

Prototyp systemu monitorowania terenów osuwiskowych LandSMS – wyniki testów na osuwisku w Kłodnem w Karpatach fliszowych

Janusz Mirek¹, Jacek Stanisławski², Robert Kaczmarczyk², Paweł Cwiąkała²



J. Mirek

J. Stanisławski

R. Kaczmarczyk

P. Cwiąkała

Prototype of early warning system for areas at risk of landslides LandSMS – results of tests on the landslide in Kłodne in flysch Carpathians. *Prz. Geol.*, 65: 817–822.

Abstract. Mass movements are a major problem associated with the sustainable planning of space. They often cause permanent degradation of the areas of development or agricultural use. Exclusion of active landslides and periodically active landslides from development area is obvious. Restrictions on land use areas of active and inactive landslides and their buffer zones involve

differences in opinions. A useful tool in the assessment of risk of landslide in such areas can be a low-cost system LandSMS (Landslide Monitoring System). The prototype of the system consists of a sensing element (tie-rod), a monitoring station and a data server. Tie-rod is attached to the concrete slab, which is stabilized on the landslide area. Surface deformations resulting from movement of the landslide are controlled by two sensors – encoder and an ultrasonic sensor. The system operates continuously. In the case of an emergency situation system informs authorized persons about the incident. Efficiency and system functions are analyzed on a selected area of the landslide in Kłodne (Little Poland, commune Limanowa). Preliminary results confirm the usefulness of the system. In the initial observation period (October–December 2016) displacement reached 8 mm. This is due to stabilization of the measuring point. Later, there was no displacement effected by mass movements reported.

Keywords: landslides monitoring, alert systems, risk of landslides

Ruchy masowe niekorzystnie wpływają na stan infrastruktury i często powodują trwałą degradację obszarów zabudowy lub użytkowania rolniczego. W latach 1995–2014 odnotowano w Europie 457 znaczących zdarzeń osuwiskowych (ryc. 1). Od 2009 r. ich łączna liczba znacznie wzrosła. Szacuje się, że straty wywołane przez ruchy masowe na naszym kontynencie wynoszą ok. 4,7 mld euro rocznie (dane z 27 krajów; Haque i in., 2016).

W polskich Karpatach fliszowych do 2016 r. zinventaryzowano prawie 58 000 osuwisk, jednak prace nie zostały zakończone. Pracownicy Państwowego Instytutu Geologicznego – PIB (PIG-PIB), którzy prowadzą w Polsce inwentaryzację osuwisk, szacują ich liczbę na ponad 100 000 (Wójcik, Wojciechowski, 2016). Skala zjawiska coraz częściej powoduje problemy związane z zagospodarowaniem terenów objętych ryzykiem wystąpienia ruchów masowych. Administracja samorządowa podejmuje zróżnicowane decyzje dotyczące dopuszczenia do użytkowania terenów i obiektów budowlanych znajdujących się na takich obszarach. Z jednej strony są one podyktowane troską o bezpieczeństwo ludności, z drugiej obawą o spadek wartości gruntów.

W praktyce inżynierskiej zdarza się, że inspektorzy nadzoru budowlanego, na podstawie art. 68 Prawa budowlanego, wydają stały nakaz opuszczenia budynków mieszkalnych położonych w strefach buforowych osuwisk, bez wykonania rozpoznania geologiczno-inżynierskiego. Zagospodarowanie tych obszarów może być możliwe po wykonaniu szczegółowych badań geologiczno-inżynierskich, uzupełnionych o system monitoringu powierzchniowych

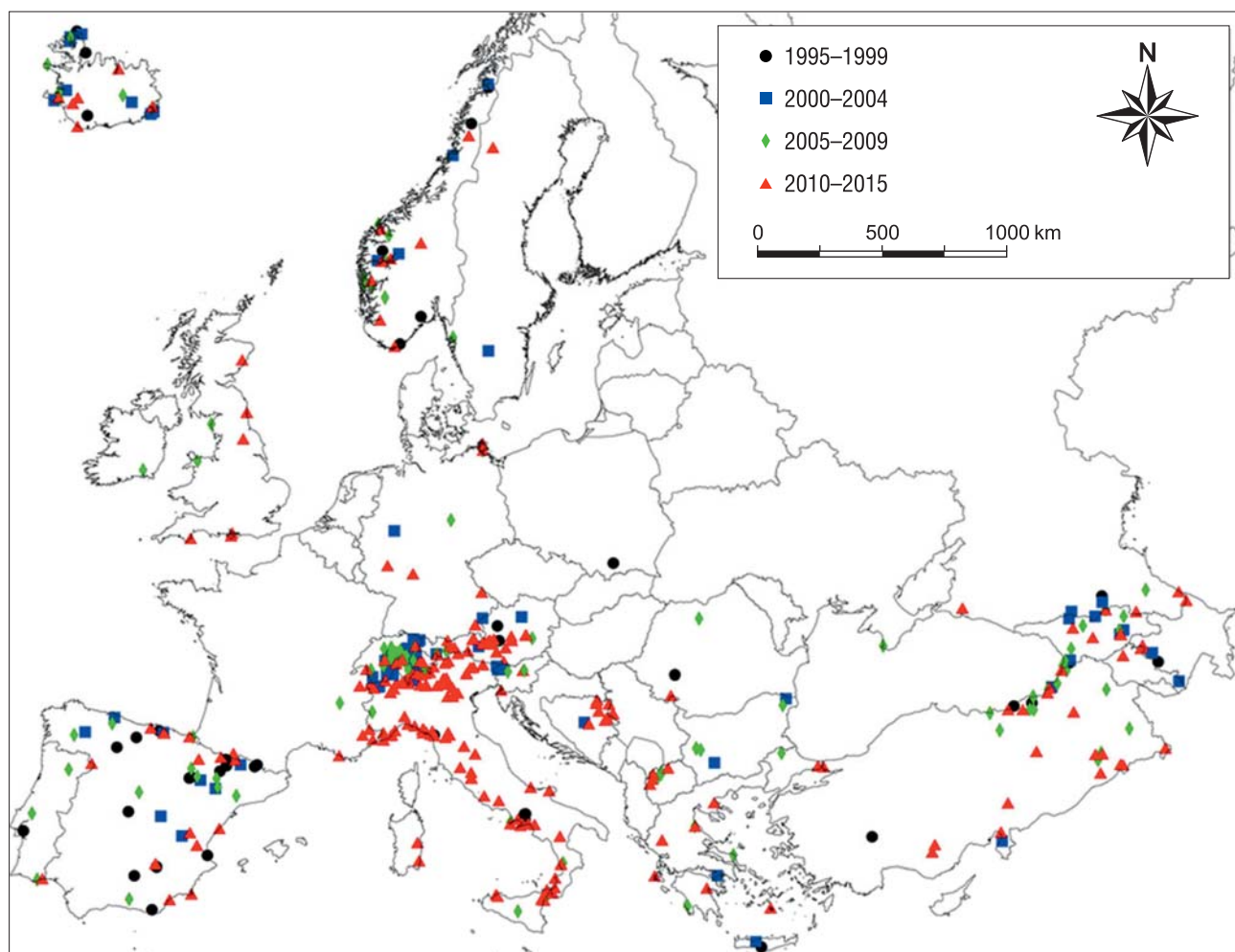
przemieszczeń gruntu. Monitoring powinien objąć również zabudowane tereny osuwiskowe.

Obecnie do monitorowania zagrożeń osuwiskowych najczęściej wykorzystuje się inklinometrię, czujniki ciśnienia porowego, czujniki odkształcenia, tensometry i piezometrię (Angeli i in., 2000; Cwiąkała i in., 2012; Stanisławski, 2013, 2015). Wgłębne rozpoznanie warunków grunto-wodnych jest uzupełniane badaniami geofizycznymi (Kaczmarek i in., 2014; Pilecki, Pilecka, 2016). Monitorowanie odkształceń powierzchniowych jest realizowane za pomocą geodezyjnego monitoringu permanentnego (z użyciem odbiorników GNSS, zrobotyzowanych tachimetrów i skanerów laserowych) oraz metodą naziemnej interferometrii radarowej, a także monitoringu lotniczego lub satelitarnego (Borkowski i in., 2011; Szafarczyk, 2012; Perski i in., 2014; Wojciechowski i in., 2015).

Pierwszy, zintegrowany system monitorowania osuwisk wykonał w Polsce Bednarczyk. Na system składa się 26 punktów pomiarowych leżących na terenie osuwiskowym w rejonie Gorlic, gdzie w utworach koluwium umieszczono czujniki ciśnienia porowego i temperatury, inklinometrię (2D i 3D) oraz czujniki poziomu zwierciadła wód gruntowych (Bednarczyk, 2011, 2015). Od kilku lat Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, w ramach realizacji projektu System Osłony Przeciwośuwiskowej (SOPO), monitoruje ok. 60 karpaczkich osuwisk, które zagrażają infrastrukturze (Nescieruk, Rączkowski, 2012). Obserwacje są prowadzone z użyciem inklinometrów, skanera laserowego, pomiarów GNSS oraz piezometrów. Wyniki tych obserwacji są porównywane z

¹ Instytut Geofizyki, Polska Akademia Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa; jmirek@igf.edu.pl.

² AGH w Krakowie – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; jstanisz@agh.edu.pl, rkaczm@op.pl, pawelcwi@agh.edu.pl.



Ryc. 1. Lokalizacja znaczących osuwisk w regionie europejskim, aktywnych w latach 1995–2014 (Haque i in., 2016)
Fig. 1. Landslides localization in selected countries during years 1995–2014 (Haque at al., 2016)

danymi meteorologicznymi (Wójcik, Wojciechowski, 2016). Pomimo niezaprzeczalnych zalet wymienionych systemów, podstawowym ograniczeniem ich szerokiego zastosowania jest wysoki koszt instalacji i obsługi urządzeń. W celu właściwej oceny zagrożenia obiektów budowlanych na wielu obszarach powinny być instalowane proste systemy monitorowania zagrożeń osuwiskowych, które uzupełniałyby dane pochodzące z głębokiego lub geodezyjnego monitoringu prowadzonego przez uprawnione do tego instytucje.

W artykule opisano założenia budowy i sposób instalacji prototypu systemu LandSMS oraz wstępne wyniki pomiarów.

BUDOWA SYSTEMU LandSMS I METODYKA PRAC

Prototyp systemu LandSMS (LandSlide Monitoring System) został wykonany w celu monitorowania powierzchniowych przemieszczeń gruntu na terenach zagrożonych ruchami masowymi. W trakcie prac projektowych starano się uzyskać:

- prostotę, skalowalność, niezawodność i niewielki koszt systemu,
- dokładność pomiaru przemieszczeń względnych gruntu (1 mm),
- funkcjonowanie systemu w architekturze klient–serwer,

- możliwość zapisu i analizy danych w terenie oraz przesyłania ich do serwera,
- możliwość włączenia alarmu i wysłania informacji za pomocą sieci GPRS lub Internetu,
- możliwość zdalnego dostępu do danych gromadzonych przez system.

Podstawowymi komponentami systemu LandSMS są (ryc. 2):

- element pomiarowy – ciągną linowe o długości 30 m. Jeden koniec cięgna jest przymocowany do stabilizowanego punktu pomiarowego znajdującego się na obszarze osuwiska; drugi – do rolki należącej do stacji monitorującej. Ciągno ma stały naciąg i jest umieszczone w pancerzu umożliwiającym swobodny przesuw.
- stacja monitorująca – składa się z rolki, do której jest przymocowany element pomiarowy, dwóch czujników odkształcenia, czujnika temperatury oraz dwóch mikrokontrolerów,
- serwer danych.

Pomiar wektora przemieszczenia punktu pomiarowego względem stacji monitorującej jest dokonywany za pomocą dwóch czujników:

- enkoder – rejestruje obroty rolki, przez którą przechodzi ciągną, i umożliwia pomiar zmiany długości bazy pomiarowej z rozdzielczością do 0,1 mm,
- czujnik ultradźwiękowy – jest umieszczony na ciągną i ulega przemieszczeniu w trakcie jego ruchu.



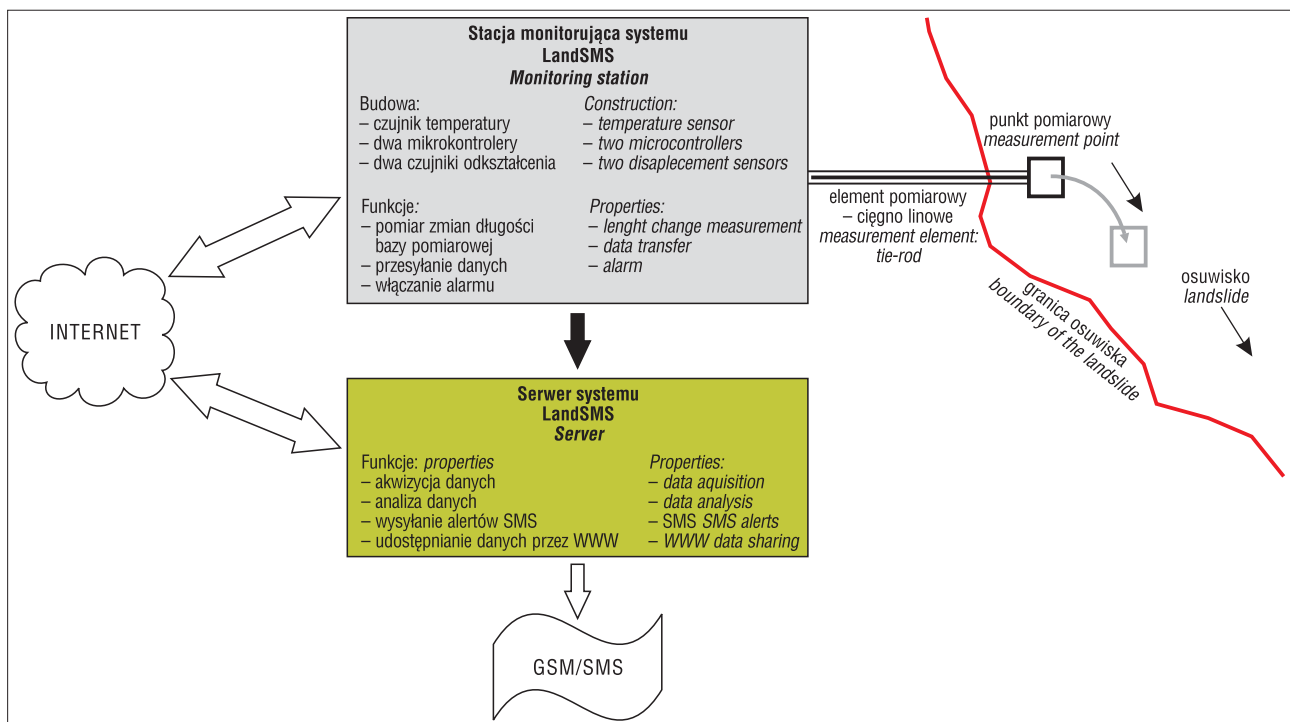
Ryc. 2. A – prototyp stacji monitorującej przemieszczenia gruntu LandSMS: 1 – enkoder, 2 – czujnik ultradźwiękowy, 3 – obciążenie o masie 5 kg utrzymujące stałą naciąg cięgna linowego, 4 – rejestrator; B – zastabilizowany punkt pomiarowy znajdujący się na osuwisku; C – rejestrator systemu LandSMS. Na wyświetlaczu są widoczne: data i godzina, T – temperatura, B – poziom napięcia baterii, L1 – długość odcinka pomiarowego od czujnika ultradźwiękowego do punktu referencyjnego (cm), L2 – względne zmiany długości bazy pomiarowej, mierzone enkoderem (cm), d1, d2 – zmiana wartości odpowiednio L1 i L2 w ciągu ostatniej godziny

Fig. 2. A – prototype of LandSMS monitoring station: 1 – encoder, 2 – ultrasonic sensor, 3 – mass (5 kg) keeping constant gut of tie-rod, 4 – recorder; B – measuring point located on landslide; C – LandSMS recorder. On display visible: time, T – temperature, B – battery voltage, L1 – value read by ultrasonic sensor, L2 – value read by encoder sensor, d1 and d2: changes of L1 and L2 during last hour

System LandSMS ma na celu ostrzeżenie jego użytkowników o wystąpieniu ruchów masowych na monitorowanym obszarze osuwiska. Metodyka pomiarów polega na ciągłym monitorowaniu zmian długości bazy pomiarowej wyznaczonej przez ustabilizowany punkt pomiarowy na osuwisku, do którego przytwierdzono na stałe jeden koniec cięgna, oraz punkt instalacji stacji monitorującej, gdzie

przeprowadzono drugi koniec cięgna, mający swobodę przemieszczania się. Przesunięcia na osuwisku powodują zmiany długości bazy pomiarowej i sprawiają, że przesuwa się także cięgno w urządzeniu pomiarowym stacji monitorującej. Pomiar zmian długości cięgna jest analizowany na bieżąco w stacji pomiarowej, a wyniki są przesyłane do serwera danych poprzez sieć Internet, gdzie także jest przeprowadzana analiza danych. W przypadku przekroczenia zadanych, maksymalnych wartości zmian długości bazy pomiarowej w czasie, włączany jest sygnał dźwiękowy w stacji i wysyłane jest ostrzeżenie SMS.

Zastosowanie dwóch niezależnych czujników umożliwia weryfikację wyników i wykrycie ewentualnej awarii.



Ryc. 3. Schemat systemu monitorowania osuwisk LandSMS
Fig. 3. Schema of landslides monitoring system LandSMS

System został wyposażony w wewnętrzny czujnik temperatury, dzięki czemu można uwzględniać odkształcenia elementu pomiarowego zachodzące pod wpływem temperatury. Stacja monitorująca jest wyposażona w wewnętrzny akumulator, który w przypadku ograniczenia zasilania zewnętrznego zapewni stacji kilkugodzinną pracę. Skalowalność systemu daje sposobność rozbudowy poprzez dołączanie kolejnych stacji monitorujących (ryc. 3).

Monitorowanie ośrodka odbywa się w trybie ciągłym, z określoną częstotliwością próbkowania, np. co 1 min. Możliwe jest podłączenie urządzenia dźwiękowego. Dane pomiarowe (odkształcenie, temperatura, stan pracy systemu) są zapisywane w pamięci wewnętrznej oraz przesyłane do bazy danych znajdującej się na serwerze. Algorytm pracy systemu LandSMS przedstawiono na rycinie 4. Dostęp do wyników jest możliwy z poziomu przeglądarki internetowej oraz wyświetlacza wbudowanego w rejestrator (ryc. 2C).

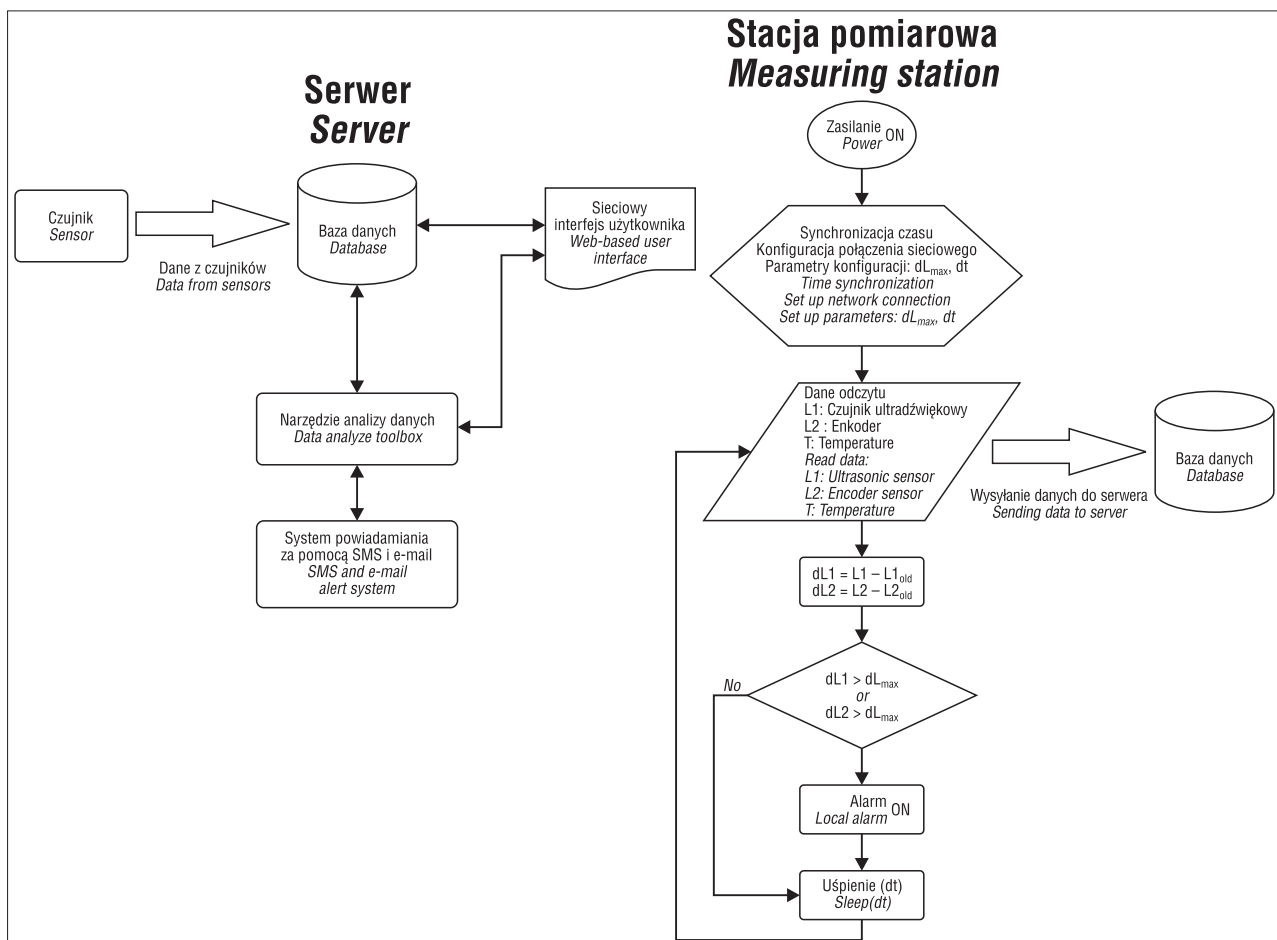
INSTALACJA SYSTEMU LandSMS NA POLIGONIE BADAWCZYM I WSTĘPNE WYNIKI BADAŃ

Poligon do testowania prototypu systemu LandSMS wyznaczono na obszarze osuwiska we wsi Kłodne w zachodnich Karpatach fliszowych (woj. małopolskie, gmina Limanowa). Osuwisko to, o powierzchni około 51 ha, powstało 1 czerwca 2010 r. po intensywnych i długotrwałych opadach atmosferycznych. Ruchy osuwiskowe

objęły południowe zbocze góry Chełm (793 m n.p.m.), zbudowane z utworów płaszczyny magurskiej. Koluwium zawiera materiał skalny warstw magurskich, podmagurskich i hieroglifowych (ryc. 5). Zniszczeniu uległy obiekty budowlane oraz infrastruktura. Obszar przylegający do osuwiska nadal jest zamieszkały. Budowę geologiczną regionu i wyniki dotychczasowych obserwacji osuwiska opisał pracownicy Oddziału Karpackiego PIG-PIB (Borkowski i in., 2011; Wójcik i in., 2011; Chowaniec i in., 2012; Perski i in., 2014).

Od kwietnia 2013 r. zespół pracowników AGH prowadzi monitoring geodezyjny w ramach sieci pomiarowej składającej się z 68 punktów kontrolowanych. Wyniki pomiarów umożliwiły wyznaczenie wartości i kierunków wektorów przesunięcia punktów. Obecnie osuwisko wykazuje względną stabilizację. Największe przemieszczenia koncentrowały się w rejonie skarpy głównej (Ćwiąkała i in., 2016).

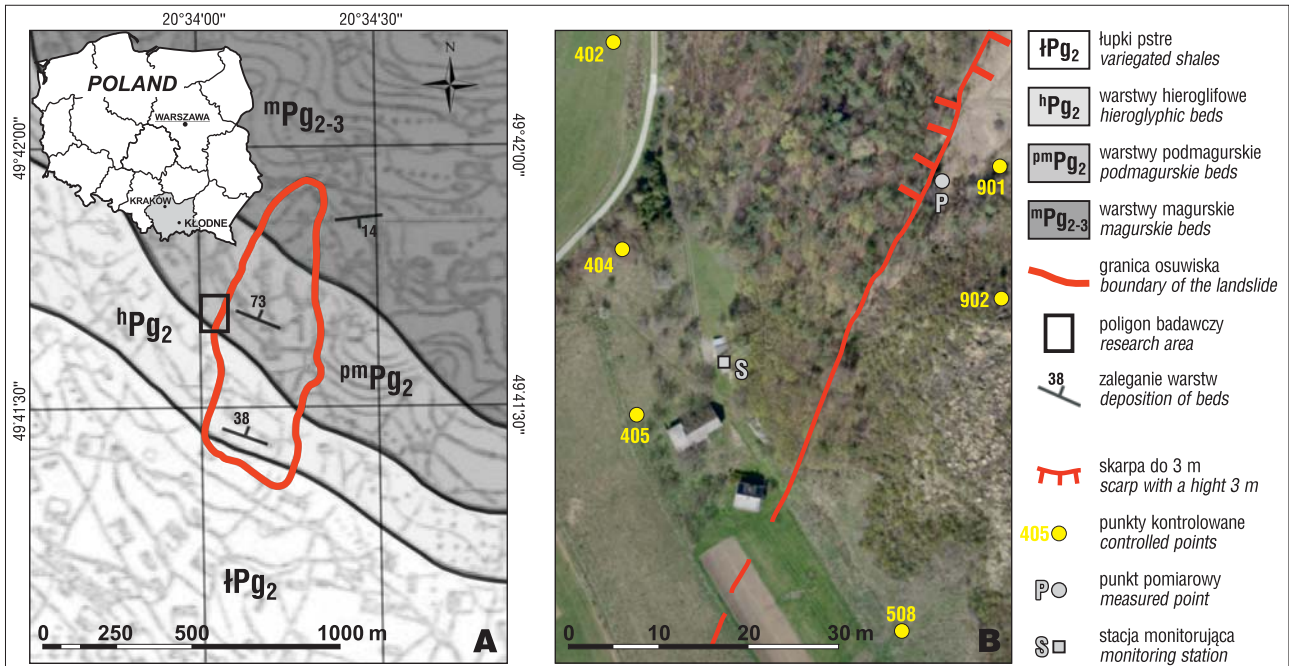
W połowie października 2016 r. zakończono budowę prototypu stacji monitorowania LandSMS. Sprawdzono zakres jej pracy i zweryfikowano założenia projektowe. Elementy systemu zainstalowano na poligonie badawczym usytuowanym w zachodniej części osuwiska w Kłodnem, obejmującym także obszar przylegający do osuwiska od zachodu wraz wyłączonymi z użytkowania obiektami budowlanymi. W pobliżu poligonu badawczego znajdują się punkty kontrolowane nr 404, 405, 508, 901 i 902, będące elementami geodezyjnego monitoringu osuwiska.



Ryc. 4. Algorytm pracy systemu LandSMS
Fig. 4. Algorithms of LandSMS system

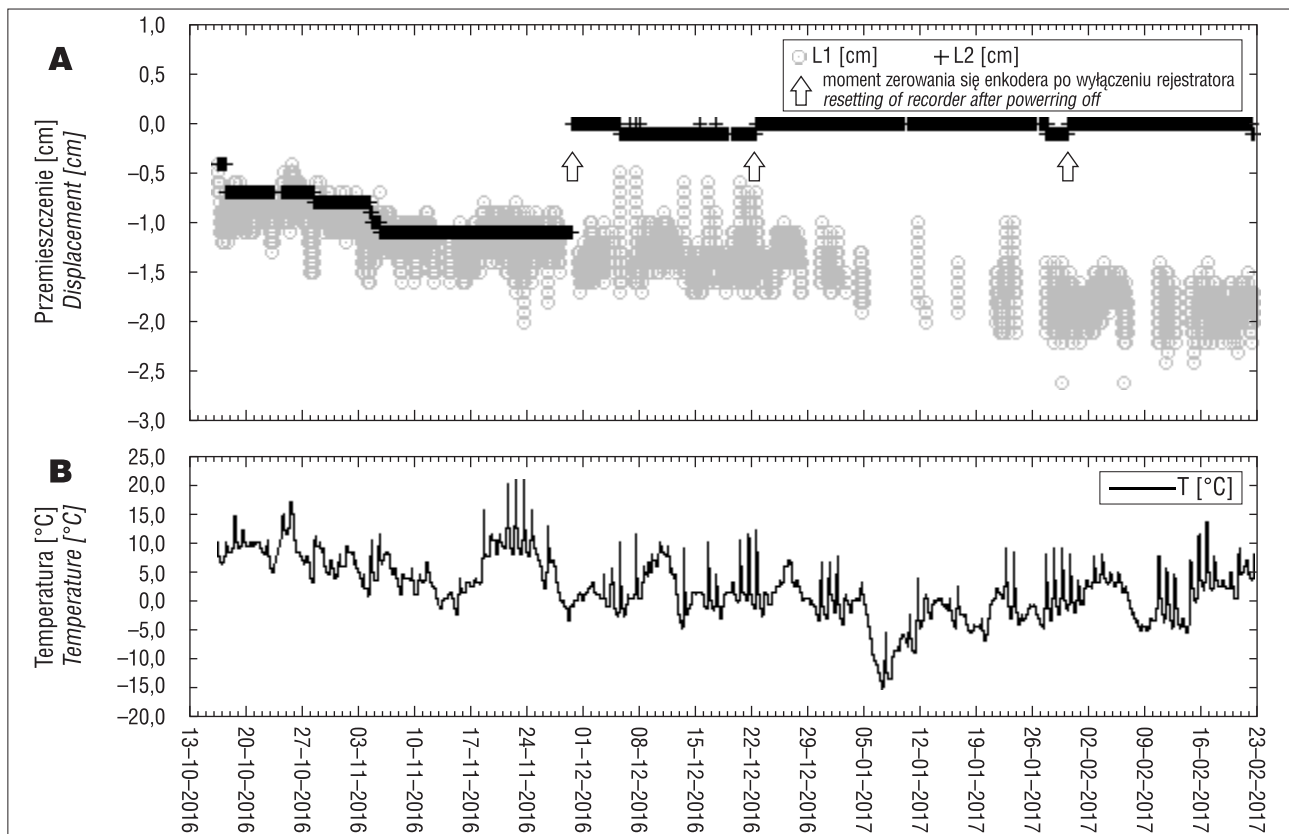
W koluwium zastabilizowano betonowy punkt pomiarowy o wymiarach 0,5 m dł. × 0,5 m szer. × 0,3 m wys., do którego przytwierdzono ściąg linowe znajdujące się 30 cm pod powierzchnią gruntu. W obiekcie zainstalowano stację monitorującą, która za pomocą routera Wi-Fi została połączona z serwerem.

W ciągu trzech tygodni zaobserwowano przemieszczenia o wartości do 12 mm. Były one związane z fazą stabilizacji punktu pomiarowego. Zarejestrowane przemieszczenia i zmiany temperatury gruntu w okresie od 16 października 2016 r. (moment instalacji systemu) do 22 lutego 2017 r. przedstawiono na rycinie 6.



Ryc. 5. Lokalizacja poligonu badawczego na osuwisku w Kłodnem (woj. małopolskie, gmina Limanowa)

Fig. 5. Localization of installation area, which is a part of Kłodne landslide (Little Poland, Limanowa commune)



Ryc. 6. Wykres przemieszczeń gruntu zarejestrowanych za pomocą czujnika ultradźwiękowego (L1) oraz enkodera (L2). Poniżej wykres zmian temperatury gruntu w trakcie badań

Fig. 6. Graph of displacements recorded by ultrasonic sensor (L1) and encoder sensor (L2). Graph with temperature changes during testing period

Wstępne efekty pracy prototypu systemu LandSMS wskazują na zbieżność wyników otrzymanych z dwóch czujników (enkodera i czujnika ultradźwiękowego). W okresie stabilizacji punktu pomiarowego (październik–grudzień 2016 r.) przemieszczenia wyniosły 12 mm. W późniejszym okresie (do marca 2017 r.) nie obserwowano kolejnych przemieszczeń gruntu. Trzykrotnie nastąpiło zerowanie endkodaera z powodu ograniczenia zasilania stacji pomiarowej.

W celu weryfikacji zakresu pracy systemu planuje się przeprowadzenie uzupełniających prac geodezyjnych oraz geologiczno-inżynierskich.

PODSUMOWANIE

Ruchy masowe znacząco utrudniają proces planowania przestrzennego. Na obszarach osuwiskowych skutecznym sposobem oceny zagrożenia ruchami masowymi ziemi jest monitorowanie przemieszczeń gruntu. Jednym z urządzeń stosowanych w tym celu może być system LandSMS, który w trybie ciągłym przekazuje informacje o wielkości i tempie powierzchniowych przemieszczeń gruntu. System taki może także z powodzeniem służyć do oceny zagrożenia ruchami masowymi ziemi i skuteczności działań podejmowanych w celu ograniczenia rozwoju osuwisk. Przy użyciu systemu LandSMS można będzie wskazać obiekty budowlane wymagające lepszego zabezpieczenia, może się on zatem przyczynić do zwiększenia ich bezpieczeństwa. Tezy te potwierdzają wyniki analizy ponad 50 osuwisk w powiecie krakowskim, które stwarzają zagrożenie dla zabudowań mieszkalnych lub infrastruktury (Kaczmarczyk i in., 2011; Kaczmarczyk, Olszak, 2014). Zagrożenia te można ograniczyć poprzez stały monitoring wybranych terenów osuwiskowych.

Autorzy składają serdeczne podziękowania prof. dr hab. inż. Beacie Hejmanowskiej, prof. PIG-PIB, dr. hab. Andrzejowi Gąsiewiczowi, redaktor Magdalenie Mizerskiej oraz anonimowemu Recenzentowi za cenne uwagi i sugestie dotyczące informacji zawartych w artykule. Praca została sfinansowana ze środków statutowych Instytutu Geofizyki PAN nr 3841/E-41/S/2016 oraz grantu dziekańskiego WGGiOŚ AGH nr 15.11.140.834.

LITERATURA

ANGELI M-G., PASUTO A., SILVANO S. 2000 – A critical review of landslide monitoring experiences. *Engin. Geol.*, 55: 133–147.
BEDNARCZYK Z. 2011 – Pierwszy w Polsce system wczesnego ostrzegania o zagrożeniu osuwiskowym w czasie rzeczywistym na przykładzie wybranych lokalizacji w Beskidzie Niskim. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 9–18.
BEDNARCZYK Z. 2015 – Metody monitoringu osuwisk i wczesnego ostrzegania on-line na przykładzie badań geologiczno-inżynierskich w Beskidzie Niskim i Średnim. *Prz. Geol.*, 63: 1220–1229.
BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., JÓZKÓW G., WÓJCIK A. 2011 – Landslides mapping in Roznow lake vicinity, Poland – using airborne laser scanning data. *Acta Geodyn. Geomater.*, 83 (163): 325–333.

CHOWANIEC J., WÓJCIK A. (red.) 2012 – Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas – przewodnik. Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Zespół Geologii.

ĆWIAKAŁA P., JAŚKOWSKI W., SUKTA O. 2012 – The concept of a measuring unit for monitoring the stability of areas at risk of landslides. *Infrastructure and Ecology of Rural Areas*. PAN Oddział w Krakowie. Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi, 1/IV: 103–112.

ĆWIAKAŁA P., STANISZ J., WRÓBEL A., KACZMARCZYK R., DRWAŁ P., GRABEK P., DAROCH M., PEKALA M., ŚWIĄTEK M., ZIERKIEWICZ M. 2016 – Wyznaczenie przemieszczeń powierzchniowych na osuwisku w Kłodnem (gmina Limanowa, południowa Polska). *Prz. Geol.*, 64: 122–130.

HAQUE U., BLUM P., DA SILVA P.F., ANDERSEN P., PILZ J., CHALOV S.R., MALET J-P., AUFLIC M.J., ANDRES N., POYIADJI LAMAS P.C., ZHANG W., PESHEVSKI I., PETURSSON H.G., KURT T., DOBREV N., GARCIA-DAVALILLO J.C., HALKIA M., FERRI S., GAPRINDASHVILI G., ENGSTROM J., KEELLINGS D. 2016 – Fatal landslides in Europe. *Landslides*, 13: 1545–1554.

KACZMARCZYK R., OLSZAK J. 2014 – Inwentaryzacja i monitoring wybranych osuwisk powiatu krakowskiego. AGH Kraków.

KACZMARCZYK R., TCHÓRZEWSKA S., WOŹNIAK H. 2011 – Charakterystyka wybranych osuwisk z terenu południowej Polski, uaktywnionych po okresie intensywnych opadów w 2010 roku. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 65–74.

KACZMAREK Ł., MIESZKOWSKI R., KOŁPACZYŃSKI M., PACANOWSKI G. 2014 – Application of electrical resistivity tomography (ERT) in the investigation of quaternary landslide zones, based on the selected regions of Płock slope. *Stud. Quatern.*, 31 (2): 101–107.

NEŚCIERUK P., RĄCZKOWSKI W. 2012 – Monitoring wglębny osuwisk karpaccich. [W:] *Geologia jedna?! II Kongres Geologiczny*, Warszawa, 17–19 września 2012 r. Wyd. Geol. UW, PTG, Warszawa: 63–67.

PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A., BORKOWSKI A. 2014 – Monitoring of Landslide Dynamics with LIDAR, SAR Interferometry and Photogrammetry Case Study of Kłodne Landslide, Southern Poland. *Proceedings of World Landslide Forum 3, 2–6 June 2014, Beijing, 4: Discussion Session: 200–204.*

PILECKI Z., PILECKA E. 2016 – Podstawowe zasady stosowania metod geofizycznych w badaniu osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami. *Z. Nauk. IGSMiE PAN*, 92: 131–140.

ROZPORZĄDZENIE Ministra Środowiska z dnia 20 czerwca 2007 r. w sprawie informacji dotyczących ruchów masowych ziemi, *Dz. U. z 2007 r.*, nr 121 poz. 840.

STANISZ J. 2013 – Możliwości rozpoznania zagrożenia osuwiskowego na podstawie obserwacji zmian ciśnienia porowego w ośrodku geologicznym. *Z. Nauk.-Tech. SITK RP, Oddział w Krakowie*, 3 (102): 1–8.

STANISZ J. 2015 – Czujniki do pomiaru ciśnienia porowego dla potrzeb rozpoznania położenia powierzchni poślizgu osuwiska. *Z. Nauk. IGSMiE PAN*, 89: 77–92.

SZAFARCZYK A. 2012 – Możliwości wykorzystania naziemnej interferometrii radarowej w monitoringu osuwisk. *Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich*, 2: 29–38.

USTAWA z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane. *Dz.U.* 1994 nr 89 poz. 414.

WOJCIECHOWSKI T., PERSKI Z., WÓJCIK A. 2015 – Wykorzystanie wysokościowych danych laserowych w badaniu osuwisk. *Ogólnopolska konferencja O!suwisko*, 19–22 maja 2015, Wieliczka: 79–81.

WÓJCIK, WOJCIECHOWSKI 2016 – Osuwiska jako jeden z ważniejszych elementów zagrożeń geologicznych w Polsce. *Prz. Geol.*, 64 (9): 701–709.

WÓJCIK A., PERSKI Z., BORKOWSKI A., WOJCIECHOWSKI T. 2011 – Zastosowanie teledetekcji lotniczej i satelitarnej do badania dynamiki czynnych osuwisk w 2010 r. na przykładzie osuwiska w Kłodnem koło Limanowej. *Polski Kongres Drogowy*. 30.03–1.04.2011, Zakopane: 111–120.