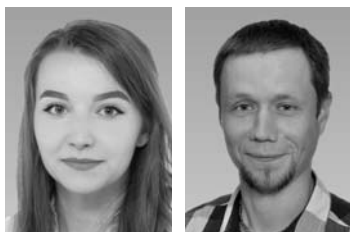


Przydatność pomiarów georadarowych i analiz geomorfometrycznych do rozpoznania wewnętrznej struktury płytkich osuwisk – na przykładzie góry Średniak w Masywie Śnieżnika, Sudety Wschodnie

Małgorzata Makoś¹, Artur Sobczyk¹



M. Makoś

A. Sobczyk

Evaluation of usefulness of integrated ground-penetrating radar and geomorphometric analyses applied to recognition of internal structure of shallow landslides – case study from Mt. Średniak in the Śnieżnik Massif, Eastern Sudetes. *Prz. Geol.*, 66: 636–647; doi: 10.7306/2018.10

A b s t r a c t. The paper reviews an application of non-destructive electromagnetic imaging of shallow bedrock and landslide colluvium horizons performed with ground-penetrating radar (GPR) technique on mass movement-affected mountain slope. We used a non-shielded 52 MHz GPR equipment to study an area of a shallow translational landslide, which developed on steeply inclined gneissic bedrock on Mt. Średniak slopes (1210 m a.s.l.) in the Śnieżnik Massif. This landslide originated at the boundary zone between intact bedrock comprising Proterozoic gneisses and uppermost slope cover, as a result of continuous rainfall during July of 2011. Fur-

thermore, to better understand and examine a landslide area on Mt. Średniak slopes we also applied structural geological and geomorphological methods. The GPR analyses resulted in high-resolution imaging of internal slope structure and gravitational deposit architecture in the range of 0.5–5 m below surface level. Electromagnetic sounding performed directly above the landslide source area elucidated a set of bedrock discontinuities with a possible direct impact on water aggregation and migration during the rainfall episodes. Furthermore, a GPR profile performed in a landslide toe area, showed subsurface reflection horizons to be correlated with a colluvium/bedrock transitional zone and internal heterogeneous architecture of colluvial deposits. Ground-penetrating radar proved to be both powerful and an easy-maintained 'on-site' method for steep mountain slope analysis, with a potential for high-resolution imaging of shallow-seated gravitational slope deformations.

Keywords: ground-penetrating radar, geomorphometric analysis, translational landslide, internal architecture of landslide deposits, Eastern Sudetes, SW Poland

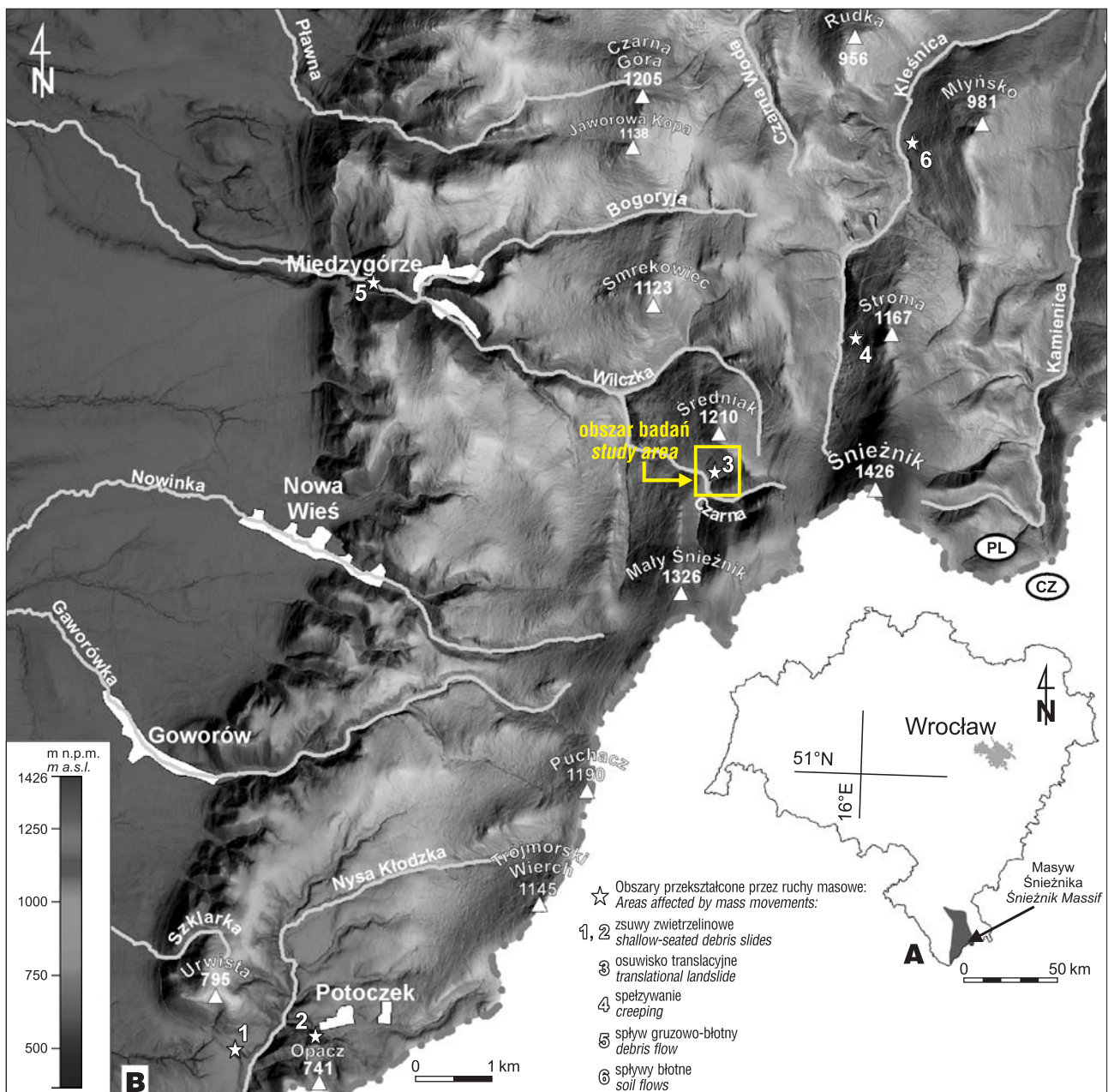
Stosowanie metod geofizycznych do badania osuwisk jest coraz bardziej powszechne zarówno w Polsce (Mościcki, Antoniuk, 2006; Pilecki i in., 2008; Kamiński i in., 2014; Pilecki, Harba, 2015), jak i za granicą (Petronino i in., 2016; Uhlemann i in., 2016). Podstawową zaletą tych metod jest ich bezinwazyjność, ponieważ nie wymagają wykonywania otworów wiertniczych ani szurfów, przez co pozwalają też zaoszczędzić czas i pieniądze. Obecnie do grona najczęściej stosowanych geofizycznych technik badawczych należą: metoda georadarowa (GPR), badania sejsmiczne i tomografia elektrooporowa (ERT). Każda z tych metod służy do określania innych właściwości fizycznych ośrodka geologicznego – GPR do badania przenikalności elektrycznej (ϵ , F/m), metoda sejsmiczna do oceny gęstości ośrodka (ρ , g/cm³), a ERT do badania oporności pozornej (R , Ω m). Nierzadko, w celu porównania otrzymanych wyników i pełniejszej interpretacji danych, wszystkie wymienione metody stosuje się jednocześnie (por. Bichler i in., 2004; Schrott, Sass, 2008; Kasprzak, Sobczyk, 2017).

Od lat 80. XX w. coraz większym zainteresowaniem cieszy się metoda georadarowa (Daniels, 2004), mająca szeroki wachlarz zastosowań. Przydatność tej metody do rozpoznawania osadów osuwisk była wielokrotnie wskazywana w literaturze (m.in. Bichler i in., 2004; Sass, Krautblatter, 2007; Cascini i in., 2017). Metodę georadarową wykorzystano m.in. do wyznaczenia architektury wewnętrznej osadów koluwalnych (Starheim i in., 2013), facji

georadarowych (Franke i in., 2015), a także do rozpoznania nieciągłości skał podłoża (Porsani i in., 2006).

W Polsce najwięcej ruchów masowych odnotowuje się na obszarze Karpat fliszowych, gdzie przemiennie występują skały osadowe o różnym uziarnieniu (zlepieńce, piaskowce, mułowce i iłowce), pofałdowane i poprzecinane spękaniem i uskokami (Długosz, 2011). Osuwiska na obszarze Sudetów, w przeciwieństwie do tych z Karpat fliszowych, były uznawane za formy lokalne (Pulinowa, 1972; Migoń, 2008). Najliczniej występują one na obszarze Gór Kamiennych w Sudetach Środkowych (Grocholski, 1971; Don i in., 1979; Bossowski i in., 1994; Migoń i in., 2014a). Postęp w rozpoznaniu obszarów przekształconych przez ruchy masowe, związany w ostatnich latach z rozpowszechnieniem metod teledetekcyjnych, w tym lotniczego skaningu laserowego (ALS – *Airborne Laser Scanning*; Wehr, Lohr, 1999) i pochodzących z niego danych LiDAR (*Light Detection and Ranging*) o wysokiej rozdzielczości (1 x 1 m lub większej), umożliwił rewizję wcześniejszego poglądu o nieznacznym przekształceniu sudeckich stoków przez wielkoskalowe ruchy masowe (*sensu* Dikau i in., 1996; por. Migoń, Kasprzak, 2011; Migoń i in., 2014a; Kowalski, 2017a, b). Numeryczny model terenu (NMT) LiDAR bardzo precyzyjnie odzwierciedla ukształtowanie powierzchni terenu, co umożliwia podział ruchów masowych na przemieszczenia powierzchniowe, jak soliflukcja i pełzanie gruntu (Migoń i in., 2014a), oraz wielkoskalowe (*sensu*

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; malgorzata.makos2@uwr.edu.pl; artur.sobczyk@uwr.edu.pl



Ryc. 1. A – Lokalizacja Masywu Śnieżnika na terenie Dolnego Śląska; B – Obszar badań na tle numerycznego modelu terenu LiDAR
Fig. 1. A – Location of the Śnieżnik Massif in the Lower Silesia area; B – The study area on LiDAR-based numerical terrain model

Dikau i in., 1996). Na obszarze Sudetów zidentyfikowano i rozpoznano dotychczas następujące rodzaje wielkoskalowych przemieszczeń grawitacyjnych (wg klasyfikacji Dikau i in., 1996): osuwiska rotacyjne (Synowiec, 2003, Migoń, Kasprzak, 2011), translacyjne (Migoń i in., 2014a), osuwiska sływowe (Kasprzak i in., 2014; Migoń i in., 2014b), a także formy o złożonej genezie (Migoń i in., 2010).

Masyw Śnieżnika (Sudety Wschodnie) był jak dotąd uznawany za pasmo górskie, w którym ruchy masowe nie występują na dużą skalę (Migoń, 1996). Obserwację tę potwierdzał pośrednio brak wzmożonej aktywności osuwiskowej w tym rejonie po wyjątkowo wysokich opadach deszczu w lipcu 1997 r., kiedy wg danych stacji w Międzygórzu, ich dobową sumą osiągnęła 200 mm (por. Parzoch, Migoń, 2010 za Dubicki i in., 1999). Na obszarze Masywu Śnieżnika odnotowano jak dotąd jedynie płytkie osuwiska zwietrzelinowe w rejonie góry Opacz (Sawicki, 1968) i Ur-

wistew (Wilczyńska, 1962), sływy błotne na zachodnich stokach góry Młyńsko (Pulinowa, 1972), a także sływ gruzowo-błotny w dolinie Wilczki (Żurawek, 1998). Znane są również wystąpienia innych form, świadczących o aktywności ruchów masowych, m.in. rozległe strefy spęływania pokryw stokowych w dolinie Kleśnicy (Jahn i in., 1989).

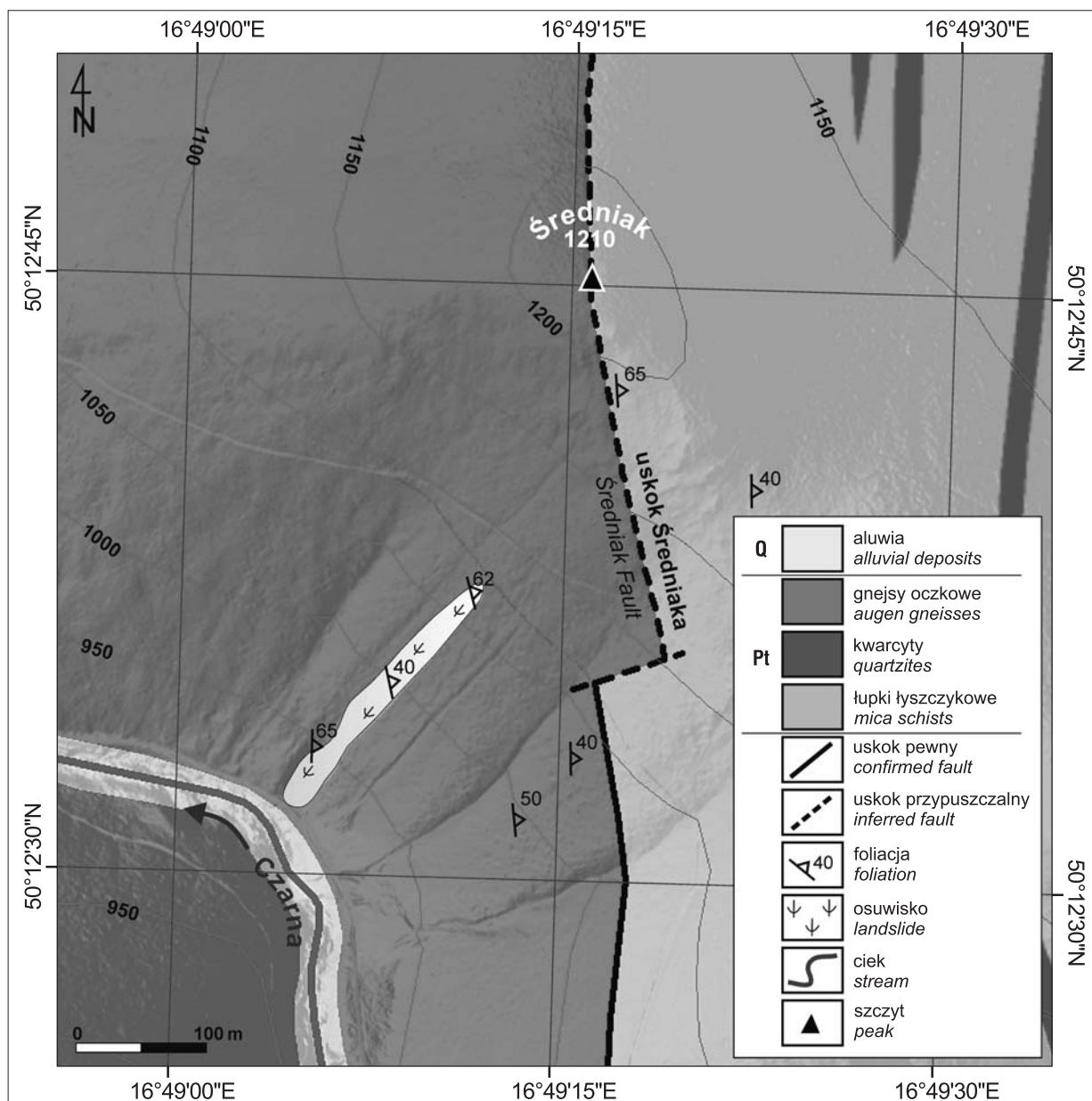
W 2011 r. w wyniku intensywnych opadów deszczu na stokach góry Średniak w Masywie Śnieżnika (ryc. 1) powstało niewielkie osuwisko translacyjne (0,55 ha), przejawiające cechy sływu. Osuwisko to posłużyło autorom niniejszego artykułu do próby oceny przydatności zintegrowanych pomiarów georadarowych i analiz geomorfometrycznych do inwentaryzacji i rozpoznania struktury wewnętrznej płytkich osuwisk. Tak zarysowany cel badań wymagał połączenia wielu technik badawczych, a w szczególności płytkiej prospekcji geofizycznej, metod z zakresu GIS, kartografii geologicznej i geomorfologicznej.

Ważnym elementem badań była również analiza strukturalna skał podłoża (uzupełniona o kartowanie geomorfologiczne), która posłużyła do wskazania uwarunkowań oraz następstw rozwoju osuwiska na górze Średniak. Obszar osuwiska objęto dotychczas badaniami geomorfologicznymi (Parzóch i in., 2012), meteorologicznymi (Urban, Foremnik, 2013), dendrochronologicznymi (Remisz i in., 2014) i geofizycznymi (Paszkievicz, 2014). Wyniki badań porównano z dotychczasowymi studiami tej formy osuwiskowej, co stanowiło podstawę do dyskusji nad jej genezą.

UKSZTAŁTOWANIE I BUDOWA GEOLOGICZNA TERENU BADAŃ

Badania prowadzono na SW stoku góry Średniak (ryc. 1 i 2), należącej do Masywu Śnieżnika w Sudetach Wschodnich (Kondracki, 2002). Masyw Śnieżnika ma formę rozrogu, w obrębie którego grzbiety górskie rozchodzą się w różne strony z najwyższego wzniesienia, tzw. punktu

zwornikowego Śnieżnika (1425 m n.p.m.; Migoń, 1996). Zachodnie ramię tego rozrogu stanowi Średniak (1210 m n.p.m.), który jest wzniesieniem o wyraźnie spłaszczonej wierzchołku, oddzielnym od pozostałych szczytów dolinami rzecznyymi. Od północy grzbiet ten jest ograniczony przez dolinę potoku Wilczka, natomiast po stronie południowej i zachodniej przez dolinę potoku Czarna. W szczytowych partiach Średniaka pod wpływem surowego klimatu peryglacialnego rozwinęły się pola gruzowo-blokowe i loby soliflukcyjne (Traczyk, 1996), które w dolinie Czarnej tworzą zwarte pokrywy typu *scree-slope* (Traczyk, 1996). Charakterystyczne skałki występujące na zachodnich i południowych stokach Średniaka powstały z odpornych na wietrzenie skał gnejsowych. Ponadto na SW stokach występują płytkie i wąskie niecki stokowe, schodzące do potoku Czarna. Miąższość pokrywy glebowo-zwierzelinowej na stokach Średniaka jest niewielka. W górnych partiach stoku osiąga kilkanaście do kilkudziesięciu centymetrów i sukcesywnie wzrasta w kierunku dna doliny. Zbocza



Ryc. 2. Mapa geologiczna rejonu Średniaka (wg Frąckiewicz, Teisseyre'a 1977a, b, zmieniona i uzupełniona)
Fig. 2. Geological map of the Mt. Średniak area (modified and supplemented by Frąckiewicz, Teisseyre, 1977a, b)

doliny Czarnej, podcinającej stoki Średniaka, porasta monokultura świerkowa.

Masyw Śnieżnika obejmuje południowo-zachodnią część metamorfiku Łądko-Śnieżnika, który wraz z metamorfikiem bystrzycko-orlickim określa się jako kopułę orlicko-śnieżnicką (Żelaźniewicz i in., 2011). Grzbiet Średniaka znajduje się w jej południowo-wschodniej części i jest zbudowany ze skał proterozoicznych, zaliczanych do dwóch formacji: strońskiej i gierałtowsko-śnieżnickiej (Frąckiewicz, Teisseyre, 1977a, b). Formacja strońska obejmuje łupki łuszczkowe i paragnejsy z wkładkami kwarcytów i amfibolitów. Formacja gierałtowsko-śnieżnicka jest zbudowana z gnejsów oczkowych i warstewkowych. Formacje te kontaktują ze sobą wzdłuż uskoku o biegu N-S, przebiegającym w przybliżeniu na linii grzbietu Średniaka (Frąckiewicz, Teisseyre, 1977a, b).

Osuwisko na Średniaku w całości rozwinęło się na obszarze występowania oczkowych gnejsów śnieżnickich (ryc. 2, Frąckiewicz, Teisseyre, 1977a), ok. 150 m na zachód od granicy z formacją strońską.

Ponadto na obszarze badań występują czwartorzędowe osady aluwialne, a także pokrywy blokowe, tworzące rozległe rumowiska, m.in. na stokach Średniaka, Małego Śnieżnika i Śnieżnika.

METODYKA BADAŃ

Terenowe badania geomorfologiczne, geologiczne i geofizyczne przeprowadzono na Średniaku wiosną 2016 r., to jest po upływie blisko 5 lat od powstania na jego stoku osuwiska. W celu uszczegółowienia zebranych danych oraz kontroli stanu osuwiska ponownych obserwacji dokonano jesienią 2017 r.

Badania geomorfologiczne

Jedną z podstawowych metod rozpoznania osuwiska na Średniaku było kartowanie geomorfologiczne, które miało na celu 1) rozpoznanie morfologii osuwiska i wykonanie szkicu geomorfologicznego, 2) precyzyjne wyznaczenie jego granic wsparte danymi z NMT LiDAR, 3) rozpoznanie obecności wód podziemnych i powierzchniowych.

W opisie morfologii osuwiska zastosowano nomenklaturę zgodną z *Instrukcją opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000* (Grabowski i in., 2008) oraz klasyfikacjami Varnesa (1978) i Dikau i in. (1996). Do analizy geomorfometrycznej wykorzystano numeryczny model terenu LiDAR, który poddano przetwarzaniu w środowisku oprogramowania ArcGIS (Esri, USA). Na podstawie NMT LiDAR wygenerowano mapę cieniowanego reliefu w odcieniach szarości (*shaded relief map*), która posłużyła do weryfikacji danych zebranych podczas obserwacji terenowych. Następnie, korzystając z danych LiDAR, opracowano mapę spadków i ekspozycji stoków. Wykonano również mapę różnicową obszaru osuwiska. W tym celu zrekonstruowano pierwotną powierzchnię stoku, usuwając z NMT LiDAR punkty tworzące model formy osuwiskowej, i interpolowano nową siatkę punktów o rozdzielczości 1 × 1 m na bazie przyległych powierzchni stokowych nieobjętych ruchami masowymi. Następnie w programie Surfer (Golden Software, USA) wykonano mapy różnicowe przedstawiające ubytek i przyrost masy osadów koluwalnych w obrębie for-

my osuwiskowej. Dokładność uzyskanego modelu deformacji stoku skonfrontowano z wynikami kartowania geomorfologicznego formy osuwiskowej i danymi z badań geofizycznych. Na podstawie mapy różnicowej wykonano również cieniowany model reliefu, obrazujący strefy depozycji materiału koluwalnego i kierunki ruchu jego transportu. Model wysokościowy wykorzystano również do wykonania przekrojów geomorfologicznych, pomiarów długości, szerokości i obliczenia pola powierzchni osuwiska.

Badania geologiczne

Równoległe z badaniami geomorfologicznymi prowadzono na Średniaku szczegółowe kartowanie geologiczne osuwiska w celu rozpoznania i wyznaczenia zasięgu wychodni podłoża skalnego w obrębie formy osuwiskowej. Punkty dokumentacyjne rejestrowano za pomocą odbiornika GPS Nomad Juno ST (Trimble, USA), a także aplikacji mobilnej FieldMove Clino (Midland Valley Exploration Ltd., Wielka Brytania). Wykonano również pomiary mezostrukturalne w gnejsach (foliacja, spękania), a także powierzchni poślizgu materiału osuwiskowego w górnej partii stoku objętego ruchami masowymi. Pomiary elementów strukturalnych zestawiono na diagramie w projekcji dolnej półkuli siatki Schmidta (ryc. 4). Wszystkie prezentowane materiały kartograficzne opracowano w projekcji PUWG 1992.

Badania geofizyczne

Na obszarze osuwiska przeprowadzono badania georadarowe. Metoda ta należy do grupy badań radiofalowych i bazuje na emisji ultrakrótkich impulsów elektromagnetycznych w głąb ośrodka, które ulegają tłumieniu, odbiciu i załamaniu na powierzchniach różniących się właściwościami dielektrycznymi, oraz rejestracji fal odbitych przez antenę odbiorczą (Daniels, 2004). Badanie to zrealizowano bezprzewodowym radarem Cobra Plug-In GPR firmy Radarteam Sweden AB z jednostką sterującą Mesa Rugged Notepad, wyposażoną w system GPS, dzięki czemu uzyskano automatyczny zapis pozycji georadaru wzdłuż wykonywanego profilu. Podczas prac wykorzystano antenę nieekranowaną Sub-Echo 40 o częstotliwości centralnej 52 MHz z sondowaniem w czasie rzeczywistym, o liczbie złożeń 64 000/s z zakresem czasowym 1600 ns. Podczas profilowań, zgodnie z literaturowymi wartościami referencyjnymi (Daniels, 2004), przyjęto, że przenikalność elektryczna pokryw stokowych ma taką samą wartość ($\epsilon = 25$) jak przenikalność przesyconych glin piaszczystych. W efekcie sondowań georadarowych otrzymano obraz falowy w postaci echogramu. Skala pionowa echogramu została wyrażona zarówno w metrach, jak i w jednostkach czasowych. Konwersję głębokościową wykonano na podstawie zależności:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad [1]$$

gdzie:

v – prędkość propagacji fali elektromagnetycznej w ośrodku;

c – prędkość światła w próżni;

ϵ – przenikalność elektryczna, w tym przypadku $\epsilon = 25$.

Ustalona w ten sposób prędkość propagacji fali elektromagnetycznej przy wartości przenikalności elektrycznej $\epsilon = 25$ wynosiła $0,06 \text{ m ns}^{-1}$. Wartość ta została następnie wykorzystana na potrzeby wyznaczenia głębokości w profilu pionowym. Odległość poziomą na echogramach wyrażono w metrach na podstawie danych GPS dla punktu początkowego i końcowego każdego profilu rejestrowanego z wykorzystaniem odbiornika GPS z satelitarnym systemem wspomagania nawigacji SBAS, przy współczynniku geometrycznej dokładności PDOP $< 2,0$. Procedurę filtracji profili georadarowych wykonano w oprogramowaniu Prism2 (Radar System Inc., Łotwa).

Na potrzeby badań geofizycznych wykonano 12 profili georadarowych, zorientowanych poprzecznie i podłużnie względem rozciągłości formy osuwiskowej (ryc. 3), o łącznej długości ok. 500 m i głębokości prospekcji dochodzącej do kilkunastu metrów. Spośród zebranych sondowań do dalszej analizy wytypowano dwa profile georadarowe, zorientowane poprzecznie do osi osuwiska, które cechowały się największą rozdzielczością uzyskanych danych oraz obecnością horyzontów refleksyjnych na echogramie. Filtrację danych georadarowych poprzedziła procedura korekcji punktu zerowego pierwszej powierzchni refleksyjnej dla fali elektromagnetycznej, dokonana na podstawie analizy pojedynczej trasy. Przeprowadzone w kolejnym etapie przetwarzanie danych miało na celu 1) eliminację szumów tła oraz 2) wzmocnienie sygnału, co znacznie poprawiło możliwości interpretacji danych geofizycznych.

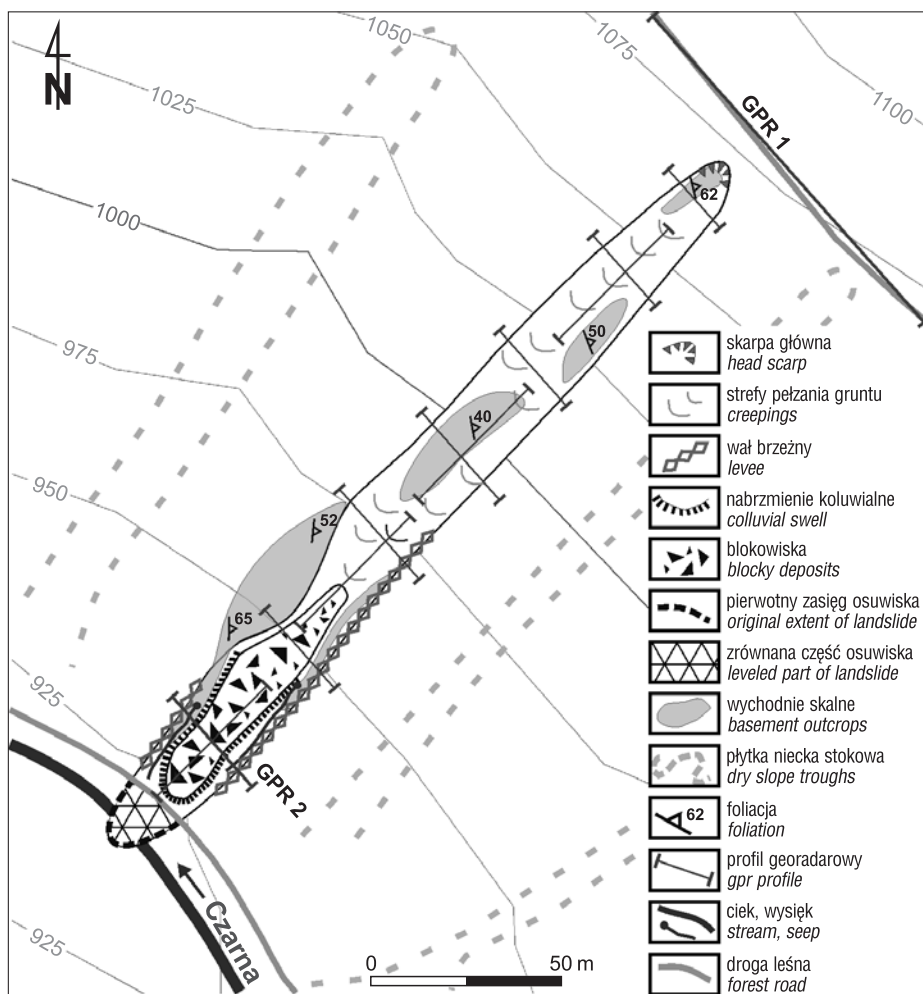
Pierwszy z dwóch profili georadarowych poddanych interpretacji, oznaczony jako GPR 1, miał długość 130 m, przebieg SE-NW i był zlokalizowany wzdłuż drogi leśnej ok. 10 m powyżej strefy źródłowej osuwiska (ryc. 3). Efektywny zakres głębokościowy sondowania georadarowego wyniósł 5–7,5 m p.p.t., a szczegółową interpretację danych wykonano do głębokości 4,5 m (ryc. 6). Profil GPR 2 został przeprowadzony z użyciem niezmiennych parametrów pomiarowych, miał długość 31 m oraz przebieg SE-NW. Został on poprowadzony poprzecznie względem osuwiska w dolnej części stoku (ryc. 7), w końcowej części nabrzmienia osuwiskowego. Głębokość uzyskanego echogramu poddanego dalszej analizie wyniosła ok. 5 m.

WYNIKI BADAŃ

Formy rzeźby

Osuwisko na SW stoku góry Średniak (ryc. 3; tab. 1 i 2) ma rozciągłość NE-SW i objęło środkową i dolną część stoku o powierzchni 0,55 ha (ryc. 4A; stan obecny). Długość osuwiska wynosi 230 m, a szerokość jest zmienna – od kilku metrów w strefie źródłowej do ok. 30 m w dolnej partii osuwiska. Występująca w górnej części osuwiska strefa oderwania materiału rozpoczyna się łukowatą skarpią główną o wysokości 0,5 m i nachyleniu 45° (ryc. 4B). Wspomniana strefa oderwania materiału tworzy półkoliste zagłębienie o wysokości do 1,4 m, gdzie odsłania się powierzchnia poślizgu (ryc. 4C). W dół stoku strefa oderwania przechodzi w wyraźną

rynne osuwiskową. Rynnę tę wypełnia materiał koluwalny w postaci zwietrzliny stokowej o frakcji piaszczysto-żwirowej, wymieszanej z grubofrakcyjnym rumoszem skalnym ($> 0,5 \text{ m}$) i roślinnością, która uprzednio porastała stok. Środkowa i dolna część osuwiska charakteryzuje się falistą morfologią. W tej części osuwiska wykształciły się bezładnie rozmieszczone formy powstałe na skutek pełzania gruntu. Boczne krawędzie osuwiska są wyraźnie zarysowane i podkreślone przez obecność wałów brzeżnych o wysokości do 1 m. W dolnej części stoku znajdował się pierwotnie jezioro osuwiskowe, który nasunął się na leśną drogę i koryto potoku w dolinie Czarnej (ryc. 3).



Ryc. 3. Szkic geomorfologiczny osuwiska na SW stokach Średniaka w Masywie Śnieżnika z lokalizacją profili georadarowych

Fig. 3. Geomorphological sketch of the Mt. Średniak landslide in the Śnieżnik Massif with marked locations of ground penetrating radar profiles

W trakcie prac porządkowych, mających na celu udrożnienie potoku oraz oczyszczenie powierzchni drogi leśnej, materiał jezora został częściowo usunięty, a teren zniwelowany. Maksymalną miąższość koluwium osuwiskowego (do 2,8 m) stwierdzono w nabrzmieniu koluwalnym występującym w czołowej strefie osuwiska. Na skutek przemieszczenia się materiału glebowo-zwierzelinowego w podłożu osuwiska odsłoniły się wychodnie gnejsów śnieżnickich. Tworzą one izolowane formy w górnej i środkowej części osuwiska, a także w jego brzeżnych partiach. Osuwisko nie objęło zasięgiem wychodni skalnej o wysokości do 2,5 m, znajdującej się na północ od nabrzmienia koluwalnego (ryc. 4D). Na granicy tej wychodni i koluwium znajdują się wysięki i odbywa się odpływ powierzchniowy, który zachodzi również po przeciwnej stronie nabrzmienia koluwalnego (ryc. 4E).

Do określenia miąższości osadów koluwalnych wykorzystano mapę różnicową (ryc. 5) obrazującą zmiany miąższości materiału względem zrekonstruowanej pierwotnej powierzchni stoku. Metodę wyznaczenia pierwotnej rzeźby stoku za pomocą map różnicowych stosowano w Sudetach m.in. do wyznaczenia miąższości koluwiów osuwiskowych (Kowalski, 2017b; Kowalski i in., 2018) i oceny ruchów pionowych na terenach eksploatacji górniczej (Kowalski, Maciejak, 2016). Analiza mapy różnicowej (ryc. 5A) i opracowanego na jej podstawie cieniowanego modelu reliefu (ryc. 5B), a także przekrojów poprzecznych przez osuwisko (ryc. 5C) wskazuje, że najwięcej materiału (do 1,4 m) zostało usunięte z górnej i środkowej części osuwiska, w przedziale wysokościowym 960–1068 m n.p.m.

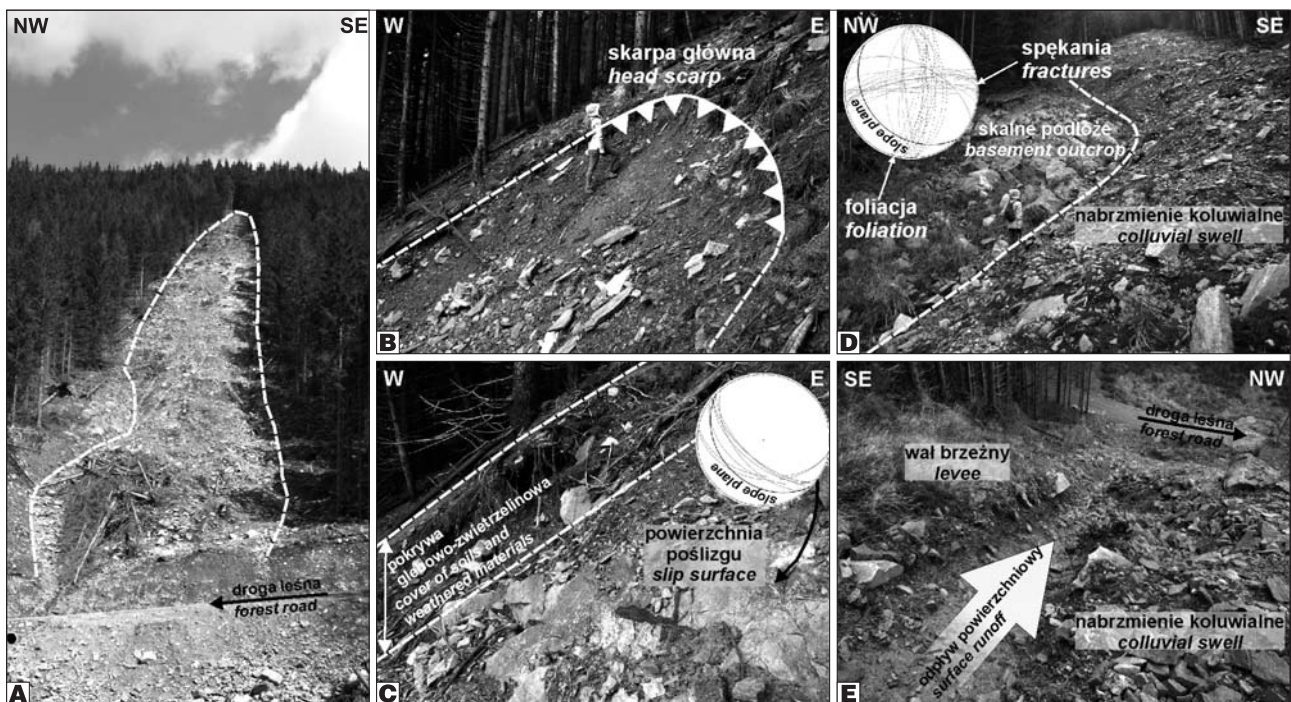
Tab. 1. Charakterystyka morfometryczna osuwiska na Średniaku
Table 1. Morphometry of the Średniak landslide

Powierzchnia [ha] <i>Landslide area [ha]</i>	0,55
Długość [m] <i>Length [m]</i>	230
Szerokość [m] <i>Width [m]</i>	30
Wysokość max [m n.p.m.] <i>Max height [m a.s.l.]</i>	1071
Wysokość min [m n.p.m.] <i>Min height [m a.s.l.]</i>	927
Rozpiętość pionowa [m] <i>Vertical extent [m]</i>	144
Nachylenie [°] <i>Average slope angle [°]</i>	34
Azymut [°] <i>Azimuth [°]</i>	220

Tab. 2. Charakterystyka morfometryczna fragmentu stoku przyległego do osuwiska na górze Średniak
Table 2. Morphometry of the fragmentary slope adjacent to the landslide at Mt. Średniak

Table 2. Morphometry of the fragmentary slope adjacent to the landslide at Mt. Średniak

Typ stoku / <i>Slope type</i>	prostoliniijny / <i>linear</i>
Nachylenie [°] / <i>Average slope angle [°]</i>	30
Azymut [°] / <i>Azimuth [°]</i>	220
Długość stoku [m] / <i>Slope length [m]</i>	463
Wysokość względna stoku [m] <i>Slope relative height [m]</i>	290



Ryc. 4. A – Osuwisko na SW stokach Średniaka; **B** – Strefa oderwania materiału o nachyleniu 45°, ograniczona skarpią osuwiskową; **C** – Powierzchnia poślizgu stanowiąca granicę między skałami podłoża a zwierzeliną; **D** – Wychodnie skalne, które nie zostały objęte przez osuwisko; **E** – wydłużone zagłębienie na granicy nabrzmienia koluwalnego i wału brzeżnego. Pomiary terenowe elementów strukturalnych (foliacja, spękania, powierzchnia poślizgu) zestawione na diagramie (dolna półkula siatki Schmidta). Na diagram naniesiono także uśrednioną orientację powierzchni stokowej

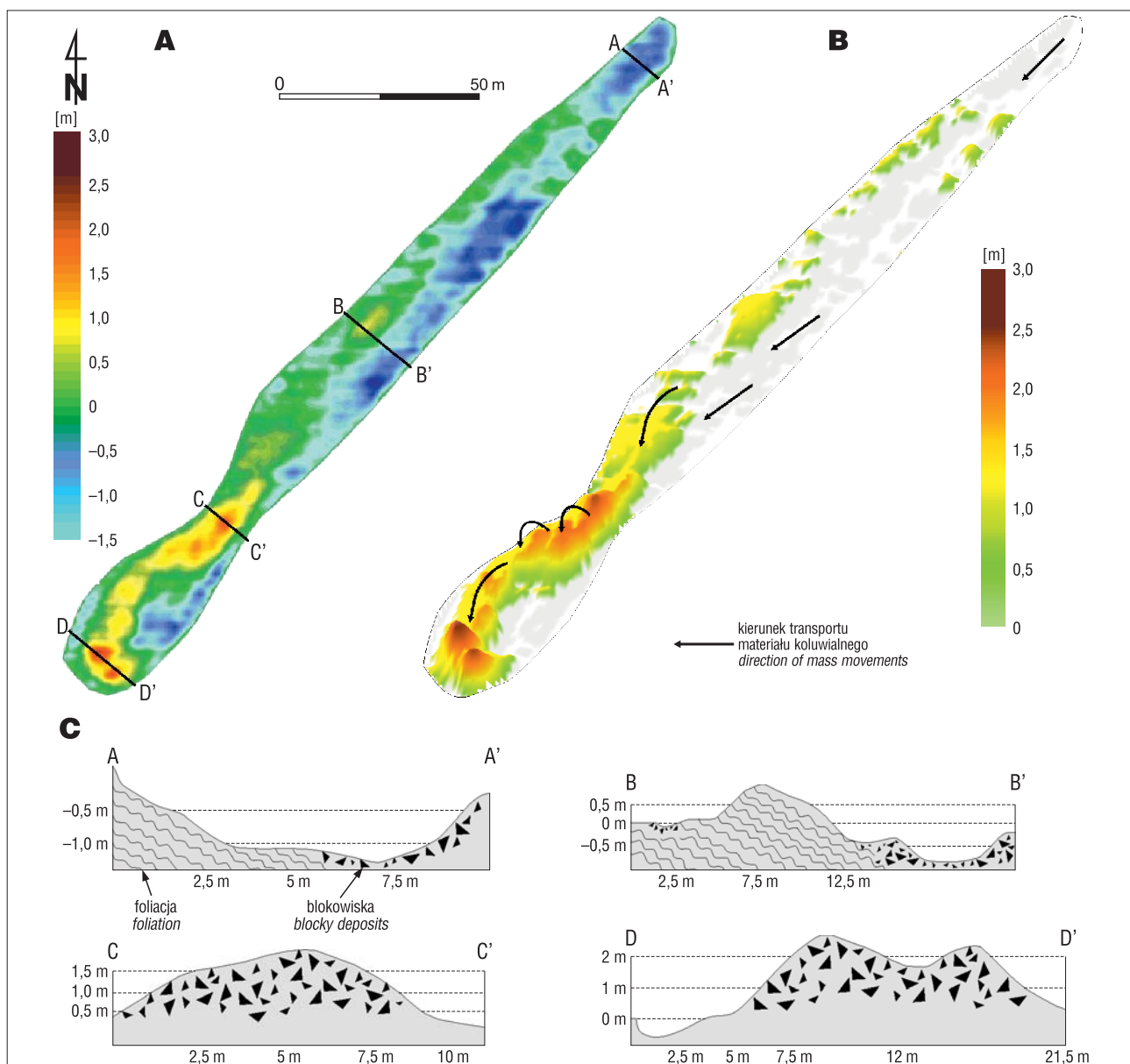
Fig. 4. A – Landslide on the SW slope of Mt. Średniak; **B** – Depletion zone with an inclination 45° limited by a head scarp; **C** – Slip surface representing a boundary zone between the basement outcrop and the slope cover deposits; **D** – Basement outcrop unaffected by landslide; **E** – Longitudinal hollow along a boundary zone between the colluvial swell and the levee. Field measurements of structural elements such as foliation, fractures and slip surface presented in the lower hemisphere of Schmidt's diagram, additionally marked with a mean orientation of slope plane

Ponadto ubytek masy obejmuje zagłębienia wzdłuż nabrzmienia koluwalnego w dolnej partii stoku (do 1 m). Natomiast najwięcej materiału osuwiskowego (do 2,8 m) osadziło się na wysokości 925–960 m n.p.m. Na podstawie morfologii koluwium osuwiskowego wyznaczono przypuszczalny kierunek transportu przemieszczającego się materiału (ryc. 5B).

Budowa geologiczna podłoża osuwiska

W podłożu formy osuwiskowej odślaniają się gnejsy śnieżnickie barwy różowo-czerwonej. Foliację w gnejsach podkreślają wydłużone soczewki kwarcowo-skalieniowe, a także blaszki łuszczaków (muskowitu). Powierzchnia foliacji jest pofałdowana i zapada w kierunku wschodnim

(azymut kierunku upadu: 88–108°) pod kątami 45–85°. Gnejsy są nieregularnie spękane. Wyróżniono dwa główne zespoły spękań, z których pierwszy zapada w kierunku północnym (340–26°) pod zmiennymi kątami 54–90°, a drugi w kierunku zachodnim (263–275°) pod kątami 59–83°. Analiza strukturalna (ryc. 4D) wykazała, że foliacja i zespoły spękań są zorientowane skośnie pod kątem ok. 40–45° względem orientacji dłuższej osi osuwiska (NE–SW) i kierunku ruchu koluwiów osuwiskowych. W górnej części osuwiska przemieszczający się materiał glebowo-zwietrzelinowy odsonił nieregularną powierzchnię poślizgu, równoległą do stoku i skośną do biegu powierzchni foliacji w gnejsach. Powierzchnia ta zapada pod kątem ok. 43° ku SW i nie jest genetycznie związana z wyznaczonymi zespołami spękań (ryc. 4C).



Ryc. 5. A – Mapa różnicowa obszaru osuwiska wykonana na podstawie NMT LiDAR i zrekonstruowanej pierwotnej powierzchni stoku; B – Cieniowany model reliefu wykonany na podstawie mapy różnicowej. Na modelu zobrazowano strefy depozycji materiału koluwalnego (skala barwna) oraz kierunki jego transportu (oznaczone strzałkami); C – Przekroje poprzeczne przez osuwisko na Średniaku – skala pionowa przekrojów przewyższona dwukrotnie

Fig. 5. A – Differential map of the landslide area based on LiDAR DEM and reconstructed primary slope plane; B – Shaded relief model based on differential map from Fig. 5.A. The depositional zones (colored scale) and direction of mass movements (arrows) are marked; C – Perpendicular cross-sections through the Średniak landslide – 2x vertical exaggeration

Dane georadarowe

Do rozpoznania uwarunkowań rozwoju osuwiska i struktury wewnętrznej osadów koluwalnych wybrano dwa profile georadarowe: GPR 1 – przebiegający ponad osuwiskiem i GPR 2 – przecinający jęzor osuwiska (ryc. 3). Niestety, w profilach zlokalizowanych w środkowej części rynn osuwiskowej nie uzyskano zadowalających wyników sondowania georadarowego, co można wyjaśnić niewielką miąższością osadów stokowych na tym odcinku lub ich brakiem.

Wyniki analizy pojedynczej trasy sondowania w profilu GPR 1 wykazały znaczny wzrost amplitudy sygnału – w zakresie między 1,35 a 2,10 m p.p.t. (ryc. 6C). Poziom ten skorelowano następnie z horyzontami refleksyjnymi H1 i H2 (ryc. 6B), które obrazują strefy potencjalnych złuznień skał podłoża do głębokości 2,5–3 m p.p.t. Zjawisko to, w połączeniu z niewielką miąższością pokrywy glebowo-zwietrzelinowej, mogło sprzyjać lokalnej koncentracji dużej ilości wód opadowych w trakcie rozlewnych opadów deszczu o maksymalnej sumie dobowej 117,2 mm, odnotowanej w dniu 21 lipca 2011 r. na stacji Międzygórze (Urban, Foremnik, 2013), w okresie bezpośrednio poprzedzającym uruchomienie osuwiska. Natomiast wykazana metodą GPR obecność stref głębszych spękań dodatkowo wpłynęła na wzrost efektywności migracji wód opadowych z powierzchni drogi leśnej w głąb ośrodka.

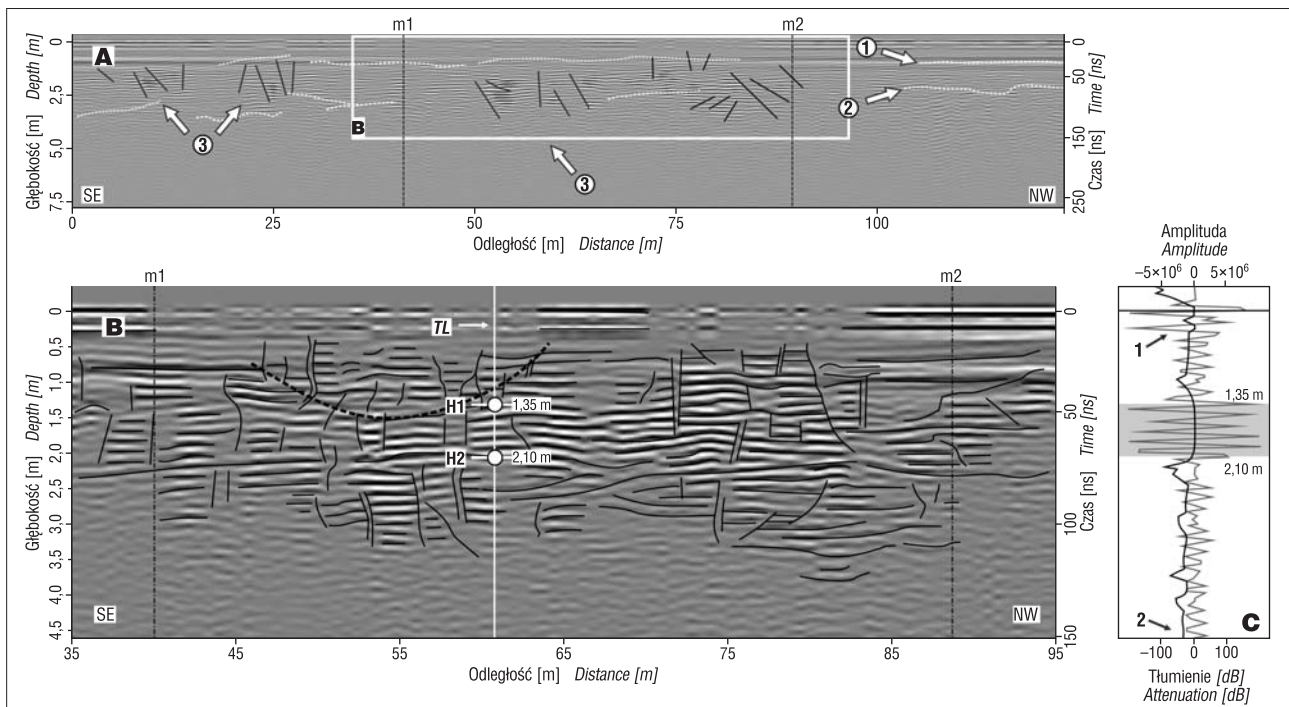
Profil GPR 2 ujawnił dwa główne horyzonty refleksyjne i wiele struktur drugorzędnych (ryc. 7A, B). Górny horyzont odzwierciedla strefę przypowierzchniową koluwium, z kolei horyzont leżący na głębokości 2,5–2,8 m p.p.t.

zinterpretowano jako granicę koluwium i skał podłoża, która stanowi jednocześnie powierzchnię poślizgu osuwiska. W środkowej części profilu odnotowano maksymalną miąższość osadów koluwalnych, dochodzącą do ok. 2,8 m, co jest zgodne z wynikami kartowania geomorfologicznego i mapą różnicową. Pionowa zmienność rozmieszczenia refleksów w środkowej części profilu GPR 2 (na dystansie 10–22 m) w zakresie 0,5–2,5 m p.p.t. prawdopodobnie jest związana z urozmaiconą morfologią strefy koluwalnej osuwiska (ryc. 4D, E). Taki układ można wiązać ze zjawiskiem pakietowego deponowania materiału koluwalnego w strefie nabrzmienia koluwalnego w następstwie nagłego spadku dynamiki transportu (Starheim i in., 2013).

Głębsze horyzonty refleksyjne (do 5 m p.p.t.) odzwierciedlają nierozpoznane w terenie powierzchnie nieciągłości w gnejsach. Wyniki badań georadarowych wskazały, że budowa wewnętrzna osadów nabrzmienia koluwalnego odzwierciedla różnorodny rozkład horyzontów refleksyjnych, co ukazuje złożoną morfologię tej formy.

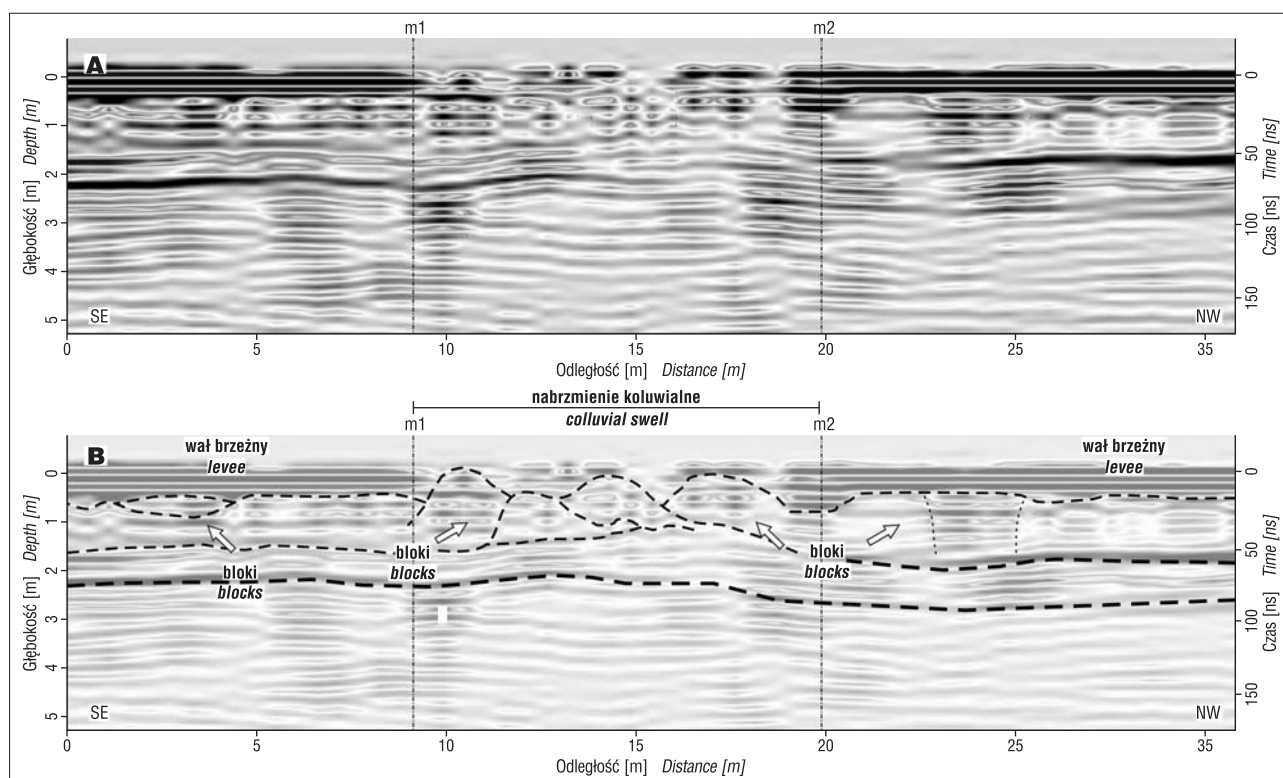
DYSKUSJA

Dotychczasowe wyniki badań formy osuwiskowej na Średniaku (Parzóch i in., 2012; Urban, Foremnik, 2013; Paszkiewicz, 2014; Remisz i in., 2014) zostały uzupełnione o profilowania georadarowe i szczegółową analizę strukturalną skał podłoża. Ponadto wykorzystanie danych LiDAR w analizie rzeźby osuwiskowej, a także opracowana na ich podstawie mapa różnicowa osuwiska umożliwiły precyzyjne określenie przyrostu miąższości osadów koluwalnych względem pierwotnej powierzchni stoku, co nie



Ryc. 6. **A** – Echogram georadarowy GPR 1 z zaznaczonymi strefami złuznień skał podłoża podkreślonymi ciągłymi horyzontami refleksyjnymi (czarne linie): 1 – dolna podbudowa drogi, 2 – granica zwietrzelin i litego podłoża, 3 – spękania; **B** – Echogram poddany procedurze filtrowania, linia TL wskazuje pozycję pojedynczej trasy georadarowej z obrazowaną na ryc. 6C wraz z lokalizacją i głębokością horyzontów refleksyjnych H1 i H2; **C** – Rozkład amplitudy wychyleń (szara krzywa – 1) oraz tłumienia fali elektromagnetycznej (czarna krzywa – 2), szarą ramką podkreślono zakres głębokościowy horyzontów

Fig. 6. **A** – GPR 1 echogram with areas of rock disintegration highlighted by continuous reflection horizons (black lines): 1 – road base, 2 – boundary zone between a weathered and an intact rock, 3 – joints; **B** – Filtered echogram, trace line (TL) with an individual trace line inspection depicted in Fig. 6C with location and a depth of reflection horizons H1 and H2; **C** – distribution of wiggle trace changes (grey line – 1) and EM wave attenuation (black line – 2), grey box marks horizontal plot correlation



Ryc. 7. Echogram georadarowy GPR 2 wykonany w strefie dystalnej osuwiska (A) oraz jego interpretacja (B) z zaznaczonymi strefami przemieszczeń i akumulacji materiału osuwiskowego, horyzontami refleksyjnymi opisanymi w tekście oraz nagromadzeniami bloków skalnych; symbole m1 i m2 wskazują strefy brzeżne głównego nabrzmienia koluwalnego, oznaczone w trakcie badań georadarowych w programie Prism Mobile

Fig. 7. GPR 2 echogram performed within a distal zone of the landslide (A) and its interpretation (B) with areas of debris material displacement and accumulation, reflection horizons described in the text and accumulated rock blocks; symbols m1 and m2 reflect external parts of colluvial swell marked in the field during GPR works with a Prism Mobile software

było dotychczas możliwe ze względu na brak wysokorozdzielczych danych wysokościowych.

Zintegrowanie wyników badań georadarowych, analiz geomorfometrycznych i pomiarów strukturalnych umożliwiło kompleksowe rozpoznanie obszaru osuwiska na Średniaku (ryc. 8A). Tak dobrane metody badawcze przyczyniły się do zminimalizowania wieloznaczności interpretacji wyników sondowań georadarowych, która często bywa podnoszona w literaturze (por. Karczewski i in., 2011).

Wyniki badań georadarowych potwierdzają obserwacje hydrogeologiczne (Campbell, 1975), które wskazują, że wzmożone opady powodują powstanie tymczasowego zwierciadła wód podziemnych na granicy strefy aeracji, gdzie następuje szybka infiltracja, i strefy saturacji, w obrębie której dochodzi do przesączania i koncentracji wód równoległe do powierzchni stokowej (Campbell, 1975). W efekcie tego procesu lokalnie w utworach stokowych gromadzą się wody zawieszane (Perazzo i in., 2004), które powodują wzrost ciśnienia porowego (Wang, Sassa, 2003) i zmniejszają tym samym stabilność stoku. W aspekcie fizycznym zmiany stosunków wodnych na stoku powodują 1) zmniejszenie wytrzymałości na ścinanie i 2) wzrost naprężeń ścinających (Selby, 1993) w pokrywach stokowych i skalnym podłożu. W efekcie zmian równowagi fizycznej stoku i całkowitego przesycenia wodą pokrywy glebowo-zwierzelinowej o niewielkiej miąższości może dojść do nagłego zsuwu materiału stokowego. Wydaje się, że taki proces nastąpił na SW stokach Średniaka, co doprowadziło do powstania osuwiska.

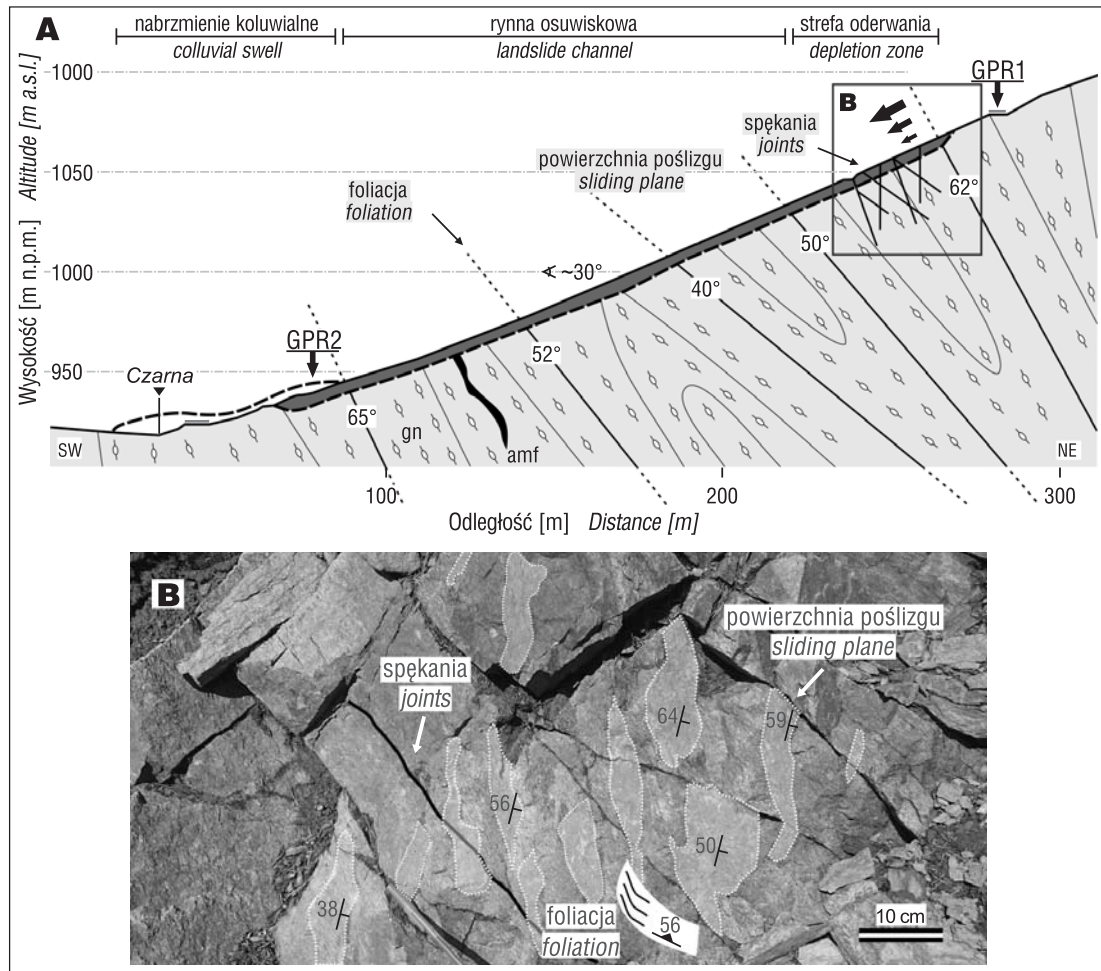
Paradoksalnie, zwarta monokultura świerkowa, porastająca stoki Średniaka, nie wpłynęła na zwiększenie

stabilności stoku, ze względu na płytki, przypowierzchniowy system korzeniowy. Sugerowano również (Remisz i in., 2014), że zmniejszenie stabilności stoków Średniaka mogło pośrednio wynikać z przekształceń antropogenicznych, związanych z intensywną gospodarką leśną i rozbudową systemu dróg i szlaków leśnych w Masywie Śnieżnika.

Według Paszkiewicza (2014) rozwój osuwiska na Średniaku mógł być uwarunkowany uskokiem o biegu NW-SE, rozpoznany w jego górnej części na podstawie przeprowadzonych sondowań elektrooporowych i sejsmiki refrakcyjnej. Paszkiewicz (2014) na podstawie wykonanych badań geofizycznych stwierdził, że domniemany uskoki wpłynął na zwiększenie infiltracji wód opadowych i w konsekwencji pośrednio na rozwój osuwiska. Obecność tej dyslokacji nie została jednak potwierdzona ani w obrazie georadarowym, ani w trakcie prac kartograficznych wykonanych przez autorów.

Obraz morfologii osuwiska uzyskany przez autorów niniejszej pracy jest odmienny od obserwacji Parzócha i in. (2012). Wiąże się to z przeprowadzeniem kartowania geomorfologicznego na obszarze formy częściowo już zmienionej. Ponowne obserwacje ujawniły większy udział wychodni skalnych w obrębie osuwiska, co umożliwiło precyzyjne zidentyfikowanie powierzchni nieciągłości w górnej partii stoku (ryc. 4C), wzdłuż której doszło do przemieszczenia materiału osuwiskowego. Odślonięcie skał podłoża w obrębie osuwiska jest pośrednio związane z pełzaniem gruntu, co zostało zaobserwowane w środkowej i dolnej partii osuwiska.

Badane osuwisko zostało opisane przez Parzócha i in. (2012) jako forma translacyjna, przejawiająca cechy prze-



Ryc. 8. A – Schematyczny model płytkiego osuwiska translacyjnego na Średniaku w relacji do struktur geologicznych wraz z zaznaczonymi sondowaniami GPR; **B** – Strefa oderwania osuwiska na granicy zwietrzeliwy i litego podłoża gnejsowego z zaznaczonymi głównymi elementami strukturalnymi: spękania, foliacja, powierzchnia poślizgu

Fig. 8. A – Diagrammatic sketch of a shallow translational landslide on Mt. Średniak slopes and its relation to geological structure, sites for GPR sounding marked; **B** – Landslide depletion zone evolved at the boundary zone between weathered and fresh gneissic bedrock with marked main structural elements: joints, foliation, sliding planes

mieszceń sływowych, co jest zgodne z obserwacjami autorów, przeprowadzonymi w strefie koluwalnej osuwiska. Wzmiankowana przez Parzocha i in. (2012) skarpa wtórna w górnej części osuwiska (s. 202, tamże) nie została udokumentowana. Najprawdopodobniej forma ta uległa zatarciu w wyniku późniejszych, płytkich ruchów masowych, takich jak zsuwy zwietrzelinowe i pełzanie gruntu.

Według autorów niniejszego artykułu w pierwszej kolejności materiał stokowy uległ oderwaniu wzdłuż udokumentowanej powierzchni poślizgu w górnej części stoku, stanowiącej jednocześnie granicę między skałami podłoża a zwietrzeliną (ryc. 4C, 8B), przyjmując formę skoncentrowanego zsuwu translacyjnego (*sensu* Bober, 1984). Podczas przemieszczania się materiał skalny uległ upłynnieniu i został grawitacyjnie przetransportowany w formie osuwiska sływowego, tracąc jednocześnie swą pierwotną strukturę. Wskazują na to niskie wały brzeżne, wykształcone wzdłuż formy osuwiskowej, a także urozmaicona morfologia rynny osuwiskowej. Przejście osuwiska translacyjnego w sływ na długich stokach górskich jest możliwe dzięki zwiększeniu masy transportowanego materiału w wyniku

zawodnienia oraz wzrostu prędkości jego przemieszczenia (Migoń, 2006).

W świetle wykonanych badań brak jest natomiast dowodów na dwuetapowy przebieg procesów osuwiskowych, postulowany przez Parzocha i in. (2012), obejmujący w pierwszej kolejności osunięcie pokryw zwietrzelinowych w dolnej części stoku i późniejszy ześlizg materiału glebowo-zwietrzelinowego w górnej części osuwiska. Proces ten doprowadziłby do powstania niewielkiej niszy osuwiskowej w dolnych partiach stoku, a w dalszej kolejności do wypełnienia powstałego w ten sposób zagłębienia przez koluwium młodszego osuwiska, które zostało zainicjowane w górnej części stoku (por. ryc. 4). Formy powstałe w następstwie tych procesów byłyby widoczne w obrazie geofizycznym w dolnej części osuwiska, a nie zaobserwowano ich. Przeciwnie, zestawienie danych płynących z analiz morfometrycznych (ryc. 5), sondowań georadarowych (ryc. 7B) i obserwacji terenowych wskazuje, że zasięg głębokościowy rynny osuwiskowej nie jest dużo większy niż odczytany z mapy różnicowej. W związku z tym można uznać, że powierzchnia poślizgu nie miała dużego zakrzywienia w przekroju poprzecznym i jest prawie płaska, co

nie potwierdza wzmiankowanego przez Parzócha i in. (2012) dwuetapowego rozwoju osuwiska na Średniaku.

Osuwisko na Średniaku nie objęło skał krystalicznych podłoża i rozwinęło się skośnie do stwierdzonych powierzchni strukturalnych, takich jak foliacja i spękania (ryc. 8A). Najprawdopodobniej w przypadku tego typu płytkich osuwisk zwietrzelinowych rzeźba stoku ma znacznie większy wpływ na ich rozwój niż budowa geologiczna (Długosz, 2011). Tym samym, zgodnie z powszechnie stosowanymi podziałami ruchów masowych (np. Kleczkowski, 1955; Bober, 1984; Grabowski i in., 2008; Margielewski, 2009), osuwisko na Średniaku należałoby określić jako formę konsekwentno-zwietrzelinową, rozwiniętą wzdłuż powierzchni poślizgu w przybliżeniu równoległej do stoku i odpowiadającej granicy zwietrzelin – skały podłoża (ryc. 4C, 8B), co jest zgodne z obserwacjami Parzócha i in. (2012).

PODSUMOWANIE

Autorzy artykułu przeprowadzili sondowania georadarowe, które umożliwiły kompleksową analizę obszaru osuwiska na Średniaku w relacji do zebranych danych kartograficznych i informacji płynących z numerycznego modelu terenu, wskazując tym samym na użytkowe znaczenie wykonanych badań, z potencjałem do prowadzenia dalszych analiz i interpretacji. Połączenie wielu technik badawczych – badań geofizycznych i analiz GIS, uzupełnionych o pomiary strukturalne, stanowi szybką i skuteczną metodę inwentaryzacji, analizy i prezentacji uwarunkowań rozwoju osuwisk i związanych z nimi przekształceń rzeźby terenu. Natomiast odpowiednio dobrana metodyka prac geofizycznych, pozwalająca zobrazować i podkreślić zmienność wykształcenia osadów i budowy podłoża, umożliwia skuteczne rozpoznanie architektury wewnętrznej osadów osuwiskowych i stref zluźnienia podłoża skalnego, a także estymację miąższości kolumium. Wyniki przeprowadzonych badań podkreślają również potencjał wykorzystania numerycznych modeli terenu nie tylko do identyfikacji i rozpoznania obszarów osuwiskowych, ale również do opracowania szczegółowych map różnicowych osadów kolumialnych. Dzięki mapie różnicowej i cieniowanemu modelowi reliefu precyzyjnie określono miąższość materiału, który został usunięty z górnej strefy osuwiska na SW stokach Średniaka na skutek zsuwu translacyjnego, oraz jego miąższość w środkowej i dystalnej części formy osuwiskowej, gdzie został zdeponowany.

Zaletą sondowań geofizycznych, przeprowadzonych przy użyciu nieekranowanej anteny georadarowej, był brak konieczności kontaktu aparatury z podłożem, co w tak trudnych warunkach terenowych, jak na stromych stokach Średniaka, znacząco ułatwiło przeprowadzenie badań w sposób ciągły. Zastosowana częstotliwość (52 MHz) umożliwiła uzyskanie zadowalającej rozdzielczości rozpoznania stref o zwiększonej miąższości kolumium, co w przypadku osuwiska na Średniaku było wystarczające do zrealizowania założonych celów. Należy jednak zauważyć, że użycie zestawu anten o wyższych częstotliwościach (nieдоступnych dla autorów w trakcie prowadzenia badań) mogłoby poprawić rozdzielczość danych GPR.

Przeprowadzona analiza z pozoru prostej formy osuwiskowej, o mało zróżnicowanej morfologii, pozwoliła na uznanie przydatności zintegrowanych metod badawczych do analiz i określania skali przekształceń stoków sudeckich,

jako skutecznej metody badania terenów zagrożonych ruchami masowymi.

Podatność stoku na ruchy masowe jest związana z wieloma czynnikami, najczęściej powiązаныmi ze sobą (Zabuski i in., 1999). Głównym impulsem aktywującym osuwisko na Średniaku były wzmożone opady deszczu, które są najczęściej wymienianym w literaturze czynnikiem inicjującym płytkie osuwiska i spływy na obszarach górskich (Caine, 1980; Guzzetti i in., 2008). Ponadto cechy morfologiczne warunkujące rozwój osuwiska na Średniaku obejmują duże różnice wysokości, zmiany nachylenia stoku (20–45°), jego znaczną długość (463 m), a także obecność pokrywy glebowo-zwietrzelinowej o niewielkiej miąższości (ok. 0,5 m). Przemieszczenie mas skalnych obejmowało prawdopodobnie ześlizg zwartej pokrywy glebowo-zwietrzelinowej w górnej partii osuwiska wzdłuż udokumentowanej powierzchni poślizgu, a następnie jego transformację w osuwisko spływowe na skutek upłynięcia materiału stokowego.

Autorzy pragną serdecznie podziękować Profesorowi Piotrowi Migonowi oraz anonimowemu Recenzentowi za wnikliwe i cenne uwagi, które przyczyniły się do znacznego udoskonalenia pierwotnej wersji artykułu. Podziękowania kierujemy również do Mgr. Aleksandra Kowalskiego za konstruktywną krytykę i cenne wskazówki techniczne. Dziękujemy firmie MPWiK S.A. z Wrocławia za udostępnienie georadaru Cobra Plug-In GPR na potrzeby wykonania badań terenowych. Informujemy, że wykorzystaliśmy dane cyfrowe LiDAR zgodnie z licencją nr DIO.DFT.DSI.7211.1619.2015_PL_N, wydaną w dniu 7 kwietnia 2015 r. oraz DIO.DFT.7211.9874.2015_PL_N, wydaną w dniu 25 września 2015 r. przez głównego geodetę kraju dla WNo-ZiKŚ UW.

LITERATURA

- BICHLER A., BOBROWSKY P., BEST M., DOUMA M., HUNTER J., CALVERT T., BURNS R. 2004 – Three-dimensional mapping of a landslide using a multi geophysical approach: the Quesnel Forks landslide. *Landslides*, 1: 29–40.
- BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 340: 115–158.
- BOSSOWSKI A., CYMERMAN Z., GROCHOLSKI A., IHNATOWICZ A. 1994 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000. Ark. Jedlina Zdrój. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CAINE N. 1980 – The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flow. *Geografiska Ann. Ser. A, Physical Geogr.*, 62 (1/2): 23–27.
- CAMPBELL R.H. (red.) 1975 – Soil Slips, debris flow, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California. USGS Professional Paper 851, United States government Printing Office, Washington.
- CASCINI L., CIURLEO M., DI NOCERA S. 2017 – Soil depth reconstruction for the assessment of the susceptibility to shallow landslides in fine-grained slopes. *Landslides*, 14: 459–471.
- DANIELS D. (red.) 2004 – Ground Penetrating Radar (2nd ed.). The Institution of Electrical Engineers, London.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHRÖTT L., IBSEN M.L. (red.) 1996 – *Landslide Recognition*. Wiley, Chichester.
- DŁUGOSZ M. (red.) 2011 – Podatność stoków na osuwanie w polskich Karpatach fliszowych. IGiPZ PAN, Warszawa.
- DON J., JERZYKIEWICZ T., TEISSEYRE A.K., WOJCIECHOWSKA I. 1979 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1:25 000. Ark. Lubawka. Wyd. Geol., Warszawa.
- DUBICKI A., SŁOTA H., ZIELIŃSKI J. (red.) 1999 – Dorzecze Odry. Monografia powodzi. Lipiec 1997. Seria Atlasy i Monografie. IMiGW, Warszawa, 23–44.
- FRANKE D., HORNUNG J., HINDERER M. 2015 – A combined study of radar facies, lithofacies and three-dimensional architecture of an alpine alluvial fan (Illgraben fan, Switzerland). *Sedimentology*, 62: 57–86.
- FRĄCKIEWICZ W., TEISSEYRE H. 1977a – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Sudetów w skali 1 : 25 000, Ark. Międzygórze. Wyd. Geol., Warszawa.

- FRĄCKIEWICZ W., TEISSEYRE H. 1977b – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000, Ark. Międzygórze. Wyd. Geol., Warszawa.
- GRABOWSKI D., MARCINIEC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A., ZIMNAL Z. (red.) 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000. Min. Środ., Warszawa.
- GROCHOLSKI A. 1971 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000. Ark. Mieroszów. Wyd. Geol., Warszawa.
- GUZZETTI F., PERUCCACCI S., ROSSI M., STARK C.P. 2008 – The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flow: an update. *Landslides*, 5: 3–17.
- JAHN A., KOZŁOWSKI S., WISZNIOWSKA T. (red.) 1989 – Jaskinia Niedźwiedzia w Kletnie. Badania i udostępnianie. Ossolineum, Wrocław – Warszawa – Kraków – Gdańsk – Łódź.
- KAMIŃSKI M., ZIENTARA P., KRAWCZYK M. 2014 – Wykorzystanie tomografii elektrooporowej do badania osuwisk – osuwisko Działisz (południowo-zachodnie Podhale). *Prz. Geol.*, 62: 198–203.
- KARCZEWSKI J., ORTYL Ł., PASTERNAK M. (red.) 2011 – Zarys metody georadarowej. Wyd. drugie popr. i rozsz. Wyd. AGH.
- KASPRZAK M., BIERNACKA J., CHOMICZ J., MICHNIEWICZ A. 2014 – Morfologia i osady małych dolin denudacyjnych w masywie Garbatki (Góry Suche). *Przr. Sudetów*, 17: 199–212.
- KASPRZAK M., SOBCZYK A. 2017 – Searching for the void: improving cave detection accuracy by multi-faceted geophysical survey reconciled with LiDAR DTM. *Zeit.f. Geom.*, 61: 45–59.
- KLECZKOWSKI A. 1955 – Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geol., Warszawa.
- KONDRACKI J. (red.) 2002 – Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- KOWALSKI A. 2017a – Rozmieszczenie i geneza form osuwiskowych w przełomowej dolinie Bobru w okolicach Wlenia (Sudety Zachodnie). *Prz. Geol.*, 65: 629–641.
- KOWALSKI A. 2017b – Ruchy masowe a interpretacja budowy geologicznej – przykład osuwiska na górze Drogosz w paśmie Zaworów (Sudety Środkowe). *Prz. Geol.*, 65: 96–104.
- KOWALSKI A., MACIEJAK K. 2016 – Zastosowanie metod geomorfometrycznych w analizie deformacji powierzchni terenu spowodowanych działalnością górniczą na przykładzie kopalni *Nowy Kościół* (Stare Zagłębie Miedziowe, synklinorium północnosudeckie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 466: 137–146.
- KOWALSKI A., WAJS J., KASZA D. 2018 – Monitoring of anthropogenic landslide activity with combined UAV and LiDAR-derived DEMs – a case study of the Czerwony Wąwóz landslide (SW Poland, Western Sudetes). *Acta Geodynam. Geomater.*, 15 (2): 117–129.
- MARGIELEWSKI W. 2009 – Problematyka osuwisk strukturalnych w Karpatach fliszowych w świetle zuniifikowanych kryteriów klasyfikacji ruchów masowych – przegląd krytyczny. *Prz. Geol.*, 57 (10): 905–917.
- MIGOŃ P. 1996 – Zarys rozwoju geomorfologicznego Masywu Śnieżnika. [W:] Jahn A., Kozłowski A., Pulina M. (red.), *Masyw Śnieżnika. Zmiany w środowisku przyrodniczym*. Wyd. PAE, Wrocław: 35–45.
- MIGOŃ P. (red.) 2006 – Geomorfologia. Wyd. Nauk. PWN.
- MIGOŃ P. 2008 – Współczesna ewolucja rzeźby Sudetów i ich Przedgórze. [W:] Starkel L., Kotarba A., Kostrzewski A., Krzemien K. (red.), *Współczesne przemiany rzeźby Polski*. Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, Kraków: 135–163.
- MIGOŃ P., KACPRZAK A., MALIK I., KASPRZAK M. 2014a – Formy osuwiskowe w Górach Kamiennych (Sudety Środkowe) – kryteria identyfikacji i oceny zagrożeń. *Landform Analysis*, 26: 39–60.
- MIGOŃ P., KACPRZAK A., MALIK I., KASPRZAK M., OWCZAREK P., WISTUBA M., PÁNEK T. 2014b – Geomorphological, pedological and dendrochronological signatures of a relict landslide terrain, Mt Garbatka (Kamienne Mts), SW Poland. *Geomorphology*, 219: 213–231.
- MIGOŃ P., KASPRZAK M. 2011 – Morfologiczny zapis ruchów masowych na progach morfologicznych Gór Stołowych w świetle numerycznego modelu wysokości o dużej rozdzielczości. *Przr. Sudetów*, 14: 115–124.
- MIGOŃ P., PÁNEK T., MALIK I., HRÁDECKÝ J., OWCZAREK P., ŠILHÁN K. 2010 – Complex landslide terrain in the Kamienne Mountains, Middle Sudetes, SW Poland. *Geomorphology*, 124: 200–214.
- MOŚCICKI W.J., ANTONIUK J. 2006 – Badania geoelektryczne na przedpolu osuwiska w kopalni diabazu *Niedźwiedzia Góra* koło Krzeszowic. *Kwart. AGH Geologia*, 32 (4): 389–404.
- PARZÓCH K., MIGOŃ P. 2010 – Zdarzenia ekstremalne w systemie stokowym – grawitacyjne ruchy masowe i erozja gleb. [W:] Migoń P. (red.), *Wyjątkowe zdarzenia przyrodnicze na Dolnym Śląsku i ich skutki*. IGiRR UWr, Wrocław: 205–239.
- PARZÓCH K., PAWLIK Ł., SOLARSKA A., WITEK M. 2012 – Osuwisko na stokach Średniaka w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego w 2011 roku. *Przr. Sudetów*, 15: 197–208.
- PASZKIEWICZ M. 2014 – Rozpoznanie uwarunkowań geologicznych i obecnego stanu osuwiska na zboczu Średniaka (Masyw Śnieżnika). Pr. magist., Arch. UWr, Wrocław: 1–44.
- PERAZZOLO L., BICA A.V.D., BRESSANI L.A., FLORES J.A.A., AZAMBUJA E., MARTINS F.B. 2004 – Governing features of the stability of colluvium slope over basalt. [W:] Lacerda W.A., Ehrlich M., Fontoura S.A.B., Sayão A.S.F. (red.), *Landslide: Evaluation and Stabilization*. Taylor & Francis Group, London: 993–998.
- PETRONINO L., BOAGA J., CASSIANI G. 2016 – Characterization of the Vajont landslide (North-Eastern Italy) by means of reflection and surface wave seismic. *J. Appl. Geoph.*, 128: 58–67.
- PILECKI Z., HARBA P. 2015 – Wstępne wyniki badania budowy i właściwości osuwiska metodą interferometrii sejsmicznej z wykorzystaniem wysokoczęstotliwościowego szumu sejsmicznego. *Zesz. Nauk. IGSMiE PAN*, 89: 63–76.
- PILECKI Z., KŁOSIŃSKI J., PILECKA E., KARCZEWSKI J., ZIĘTEK J. 2008 – Wpływ zawodnienia osuwiska na rozpoznanie granic jego nieciągłości metodami falowymi. *Gosp. Sur. Miner., Polska Akademia Nauk. Inst. Gosp. Sur. Miner. i Ener.*, 24 (2/3): 427–444.
- PORSANI J.L., SAUCK W.A., JUNIOR A.O.S. 2006 – GPR for mapping fractures and as a guide for the extraction of ornamental granite from a quarry: A case study from southern Brazil. *J. Appl. Geoph.*, 58: 177–187.
- PULINOWA M.Z. (red.) 1972 – Procesy osuwiskowe w środowisku sztucznym i naturalnym. Dokumentacja Geograficzna, Instytut Geografii PAN, Warszawa.
- REMISZ J., BIJAK SZ., PARZÓCH K., WITEK M. 2014 – Czy dało się przewidzieć? – osuwisko na Średniaku w świetle informacji z przystosów rocznych. *Stud. i Mat. CEPL w Rogowie*, 16, 40 (3): 122–129.
- SASS O., KRAUTBLATTER M. 2007 – Debris flow-dominated and rockfall-dominated talus slope: Genetic models derived from GPR measurements. *Geomorphology*, 86: 176–192.
- SAWICKI L. 1968 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Sudetów w skali 1 : 25 000, Ark. Międzyzlesie. Wyd. Geol., Warszawa.
- SCHROTT L., SASS O. 2008 – Application of field geophysics in geomorphology: Advances and limitations exemplified by case studies. *Geomorphology*, 93: 55–73.
- SELBY M.J. (red.) 1993 – Hillslope materials and processes. Oxford Univ. Press, Oxford.
- STARHEIM C., GOMEZ C., HARRISON J., KAIN C., BREWER N. J., OWEN K., HADMOKO D.S., PURDIE H., ZAWAR-REZA P., OWENS I., WASSMER P., LAVIGNE F. 2013 – Complex internal architecture of a debris-flow deposit revealed using ground-penetrating radar, Cass, New Zealand. *New Zealand Geographer*, 69: 26–38.
- SYNOWIEC G. 2003 – Formy osuwiskowe w Górach Kamiennych. *Prz. Geol.*, 51: 59–65.
- TRACZYK A. 1996 – Formy i osady peryglacjalne w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego. *Acta UWr 1808, Pr. Inst. Geogr., Seria A, Geogr. Fiz.*, 8: 111–119.
- UHLEMANN S., HAGEDORN S., DASHWOOD., MAURER H., GUNN D., DIJKSTRA T., CHAMBERS J. 2016 – Landslide characterization using P- and S-wave seismic refraction tomography – The importance of elastic moduli. *J. Appl. Geoph.*, 134: 64–76.
- URBAN G., FOREMNIK I. 2013 – Szkody w infrastrukturze leśnej w lasach Masywu Śnieżnika wyrządzone przez opady rozlewne w lipcu 2011 roku i ich uwarunkowania. *Sylwan*, 157: 95–103.
- VARNES D.J. 1978 – Slope movement types and processes. [W:] *Landslides: Analysis and Control*. Washington D.C., Transportation and Road Research Board, Nat. Ac. Of Sc., Special Report, 176: 11–35.
- WANG G., SASSA K. 2003 – Pore-pressure generation and movement of rainfall-induced landslides: effects of grain size and fine-particle content. *Engineer. Geol.*, 69: 109–125.
- WEHR A., LOHR U. 1999 – Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS J. Photogram. Remote Sensing*, 54 (2–3): 68–82.
- WILCZYŃSKA J. 1962 – Budowa geologiczna wschodniej części arkuza Międzyzlesie (okolice Potoczka). Pr. magist., Arch. Uwr, Wrocław.
- ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L. (red.) 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat polskich: geologia, modelowanie, obliczenia stateczności. Wyd. Inst. Budow. Wodnego PAN, Gdańsk.
- ŻELAZNIEWICZ A., ALEKSANDROWSKI P., BUŁA Z., KARKOWSKI P.H., KONON A., OSZCZYPKON., ŚLĄCZKA A., ŻABA J., ŻYTKO K. (red.) 2011 – Regionalizacja tektoniczna Polski. Komitet Nauk Geologicznych PAN, Warszawa.
- ŻURAWEK R. 1998 – Geomorfologiczne skutki katastrofalnych opadów deszczu i powodzi w lipcu 1997 r. w dorzeczu Wilczki (Sudety Wschodnie). [W:] Pękala K. (red.), *Zjazd Geomorfologów Polskich. Główny kierunki badań geomorfologicznych w Polsce. Stan aktualny i perspektywy*. Wyd. UMCS Lublin, 229–233.

Praca wpłynęła do redakcji 18.01.2018 r.
Akceptowano do druku 20.08.2018 r.

PRZEGLĄD GEOLOGICZNY



MINISTERSTWO
ŚRODOWISKA



Cena 12,60 zł (w tym 5% VAT)

TOM 66 Nr 10 (PAŹDZIERNIK) 2018

Indeks 370908 ISSN-0033-2151

**Realizacja zadań publicznych
a ramy prawne instytutów badawczych**

**Badania hydrogeologiczne
w drugim 50-leciu istnienia PIG**

Monitorowanie procesu hydrokompakcji

**Pomiary georadarowe i analizy
geomorfometryczne w rozpoznawaniu osuwisk**

Zdjęcie na okładce: Osuwisko z 2011 r. na górze Średniak w Masywie Śnieżnika (Sudety Wschodnie) – zobacz artykuł M. Makoś i A. Sobczyka na str. 636. Fot. M. Makoś

Cover photo: Landslide occurred in 2011 on Mt. Średniak in the Śnieżnik Massif (Eastern Sudetes) – see article by M. Makoś and A. Sobczyk on p. 636. Photo by M. Makoś