and seismic survey performing, was illustrated. Based on previous tests, the advantages of the Seismobile system which included, among others, the limitation of time and labor consumption during surveys, a wireless connection between parts of the system, independence of the measuring modules, possibility of changing offset depending on the research task, the mobile seismic source, possibility of using any type of seismic receiver, saving data on widely available SDHC memory sticks, docking station for archiving and recharging batteries of the measuring modules. The seismobile system, like those kinds of devices, has different types of limitations, mainly technical. Preparing system to the first measurement is time-consuming and requires quite a lot of work. Measuring sets on the metal plates can be unstable in difficult terrains and their contact with the basement is weaker from geophones embedded in the rock mass. The battery life will be shorter in the course of time. In hard conditions, problems with receiving GPS signals, which are used for localization and timing are possible. Regardless of indicated limitations, the results achieved with the Seismobile system are leading for its usefulness in inspections of shallow basement's faults.

Keywords: Seismobile system, landstreamer, 3D seismic, 3D GPR profiling, road basement

Wprowadzenie

Metody geofizyczne, a w szczególności georadarowa i sejsmiczna, są powszechnie stosowane w rozpoznaniu podłoża gruntowego szlaków komunikacyjnych, a zwłaszcza w skomplikowanych warunkach terenowych związanych z występowaniem deformacji nieciągłych, osiadaniem, lub osuwiskami (Dziewański i in. 2001; Dziewański i Pilecki 2002; Pilecki i Kotyrba 2007; Pilecki 2008, 2009; Łątka i in. 2010; Miłkowski i in. 2010a i b; Harba i Pilecki 2017). Istotnym ograniczeniem wielu metod geofizycznych, a w szczególności metody sejsmicznej jest jej praco- i czasochłonność (Kubańska i in. 2016). Korzystnym rozwiązaniem ograniczającym te utrudnienia są strimery sejsmiczne. Są to urządzenia dostosowane do montażu czujników sejsmicznych na specjalnych taśmach, przystosowane do ciągnięcia przez pojazd holujący (van der Veen i in. 2001; Inazaki 2004; Dolena i in. 2008; Pugin i in. 2009; Pilecki i in. 2014a, 2017; Brodic i in. 2015).

Dotychczasowe zastosowanie landstrimerów obejmuje różne zagadnienia badawcze, nie tylko związane z badaniami podłoża szlaków komunikacyjnych. Oprócz rozpoznania podłoża w miejscach planowanych tuneli kolejowych (Malehmir i in. 2015), drogowych (Brodic i in. 2015; Bazin i in. 2016) i lotnisk (Pilecki i in. 2017), strimery wykorzystuje się również w obrazowaniu budowy geologicznej na terenach krasowych (Krawczyk i in. 2012) i polodowcowych (Brodic i in. 2017), a nawet w celu lokalizacji złóż mineralnych (Malehmir i in. 2017).

W artykule przedstawiono zalety i ograniczenia systemu Seismobile zebrane w wyniku wstępnych badań terenowych wykonanych w różnych warunkach geologicznych w okresie testowania urządzenia (Pilecki i in. 2017). System ten jest wynikiem realizacji wspólnego projektu NCBiR przez Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Instytutu Technik Innowacyjnych EMAG oraz Centrum Transferu Technologii EMAG. W początkowej części artykułu scharakteryzowano budowę systemu oraz bardziej szczegółowo przedstawiono metodykę pomiarową. Następnie omówiono zalety i ograniczenia systemu Seismobile, które zebrano na podstawie wstępnych badań terenowych w różnych warunkach terenowych.

1. Budowa systemu Seismobile

System Seismobile jest mobilnym urządzeniem przystosowanym do wykonywania równocześnie pomiarów sejsmicznych oraz georadarowych (Pilecki i in. 2016a). Schemat systemu Seismobile pokazano na rysunku 1. Składa się on z czterech równoległych strimerów sejsmicznych (możliwe są również pomiary z wykorzystaniem jednej lub dwóch linii) oraz aparatury georadarowej przymocowanej do specjalnej konstrukcji. Do podstawowych elementów systemu Seismobile należy zaliczyć:

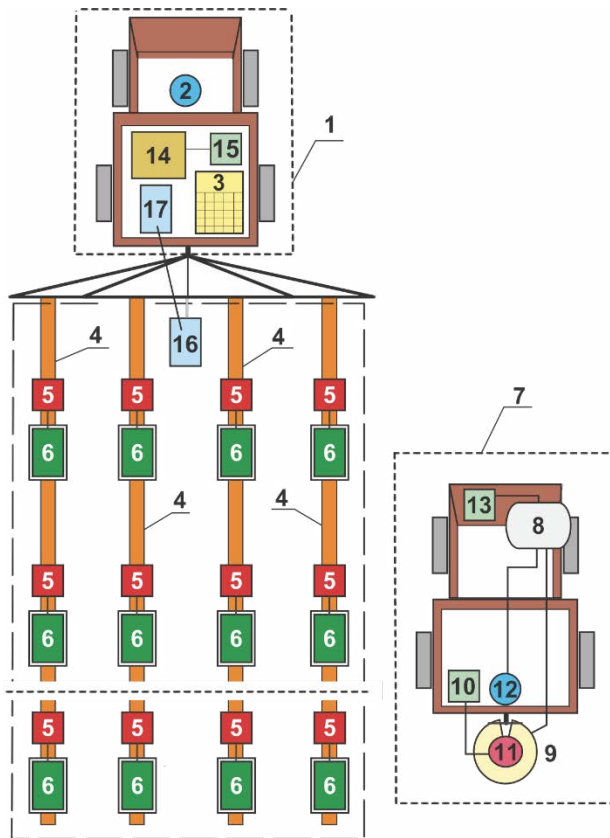
- pojazd holujący (1), w którym umieszczone są:
 - odbiornik GPS (2),
 - stacja dokująca (3),
 - serwer bazy danych pomiarowych (14),
 - moduł Wi-fi (15),
 - jednostka sterująca georadaru (17),
- taśma parcziana o dużej wytrzymałości (4),
- czujniki drgań (5),
- autonomiczne moduły pomiarowe (6) połączone z czujnikami (5) krótkim kablem – komunikacja z innymi elementami systemu odbywa się całkowicie bezprzewodowo (rys. 2),
- antena georadarowa (16) – większość dostępnych na rynku georadarów wymaga przewodowego połączenia anteny z jednostką rejestrującą, są natomiast modele realizujące to połączenie bezprzewodowo np. MALÅ GroundExplorer (<http://www.guidelinegeo.com/product/mala-groundexplorer/>),
- mobilny wzbudnik (7) (rys. 3b), składający się z:
 - jednostki centralnej (8),
 - kafaru sejsmicznego (9),
 - modułu pomiarowego (10),
 - czujnika akcelerometrycznego (11) przymocowanego do kafara,
 - odbiornika GPS (12),
 - modemu transmisji radiowej (13).

W systemie Seismobile można zastosować różne geofony (Pilecki i in. 2014b) oraz źródła sejsmiczne (Pilecki i in. 2014c, 2015). Do rejestracji fali sejsmicznej najczęściej wykorzystuje się jednoskładowe geofony pionowe o częstotliwości własnej dobranej w zależności od rodzaju zadania badawczego.

2. Metodyka realizacji pomiarów systemem Seismobile

W celu wykonania pomiarów systemem Seismobile należy wykonać wiele czynności, których zakres i pracochłonność wynikają z rodzaju zadania badawczego i warunków pomiarowych. Czynności w układzie chronologicznym związane z przygotowaniem systemu i wykonaniem pomiarów można scharakteryzować w następujący sposób:

- Rozwinięcie od jednej do czterech linii strimera w zależności od zadania badawczego. Największa możliwa odległość pomiędzy liniami pomiarowymi to 3,5 m,



Rys. 1. Schemat podstawowych elementów systemu Seismobile (na podstawie Isakowa i in. 2016a)

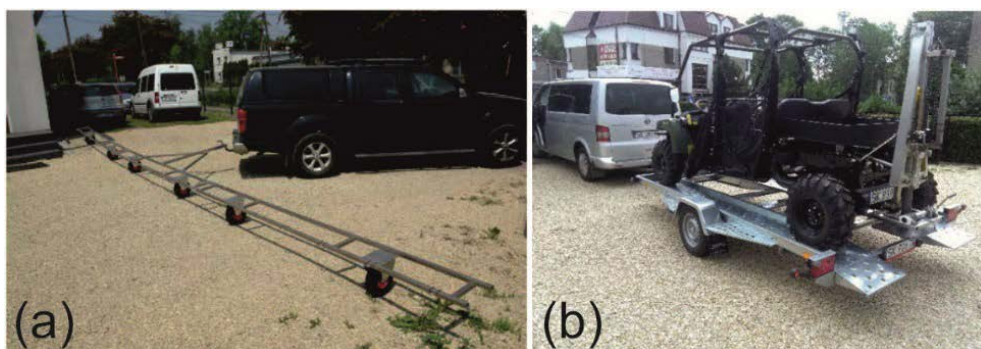
Fig. 1. Basic components of the Seismobile system



Rys. 2. Widok zestawu pomiarowego systemu Seismobile. Po lewej stronie moduł pomiarowy, natomiast po prawej połączony z nim krótkim kablem geofon, mocowane na metalowej podstawie (Kubańska i in. 2016)

Fig. 2. A view of a measuring set of the Seismobile system. On the left a measuring module, connected using short cable, with a geophone (on the right) mounted on a metal base

w związku z tym rozpoznanie ośrodka można prowadzić na szerokości do 10,5 m (przy czterech liniach). Wynika to z konstrukcji ramy do holowania strimera (rys. 3a).

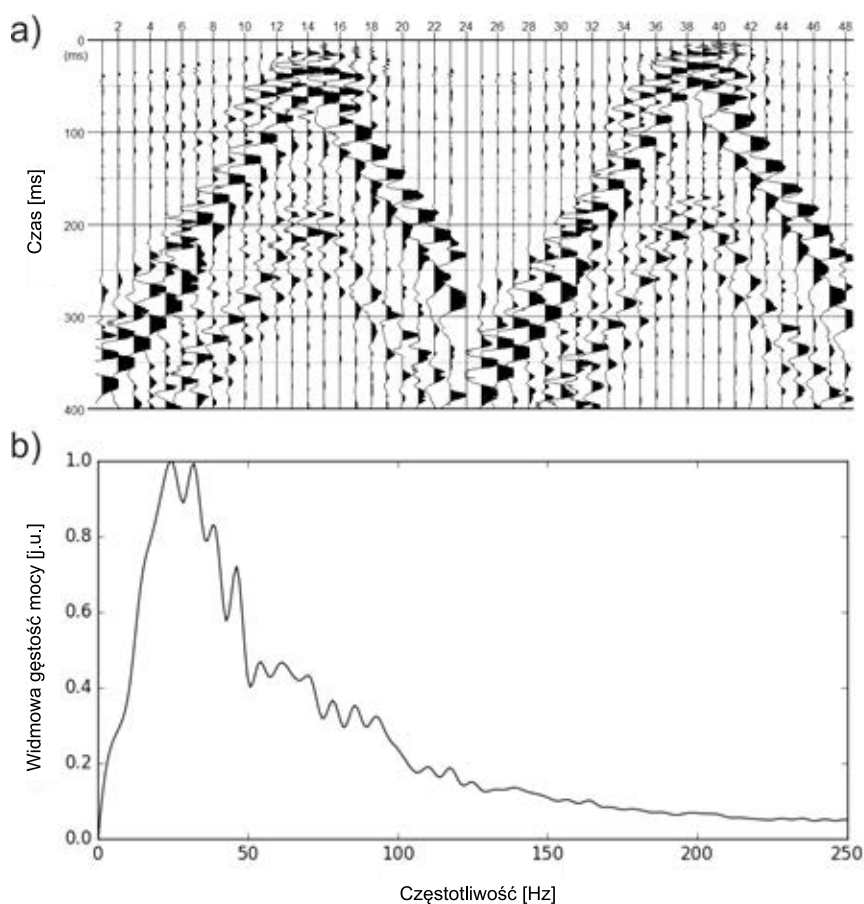


Rys. 3. Widok samochodu terenowego z ramą do holowania strimera Seismobile (a); widok mobilnego wzbudnika podczas transportu (b) (na podstawie Isakowa i in. 2016a)

Fig. 3. A view of a SUV vehicle with a towing frame (a); a view of a mobile weight drop during transport (b)

- Montaż modułów pomiarowych oraz odbiorników, najczęściej geofonów, na metalowych podstawach wraz z przewodowym połączeniem każdego odbiornika z modułem pomiarowym oraz ustawienie odległości pomiędzy odbiornikami. Maksymalna liczba kanałów wynosi 96. Przy czterech liniach pomiarowych, każda z nich może posiadać 24 kanały, a przy jednej możliwa jest konfiguracja nawet z 96 geofonami (Kubańska i in. 2016).
- Zamontowanie aparatury georadarowej na konstrukcji ramy do holowania.
- Przygotowanie do pracy mobilnego źródła sejsmicznego (młot lub kafar).
- Przygotowanie stanowiska operatora zarządzającego pomiarem najczęściej w samochodzie przystosowanym do holowania urządzenia.
- Wykonanie testu poprawności działania systemu, rejestracji sygnału, w tym z łączności GPS dla wszystkich modułów pomiarowych, jakości wzbudzanego sygnału oraz łączności GPS dla mobilnego wzbudnika. Sygnał GPS jest konieczny do synchronizacji czasu rejestracji.
- Ustawienie parametrów pomiarowych: wzmocnienia, częstotliwości próbkowania filtrów, liczby rejestrowanych składowych i składowych uderzeń (Isakow i in. 2016b).
- Wykonanie pomiarów – zdalne wzbudzanie fal sejsmicznych za pomocą mobilnego wzbudnika, które skutkuje zapisem danych w pamięci wewnętrznej modułów pomiarowych. Następnie dane przesyłane są (wybrane próbki do podglądu) drogą radiową do jednostki centralnej i wizualizowane na ekranie komputera. Operator może zapisać wynik lub zdecydować o powtórzeniu pomiaru.
- Po zakończeniu pomiarów i demontażu wszystkich elementów moduły pomiarowe umieszcza się w stacji dokującej, gdzie jednocześnie odczytywane są dane (wszystkie próbki) z pamięci SDHC modułów pomiarowych oraz ładowane są akumulatory.

Zarejestrowane dane zapisywane są w postaci plików SEG-Y, co umożliwia ich przetwarzanie i interpretację przy pomocy większości ogólnie dostępnego oprogramowania. Do obliczania widma amplitudowego lub widma gęstości mocy, w dotychczasowych testach wykorzystywano skrypty w językach Python i Matlab. Przetwarzanie danych i ich interpretację wykonywano za pomocą oprogramowania Geogiga Seismic Pro. Przykładowe rejestracje oraz ich widmo amplitudowe zaprezentowano na rysunku 4.



Rys. 4. Przykładowe rejestracje z dwóch linii strimera Seismobile na betonowej płycie lotniska przetworzone za pomocą programu Geogiga (a) oraz ich widmo amplitudowe wyznaczone za pomocą skryptu Python (b)

Fig. 4. Exemplary records collected using two lines of the Seismobile system on the concrete airport runway, processed using Geogiga software (a) and their amplitude spectrum computed using the Python script (b)

3. Zalety systemu Seismobile

Na podstawie dotychczasowych doświadczeń związanych z użyciem systemu Seismobile można stwierdzić, że posiada on następujące główne zalety:

- System Seismobile oferuje jednoczesne wykonanie pomiarów sejsmicznych i georadarowych.
- System Seismobile pozwala na zmniejszenie czasu i nakładu pracy potrzebnego do przeprowadzenia pomiarów w porównaniu do klasycznych pomiarów sejsmicznych. Najbardziej pracochłonne jest przygotowanie systemu do pracy. Zmiana miejsca położenia profilu pomiarowego wymaga jedynie przemieszczenia się pojazdu holującego. Im większy jest zakres pomiarów, tym ekonomika pomiarów jest korzystniejsza.
- Zarejestrowane dane sejsmiczne przesyłane są bezprzewodowo. Jedynymi połączeniami przewodowymi w części sejsmicznej systemu są kable o długości kilkunastu centymetrów łączące odbiornik z modułem pomiarowym. W ten sposób unika się stosowania dużej liczby kabli geofonowych, które dodatkowo narażone są na uszkodzenia podczas przesuwania się systemu w terenie.
- Każdy z modułów pomiarowych pracuje niezależnie. Awaria jednego z nich nie ma wpływu na poprawność działania pozostałych. Wszystkie moduły wyposażone są we własny odbiornik sygnału GPS, więc również lokalizacja modułów jest niezależna. Za pomocą oprogramowania sterującego można na ekranie komputera, na bieżąco, sprawdzić zarejestrowane sejsmogramy, a jedynym warunkiem jest zapewnienie łączności wi-fi pomiędzy komputerem a modułami pomiarowymi.
- Oprogramowanie sterujące umożliwia również sprawdzenie poprawności działania modułów, czujników oraz jakości sygnału GPS.

Odległość między odbiornikami można zmieniać w zakresie od 1 do 5 metrów (Kubańska i in. 2016). Pozwala to na dobór rozstawu w zależności od zadania badawczego.

- Mobilny wzbudnik fali sejsmicznej posiada łączność radiową z modułami pomiarowymi. Dzięki temu jedna osoba może być operatorem, zajmującym się zarówno uaktywnieniem modułów pomiarowych, jak i uruchomieniem źródła sejsmicznego. Łączność radiowa umożliwia łatwiejsze przemieszczanie się wzbudnika w porównaniu do łączności kablowej przy zmianie położenia punktów strzałowych.
- Czujniki sejsmiczne montowane są w sposób nieskomplikowany na metalowych podstawach, co umożliwia ich szybką wymianę. Pozwala to w zależności od potrzeby na zastosowanie różnych czujników (Pilecki i in. 2014c).
- Moduły pomiarowe są przystosowane do montowania czujników do 3 składowych.
- W każdym module pomiarowym rolę pamięci wewnętrznej pełni karta pamięci o pojemności 32 GB. Duża pojemność pozwala na długi czas rejestracji. Format kart pamięci to popularny SDHC z łącznością wi-fi, w związku z tym można je szybko wymienić w przypadku awarii.
- Transport modułów pomiarowych odbywa się w specjalnie do tego celu przygotowanej stacji dokującej, w której możliwe jest również ładowanie baterii, jak i archiwizacja danych zapisanych w pamięci wewnętrznej.
- Wynikowe pliki z danymi zapisywane są w popularnym formacie SEGYY, co umożliwia ich przetwarzanie w różnych ogólnie dostępnych programach specjalistycznych.

4. Ograniczenia systemu Seismobile

System Seismobile posiada również ograniczenia, do których można zaliczyć:

- Rozkładanie systemu i przygotowanie do pierwszego pomiaru jest pracochłonne.
- Podstawy czujników sejsmicznych tracą stateczność i wywracają się na większych przeszkodach i nierównościach terenu. Podstawy te zostały specjalnie zaprojektowane i przetestowane, lecz całkowite wyeliminowanie tego zjawiska jest niemożliwe.
- Czujniki mają nietrwały kontakt z podłożem ośrodka. Przeprowadzone testy wskazują, że zniekształcenie sygnału sejsmicznego ze względu na wartości amplitud i widma amplitudowe są akceptowalne (Pilecki i in. 2016b).
- Każdy z modułów pomiarowych jest bezprzewodowy, a więc wymaga własnego zasilania z wykorzystaniem baterii, której czas pracy jest ograniczony.
- W terenach intensywnie zabudowanych lub zalesionych mogą występować trudności z nawiązaniem łączności satelitarnej GPS. Natomiast w miejscach słabo zurbanizowanych mogą występować trudności z dostępem do sygnału sieci komórkowych. W takich przypadkach dokładność lokalizacji będzie zmniejszona.

Podsumowanie

System Seismobile jest innowacyjnym rozwiązaniem pozwalającym na połączenie pomiarów strimerem sejsmicznym z metodą georadarową. Jego głównym przeznaczeniem, podobnie jak dotychczas zbudowanych strimerów, jest badanie podłoża szlaków komunikacyjnych. Natomiast sprawdza się on również w innego rodzaju badaniach, jeżeli warunki terenowe na to pozwalają.

System Seismobile posiada liczne zalety szerzej omówione w rozdziale 4. Z dotychczasowych doświadczeń wynika również, że ograniczenia tego systemu nie powodują obniżenia jego jakości rejestracji. Natomiast sposób przeprowadzenia pomiarów profilowania georadarowego jest identyczny jak metodą tradycyjną.

Artykuł został opracowany w wyniku realizacji projektu nr UOD-DEM-1-303/001 o akronimie SEISMOBILE uzyskanego w ramach przedsięwzięcia pilotażowego Wsparcie badań naukowych i prac rozwojowych w skali demonstracyjnej DEMONSTRATOR+ dofinansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

Literatura

- Bazin i in. 2016 – Bazin, S., Sauvin, G., Dehghannejad, M., Lundberg, E., Lysdahl, A.K., Malehmir, A., Kveldsvik, V., Boge, K. i Pfaffhuber, A.A. 2016. Seismic and Electrical Resistivity Investigations for the Planning of a Tunnel in Oslo Outskirts. *Mat. Konf. Near Surface Geoscience*.
- Brodic i in. 2015 – Brodic, B., Malehmir, A., Juhlin, C., Dynesius, L., Bastani, M. i Palm, H. 2015. Multicomponent broadband digital-based seismic landstreamer for near-surface applications. *Journal of Applied Geophysics* 123, s. 227–241.

- Brodic i in. 2017 – Brodic, B., Malehmir, A., Maries, G., Ahokangas, E., Mäkinen, J. i Pasanen, A. 2017. Shear-wave reflection imaging using a MEMS-based 3C landstreamer and a vertical impact source – an esker study in SW Finland. *Mat. Konf. EGU Geophysical Research Abstracts* 19.
- Dolena i in. 2008 – Dolena, T.M., Speece, M.A., Link, C.A. i Duaime, T.E. 2008. A 3D seismic land-streamer system. *Near Surface Geophysics* 6(1), s. 21–29.
- 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.
- Dziewański i in. 2001 – Dziewański, J., Sroczyński, W. i Pilecki, Z. 2001. Zagadnienia badań geologiczno-inżynierskich w projektowaniu tuneli komunikacyjnych w utworach fliszu karpackiego – na przykładzie tunelu w Lalikach. *Studia, Rozprawy, Monografie* 96, Kraków: Wyd. IGSMiE PAN.
- Harba P. i Pilecki Z. 2017. Assessment of time-spatial changes of shear wave velocities of flysch formation prone to mass movements by seismic interferometry with use of ambient noise. *Landslide* 14 (3), s. 1225–1233. [Online] Dostępne w: <http://www.guidelinegeo.com/product/mala-groundexplorer/> [Dostęp: 1.09.2017].
- Inazaki, T. 2004. High-resolution seismic reflection surveying at paved areas using an S-wave type land streamer. *Exploration Geophysics* 35, s. 1–6.
- Isakow i in. 2016a – Isakow, Z., Siciński, K. i Sierodzki, P. 2016a. Innowacyjne rozwiązania w akwizycji danych pomiarowych w strimerze Seismobile: *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 93, s. 155–168.
- Isakow i in. 2016b – Isakow, Z., Pysik, A., Przybyła, M., Juzwa, J. i Kuciara, I. 2016b. Oprogramowania narzędziowe strimera Seismobile: *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 93, s. 169–180.
- Krawczyk i in. 2012 – Krawczyk, C.M., Polom, U., Trabs, S. i Dahm, T. 2012. Sinkholes in the city of Hamburg – New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of suberosion structures. *Journal of Applied Geophysics* 78, s. 133–143.
- Kubańska i in. 2016 – Kubańska, A., Isakow, Z. i Pilecki, Z. 2016. Założenia funkcjonalne systemu Seismobile. *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 93, s. 133–142.
- Łątka i in. 2010 – Łątka, T., Czarny, R., Krawiec, K., Kudyk, M. i Pilecki, Z. 2010. Eksperymentalne badania położenia nieciągłości, pustek i stref rozluźnień w górotworze za pomocą georadaru otworowego. *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 77, s. 67–75.
- Malehmir i in. 2015 – Malehmir, A., Zhang, F., Dehghannejad, M., Lundberg, E., Döse, C., Friberg, O., Brodic, B., Place, J., Svensson, M. i Möller, H. 2015. Planning of urban underground infrastructure using a broadband-seismic landstreamer – Tomography results and uncertainty quantifications from a case study in southwestern Sweden. *Geophysics* 80, s. 177–192.
- Malehmir i in. 2017 – Malehmir, A., Heinonen, S., Dehghannejad, M., Heino, P., Maries, G., Karell, F., Suikkanen, M. i Salo, A. 2017. Landstreamer seismics and physical property measurements in the Siilinjärvi open-pit apatite (phosphate) mine, central Finland. *Geophysics* 82, B29-B48.
- Miłkowski i in. 2010a – Miłkowski, A., Pilecki, Z., Kłosek, K. i Tondera, M. 2010a. Autostrada A1 zaprojektowana na „dziurawym” podłożu, Cz. 1. *Magazyn Autostrady: budownictwo drogowo-mostowe* 3, s. 104–112.
- Miłkowski i in. 2010b – Miłkowski, A., Pilecki, Z., Kłosek, K. i Tondera, M. 2010b. Autostrada A1 zaprojektowana na „dziurawym” podłożu, Cz. 2. *Magazyn Autostrady: budownictwo drogowo-mostowe* 5, s. 159–160.
- Pilecki, Z. 2008. The role of geophysical methods in the estimation of sinkhole threat in the post-mining areas of shallow exploitation in the Upper Silesian Coal Basin, Poland. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 3/1, s. 27–40.
- Pilecki, Z. 2009. Methodology for A-1 motorway basement treatment effectiveness improvement by means of geophysical methods in the areas of metal ores shallow mining threatened with the sinkhole occurrence in the Upper Silesia. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 25, z. 3, s. 319–331.
- Pilecki, Z. i Kotyba, A. 2007. Problematyka rozpoznania deformacji nieciągłych dla potrzeb projektowania konstrukcji drogowych na terenie płytkiej eksploatacji rud metali. *Prace Naukowe GIG* Nr III/2007, wyd. specjalne, s. 379–392.
- Pilecki i in. 2014a – Pilecki, Z., Harba, P., Laszczak, M., Adamczyk, A. i Cielesta, Sz. 2014a. Strimery w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 7, s. 32–38.

- Pilecki i in. 2014b – Pilecki, Z., Harba, P., Czarny, R., Cielesta, Sz. i Pszonka, J. 2014b. Źródła drgań w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd Górniczy* 7, s. 22–31.
- Pilecki i in. 2014c – Pilecki, Z., Harba, P., Adamczyk, A., Krawiec, K. i Pilecka, E. 2014c. Geofony w sejsmice inżynierskiej. *Przegląd górniczy* 7, s. 12–21.
- Pilecki i in. 2015 – Pilecki, Z., Chamarczuk, M., Kubańska, A., Isakow, Z., Czarny, R., Krawiec, K., Pilecka, E. i Sierodzki, P. 2015. Porównanie parametrów częstotliwościowo-amplitudowych sejsmicznych źródeł mechanicznych. *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 89, s. 33–50.
- Pilecki i in. 2016a – Pilecki, Z., Isakow, Z. i Kubańska, A. red. 2016a. *Seismobile – system geofizycznego badania podłoża szlaków komunikacyjnych*. Katowice: Wyd. Bater Drukarnia MY-HORYZONT.
- Pilecki i in. 2016b – Pilecki, Z., Czarny, R., Chamarczuk, M., Krawiec, K. i Pilecka, E. 2016b. Skuteczność rejestracji zestawu pomiarowego strimera sejsmicznego Seismobile. *Zeszyty Naukowe – Bulletin of the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences* 93, s. 143–154.
- Pilecki i in. 2017 – Pilecki, Z., Isakow, Z., Czarny, R., Pilecka, E., Harba, P. i Barnas, M. 2017. Capabilities of seismic and georadar 2D/3D imaging of shallow subsurface of transport route using the Seismobile system. *Journal of Applied Geophysics* 143, s. 31–41.
- Pugin, A.J-M, Pullan, S.E., Hunter, J.A., Oldenborger, G.A. 2009. Hydrogeological prospecting using P- and S-wave landstreamer seismic reflection methods. *Near Surface Geophysics* 7, s. 315–327.
- van der Veen i in. 2001 – van der Veen, M., Spitzer, R., Green, A.G. i Wild, P. 2001. Design and application of a towed land-streamer for cost-effective 2D and pseudo-3D shallow seismic acquisition. *Geophysics* 66, s. 482–500.