

# Monitoring fotogrametryczny z wykorzystaniem bezzałogowego statku powietrznego na przykładzie osuwiska zlokalizowanego na zboczach poeksploatacyjnego zbiornika wodnego w KWB Adamów

Krzysztof Karwacki<sup>1</sup>



K. Karwacki

**Photogrammetric monitoring with the use of an unmanned aerial vehicle – case study of a landslide located on the slopes of a post-mining water reservoir in the KWB Adamów Mine.** Prz. Geol., 70: 671–681; doi: 10.7306/2022.21

*Abstract.* The article presents the results of monitoring of landslides related to opencast mining. The landslides formed on the slopes of an artificial water reservoir in the Adamów open-cast lignite mine. The photogrammetric method was used for monitoring. The study of landslide activity was performed on the basis of six photogrammetric surveys made with the DJI Phantom 4 Advanced UAV. Changes in the landslide extent and vertical displacements were determined in five measurement periods. For four periods, differential digital terrain models were made and the volume of displaced earth masses was calculated. The future extent of the landslide was determined on the basis of cracks visible in high-resolution optical photos. The research has shown that UAVs equipped with an optical camera are very useful in monitoring the stability of slopes of post-mining water reservoirs. The applied method provided detailed data on the size of displacements without compromising on safety of people involved in field surveys.

**Keywords:** landslide monitoring, UAV photogrammetry, opencast lignite mine

Eksploatacja złóż węgla brunatnego metodą odkrywkową prowadzi do silnego przekształcenia środowiska. W celu wydobycia złoża zdejmują się warstwy przykrywające surowiec zwane nadkładem i usypuje się z nich hałdy zwane zwałowiskami zewnętrznymi lub wewnętrznymi. Złóża znajdują się na głębokości od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, co sprawia, że wyrobisko może mieć głębokość nawet kilkaset metrów. Budowa kopalni odkrywkowej nie byłaby możliwa bez uprzedniego odwodnienia złoża, co powoduje zaburzenie warunków hydrogeologicznych i powstawanie rozległych lejów depresji. Tak duża ingerencja w środowisko (powstawanie wysokich skarp, odsłonięcie utworów podatnych na osuwanie i zaburzenia stosunków wodnych) powoduje, że zagrożenie wystąpieniem procesów osuwiskowych wzrasta. Osuwiska związane z odkrywkową eksploatacją złóż kopalni mogą występować na różnych etapach funkcjonowania zakładu górniczego. Liczne ruchy masowe są obserwowane na skarpach zwałowisk zewnętrznych (Milkowski, Nowak, 2009; Okupny, 2009), na skarpach czynnych odkrywek (Milkowski i in., 2008; Mirek, Biały, 2009), na zwałowiskach wewnętrznych (Bednarczyk, 2019), a także na etapie rekultywacji wyrobisk, głównie w kierunku wodnym (Flisiak i in., 2014; Szmulc, Burda, 2016; Frankowski i in., 2018, 2020; Piechota i in., 2021). Niebezpieczeństwo, jakie stwarzają osuwiska dla zdrowia i życia ludzi oraz infrastruktury zakładu górniczego, powoduje, że podejmowane są czynności zapobiegające rozwojowi ruchów masowych. Skarpy wyrobisk i hałd wykonuje się w systemie półkowym o zdefiniowanej wcześniej wysokości i nachyleniu, natomiast w najbardziej zagrożonych rejonach prowadzi się monitoring instrumentalny (Karsznia i in., 2010; Bednarczyk, 2019). Monitoring skarp w zakładach górniczych prowadzi się różnymi metodami. Coraz częściej oprócz punktowych pomiarów GNSS (*Global Navigation Satellite System*) stosuje się skaning laserowy,

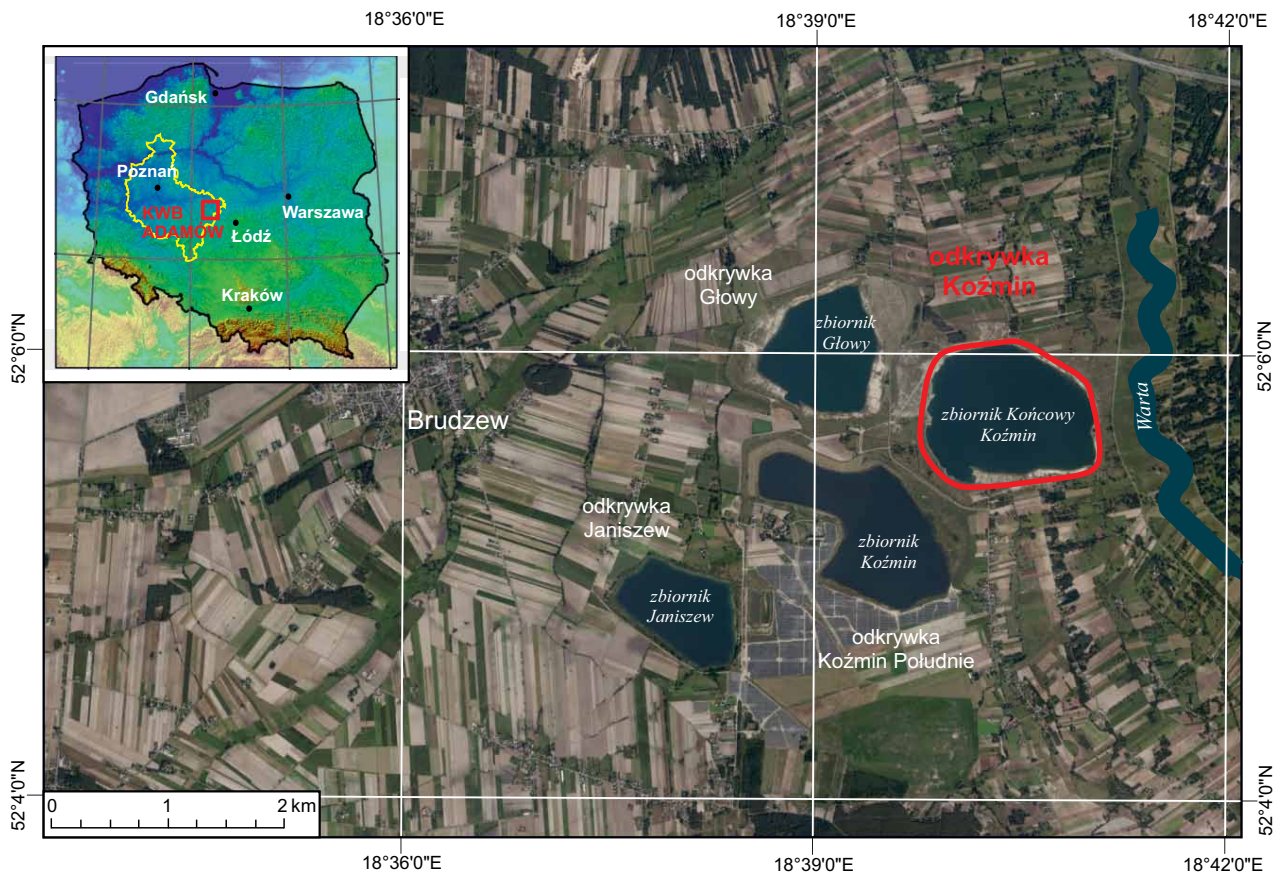
który dostarcza dane dla całego badanego obszaru w postaci numerycznego modelu terenu – NMT (Maciaszek, Cwiąkała, 2010). Inną metodą, która umożliwia pozyskanie chmury punktów, a w końcu NMT, jest fotogrametria cyfrowa. Metoda ta jest stosowana w górnictwie, głównie w celu inwentaryzacji eksploatowanych złóż (Gawin, 2004, 2009; Sołowczuk, 2016). Znajduje także zastosowanie w odtwarzaniu etapów rozwoju osuwisk (Kamiński, 2011; Karwacki, 2016). Rozwój technologii bezzałogowych statków powietrznych (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), oraz aplikacji przetwarzających zdjęcia optyczne z kamer amatorskich sprawił, że znacznie wzrosło wykorzystanie urządzeń typu UAV w dokumentowaniu geologicznym (Markiewicz i in., 2019; Piechota, Sobótka, 2021), oraz w monitoringu przemieszczeń na osuwiskach (Kowalski i in., 2018; Karwacki, 2019).

Niniejszy artykuł jest poświęcony monitoringowi fotogrametrycznemu aktywności osuwiska powstałego w końcowej fazie działalności zakładu górniczego wydobywającego kopaliny systemem odkrywkowym za pomocą bezzałogowego statku powietrznego UAV.

## POŁOŻENIE I BUDOWA GEOLOGICZNA OBSZARU BADAŃ

Obszarem badań jest, objęta procesami osuwiskowymi, zachodnia skarpa odkrywki Koźmin w Kopalni Węgla Brunatnego (KWB) Adamów zlokalizowanej na obszarze gminy Brudzew we wschodniej Wielkopolsce (ryc. 1). Obszar ten jest położony w obrębie mezoregionu Kotliny Kolskiej będącej częścią makroregionu Niziny Południowo-wielkopolskiej i podprowincji Nizin Środkowopolskich (Solon i in., 2018). Odkrywka Koźmin to ostatnia z czterech odkrywek (Janiszew, Koźmin Południe, Głowy, Koźmin), eksploatujących pokłady węgla brunatnego ze złoża Koźmin. Jest jednocześnie najbardziej wysuniętą na

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00–975 Warszawa; [krzysztof.karwacki@pgi.gov.pl](mailto:krzysztof.karwacki@pgi.gov.pl); ORCID: 0000-0002-6999-7780



**Ryc. 1.** Położenie obszaru badań (rejon odkrywki Kozmin)  
**Fig. 1.** Location of the study area (Kozmin opencast region)

wschód odkrywką KWB *Adamów*, a jej krawędź znajdowała się w odległości ok. 330 m od koryta rzeki Warty. Obecnie wyrobiska są przekształcane w zbiorniki wodne: zbiornik Kozmin, zbiornik Głowy i zbiornik Końcowy Kozmin, natomiast odkrywkę Janiszew w wyniku rekultywacji przekształcono w zbiornik wodny już w 2013 r.

Procesy osuwiskowe na dużą skalę zachodziły tylko w południowej i zachodniej części zbiornika Końcowego Kozmin oraz w niewielkim stopniu na południowej skarpie zbiornika Głowy (Piechota i in., 2021). Niewątpliwie wpływ na to miało kilka czynników, takich jak: budowa geologiczna zboczy i ich nachylenie, głębokość zbiorników oraz skomplikowane warunki hydrogeologiczne z dużą, lokalną zmiennością. Zbiornik Kozmin jest najpłytszym zbiornikiem (11,5 m) z łagodnie nachylonymi zboczami (1–7°), co niewątpliwie wpłynęło na brak procesów osuwiskowych.

Zbocza Zbiornika Kozmin Końcowy są zbudowane z gruntów pochodzących z nadkładu odkrywki Kozmin.

Nadkład złoża węgla brunatnego w odkrywce Kozmin jest zbudowany z ilów plioceńskich zawierających soczewki piasków oraz czwartorzędowych glin zwałowych i piasków drobno- i średnioziarnistych (Tomaszewski i in., 2016).

## METODY PRAC

Do monitorowania powierzchni osuwisk zastosowano metodę fotogrametrii niskiego pułapu, która umożliwia pomiar kształtu i rozmiarów obiektów na zdjęciach

optycznych pozyskanych z bezałogowego statku powietrznego. Zdjęcia wykonano urządzeniem DJI Phantom 4 Advance, wyposażonym w kamerę FC6310R z obiektywem o ogniskowej 8,8 mm (odpowiednik 24 mm dla formatu 35 mm) i matrycą wielkości 1 cala. Nad zachodnim zboczem zbiornika Końcowego Kozmin wykonano sześć nalołów fotogrametrycznych, podczas których pozyskano zdjęcia z pikselem terenowym o rozmiarze nie większym niż 4 cm (tab. 1). Dane z wszystkich nalołów opracowano z wykorzystaniem naziemnej osnowy sygnalizowanej, co umożliwiło wpasowanie modelu w układ terenowy (PL–2000/6) z dokładnością nie mniejszą niż 17 cm sytuacyjnie ( $d_{xy}$ ) i 9 cm wysokościowo ( $d_h$ ) (tab. 1). Przy pomocy metody fotogrametrycznej z cyfrowych zdjęć optycznych

**Tab. 1.** Dokładność nalołów fotogrametrycznych  
**Table 1.** Accuracy of photogrammetric missions

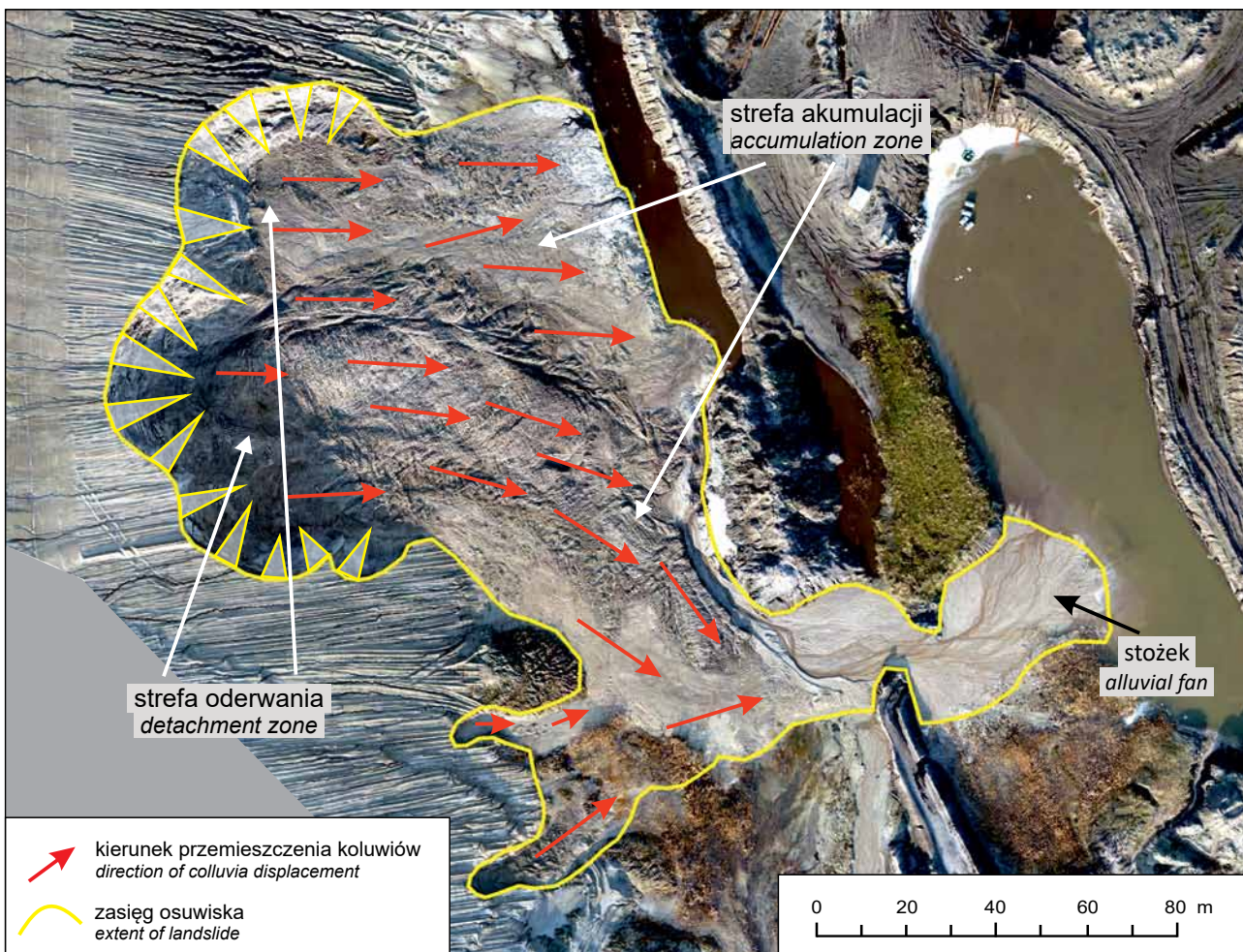
Data wykonania zdjęć <i>Date of flight</i>	Okres pomiarowy <i>Measuring period</i>	Dokładność <i>Accuracy</i>		Rozmiar piksela terenowego [m] <i>Ground Sample Distance [m]</i>	
		$d_{xy}$ [m]	$d_h$ [m]		
27.12.2017	I	–	0,17	0,04	0,02
04.03.2018		0,06	0,05	0,02	
30.03.2018	III	–	0,04	0,04	0,02
05.05.2018		0,02	0,01	0,02	
27.05.2018	V	–	0,13	0,09	0,04
09.11.2019		–	0,03	0,05	0,04

otrzymano NMT oraz ortomozaiki, które wykorzystano do analizy zmiany zasięgu osuwiska, przemieszczeń pionowych oraz obliczenia objętości przemieszczonych koluwiów. Wyznaczenie kierunku zsuwu było możliwe na podstawie geometrii elementów rzeźby wewnętrznej, takich jak progi i wały akumulacyjne. Brak szczegółów terenowych jednoznacznie identyfikowalnych na ortomozaikach pochodzących z różnych nalołów uniemożliwił określenie wielkości przemieszczeń poziomych na powierzchni osuwiska.

### CHARAKTERYSTYKA OSUWISKA

Osuwisko Koźmin powstało jesienią 2017 r. na zachodniej skarpie budowanego zbiornika wodnego Koźmin Końcowy. W chwili pierwszej rejestracji (grudzień 2017 r.) osuwisko składało się z trzech wyraźnie wykształconych skarp osuwiskowych o maksymalnej wysokości 13 m (ryc. 2). Na koluwia osuwiskowe składały się wymieszane ły, gliny i piaski. W dolnej części osuwiska koluwia były mocno nawodnione i w wyniku procesów grawitacyjnych zostały przetransportowane dalej i złożone w postaci stożka

w zbiorniku wodnym wypełniającym wyrobisko. Osuwisko w początkowej fazie rozwoju, czyli w grudniu 2017 r., zajmowało powierzchnię 1,7 ha i miało 172 m długości i ok. 112 m szerokości (tab. 2). U podnóża północnej części skarpy głównej ruch mas ziemnych miał stały azymut o wartości ok.  $90^\circ$ . Z centralnej i południowej części skarpy głównej masy ziemne początkowo przemieszczały się również równoleżnikowo (ok.  $90^\circ$ ) po czym były skierowane na południe, przyjmując azymut  $135\text{--}150^\circ$ . Koluwia osuwiska zostały porozcinane erozyjnie przez wody wypływające z podnóża skarpy głównej oraz wody wypływające ze zbiornika znajdującego się poniżej czoła w północnej części osuwiska. Dolna część jezora w części południowej była rozmywana przez wody wypływające ze strefy skarpy głównej. Materiał koluwalny z dwóch skrajnych południowych nisz przemieszczał się w azymucie od  $38$  do  $70^\circ$  (ryc. 2), a następnie w wyniku rozmycia również został odłożony w zbiorniku na dnie wyrobiska. Kolejne ruchy osuwiska stwierdzono w trakcie napełniania zbiornika (od czerwca 2018 r.), jednak ustalenie dolnego zasięgu i odtworzenie całej powierzchni osuwiska w tym okresie nie było możliwe.



Ryc. 2. Zasięg osuwiska w Koźminie w 2017 r.  
Fig. 2. Extent of the landslide in Koźmin in 2017

**Tab. 2.** Parametry osuwiska w Koźminie na podstawie nalotów fotogrametrycznych  
**Table 2.** Parameters of the landslide in Koźmin on the basis of photogrammetric missions

Lp.	Data wykonania zdjęć Date of flight	Powierzchnia osuwiska [ha] Landslide area [ha]	Długość osuwiska [m] Landslide length [m]	Szerokość osuwiska [m] Landslide width [m]	Zmiana objętości mas ziemnych na osuwisku (ubytek/przyrost) [m <sup>3</sup> ] Change in the volume of earth masses on a landslide (loss / increase) [m <sup>3</sup> ]
1	27.12.2017	1,74	172	112	4380/4224
2	04.03.2018	1,88	185	125	8228/10762
3	30.03.2018	2,25	196	128	
4	05.05.2018	2,50	200	135	91542/117407
5	27.05.2018	7,82	315	390	
6	09.11.2019	–	–	970	–

## ROZWÓJ OSUWISKA

Osuwisko w Koźminie wykazywało aktywność w całym okresie pomiarowym. Do wyraźnej zmiany w zasięgu osuwiska doszło już między pierwszym a drugim nalotem (ryc. 3). Krawędź osuwiska przesunęła się o 13 m w górę stoku, co spowodowało obniżenie powierzchni terenu o 6,4 m, natomiast osunięte masy ziemne zostały zdeponowane w strefie akumulacji, powodując podniesienie powierzchni terenu o 3,5 m. W tej części osuwiska azymut ruchu koluwiów początkowo wynosił ok. 50°, po czym zmienił się na 120–130°. Część koluwiów została przetransportowana w kierunku centralnej części osuwiska. W dolnym fragmencie czoło osuwiska było sukcesywnie rozmywane przez wody powierzchniowe. Powierzchnia osuwiska powiększyła się o 14 arów i wynosiła 1,9 ha (tab. 2).

W części centralnej i północnej strefy oderwania stwierdzono obszary z niewielkimi ubytkami, z których materiał został zakumulowany poniżej. Ubytek masy gruntów wyniósł 4,4 tys. m<sup>3</sup> na powierzchni 0,8 ha, a przyrost masy w dolnej części wyniósł 4,2 tys. m<sup>3</sup> na powierzchni 1,1 ha. Różnica w objętości wynika z wypłukania i zdeponowania części koluwiów w zbiorniku wodnym na dnie wyrobiska.

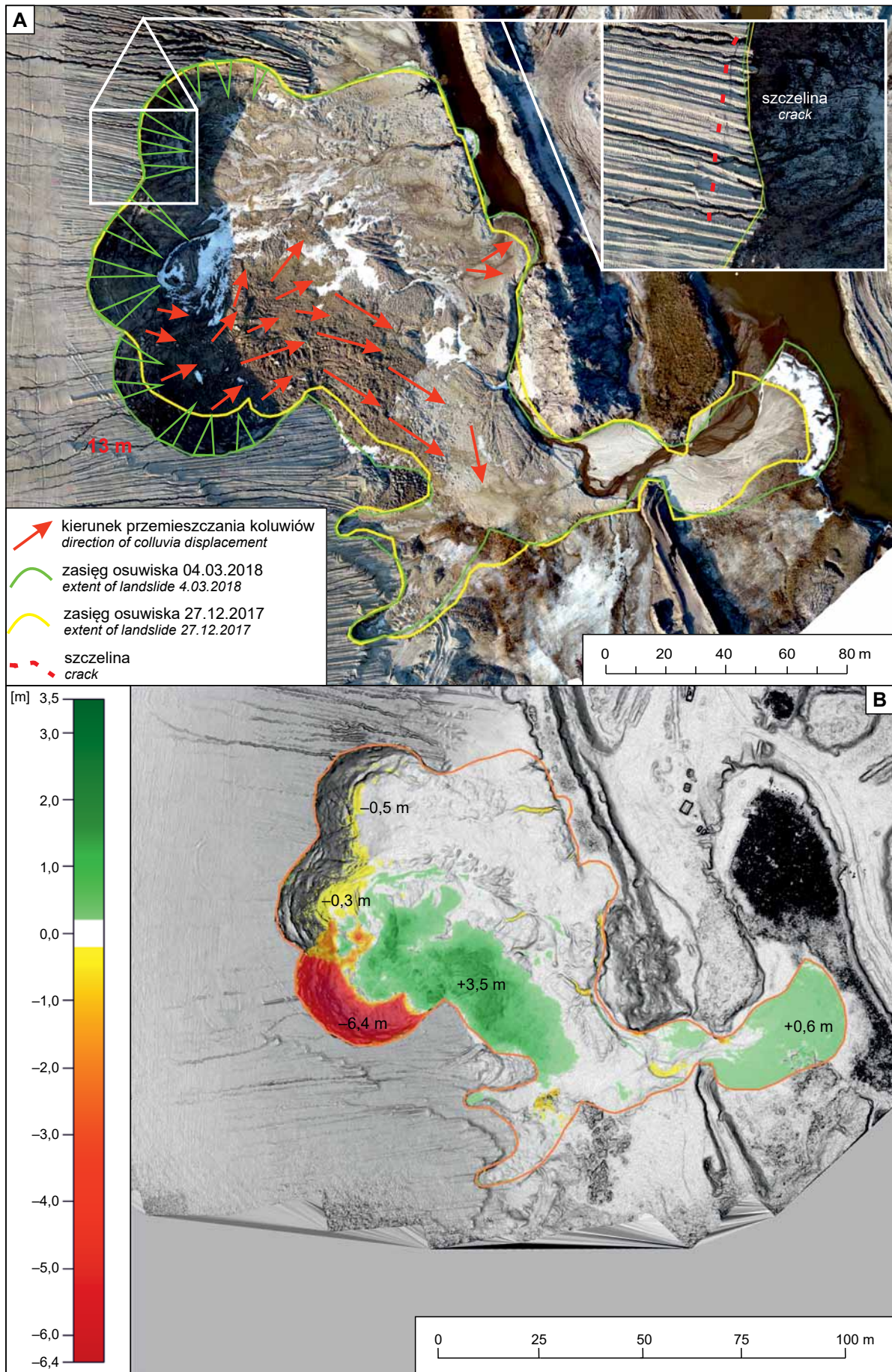
Największa zmiana między drugim i trzecim nalotem dotyczy części południowej, gdzie pojawiła się nowa strefa aktywności osuwiska (ryc. 4). W tej strefie doszło do połączenia dwóch niewielkich skarpy głównych, co spowodowało przesunięcie granicy osuwiska o 13 m w górę stoku (ryc. 4A). Powierzchnia osuwiska powiększyła się o 37 arów i wynosiła 2,2 ha (tab. 2). Niewielka zmiana w zasięgu, ale istotna na modelu różnicowym jest widoczna w północnej części skarpy głównej, gdzie krawędź osuwiska obecnie znajduje się w miejscu zaobserwowania szczeliny podczas drugiego nalotu (ryc. 4B). W tym fragmencie doszło do ubytku w profilu pionowym o wartości 3,5 m, a akumulacja spowodowała podniesienie terenu o ponad 2,5 m (ryc. 4). Było to spowodowane uruchomieniem 463 m<sup>3</sup> mas ziemnych. Powyżej skarpy głównej zaobserwowano szczeliny równoległe do krawędzi skarpy głównej (ryc. 4A).

Duże zmiany zaszły między trzecim i czwartym nalotem, kiedy doszło do uruchomienia skarpy głównej osuwiska, co spowodowało przesunięcie krawędzi osuwiska o 19 m w górę stoku (ryc. 5A). Osuwisko zwiększyło swoją powierzchnię o 25 arów i zajmowało wówczas 2,5 ha.

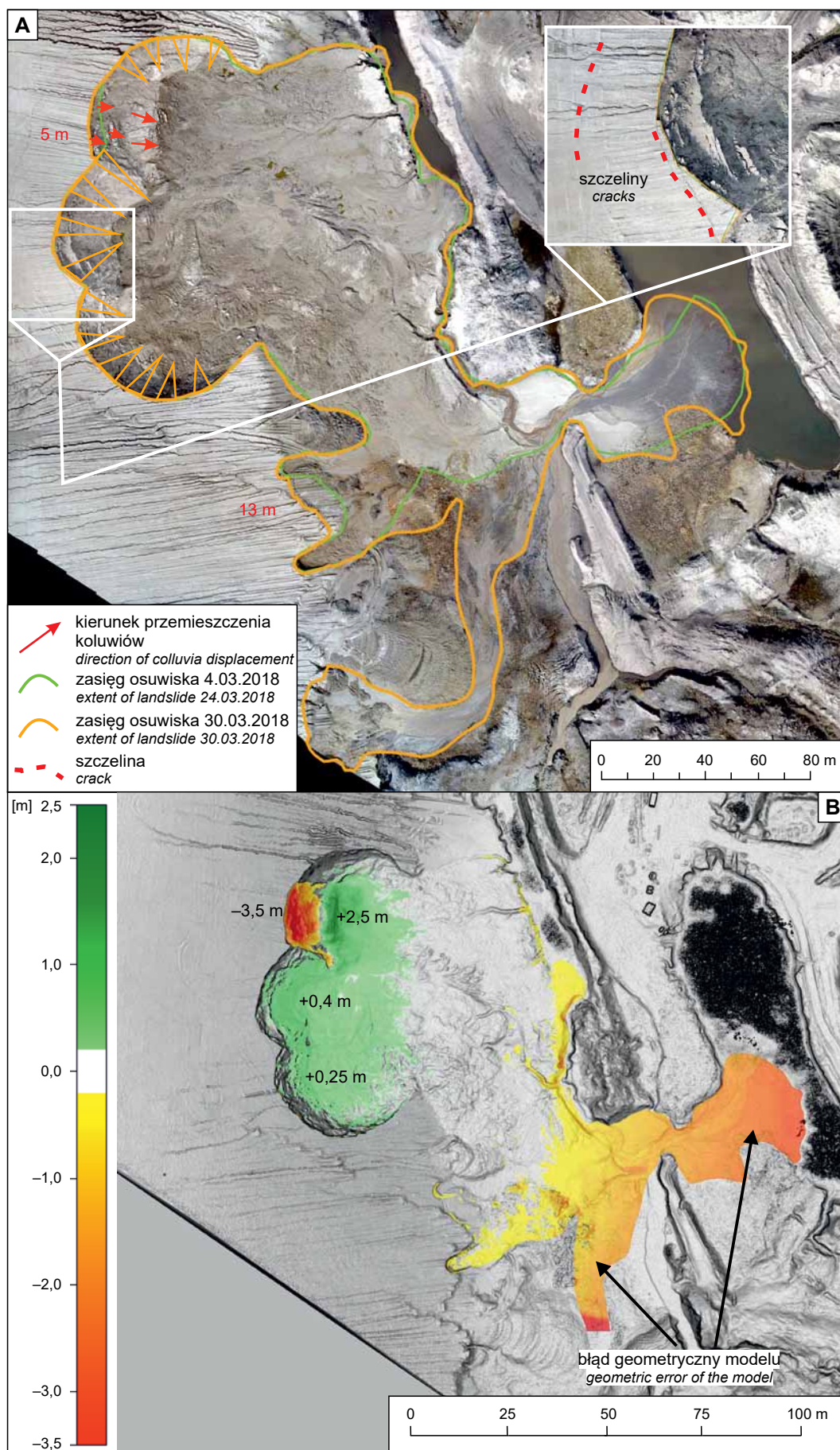
W wyniku procesów grawitacyjnych ubyło 9,9 m mas ziemnych w profilu pionowym (ryc. 5B). Przemieszczone masy ziemne spowodowały podniesienie terenu w strefie akumulacji od 0,6 m w strefie czoła do 1,9 m w części centralnej osuwiska. Duża dynamika ruchu spowodowała wysunięcie jezora osuwiskowego na odległość 9 m, powodując wypełnienie zbiornika wodnego u podnóża osuwiska utworami koluwalnymi (ryc. 5A). Południowa część osuwiska również wykazała aktywność, co było widoczne w propagacji skarpy głównej, która przesunęła się o 21 m oraz o 8 m w skrajnie południowej niszy osuwiskowej, powodując obniżenie terenu o maksymalnie 3,3 m. W centralnej części osuwiska azymut przemieszczeń wynosił ok. 60°, po czym zmieniał się na ok. 127°. Sukcesywnie powiększał się wachlarz stożka, nadbudowywany osadami wypłukanymi z osuwiska. W strefie skarpy głównej ubytek mas ziemnych wyniósł 8,2 tys. m<sup>3</sup> na powierzchni 0,5 ha, a przyrost mas w strefie jezora osuwiskowego wyniósł 10,8 tys. m<sup>3</sup> na powierzchni 1,9 ha. Na ortomozaice z czwartego nalotu zaobserwowano szczeliny powyżej skarpy głównej oraz powyżej stref aktywnych w południowej części.

Największe zmiany zaszły między czwartym i piątym nalotem, w wyniku których krawędź skarpy głównej przesunęła się o 110 m w górę zbocza, a wysokość jej wzrosła do 21 m (ryc. 6A). Powierzchnia osuwiska zwiększyła się trzykrotnie i zajmowała 7,8 ha. Duży udział w przemieszczaniu koluwiów miał również proces erozji powierzchniowej i rozmywania, w efekcie którego materiał osuwiskowy został przetransportowany na odległość 130 m poniżej czoła. Przemieszczenia poziome były na tyle duże, że uniemożliwiły identyfikację punktów na powierzchni w celu wyznaczenia wektorów przemieszczeń. Układ form rzeźby wewnętrznej umożliwił wyznaczenie kierunków przemieszczenia mas ziemnych, które w zależności od ekspozycji stoku oraz dynamiki zsuwu są zmienne (ryc. 6A).

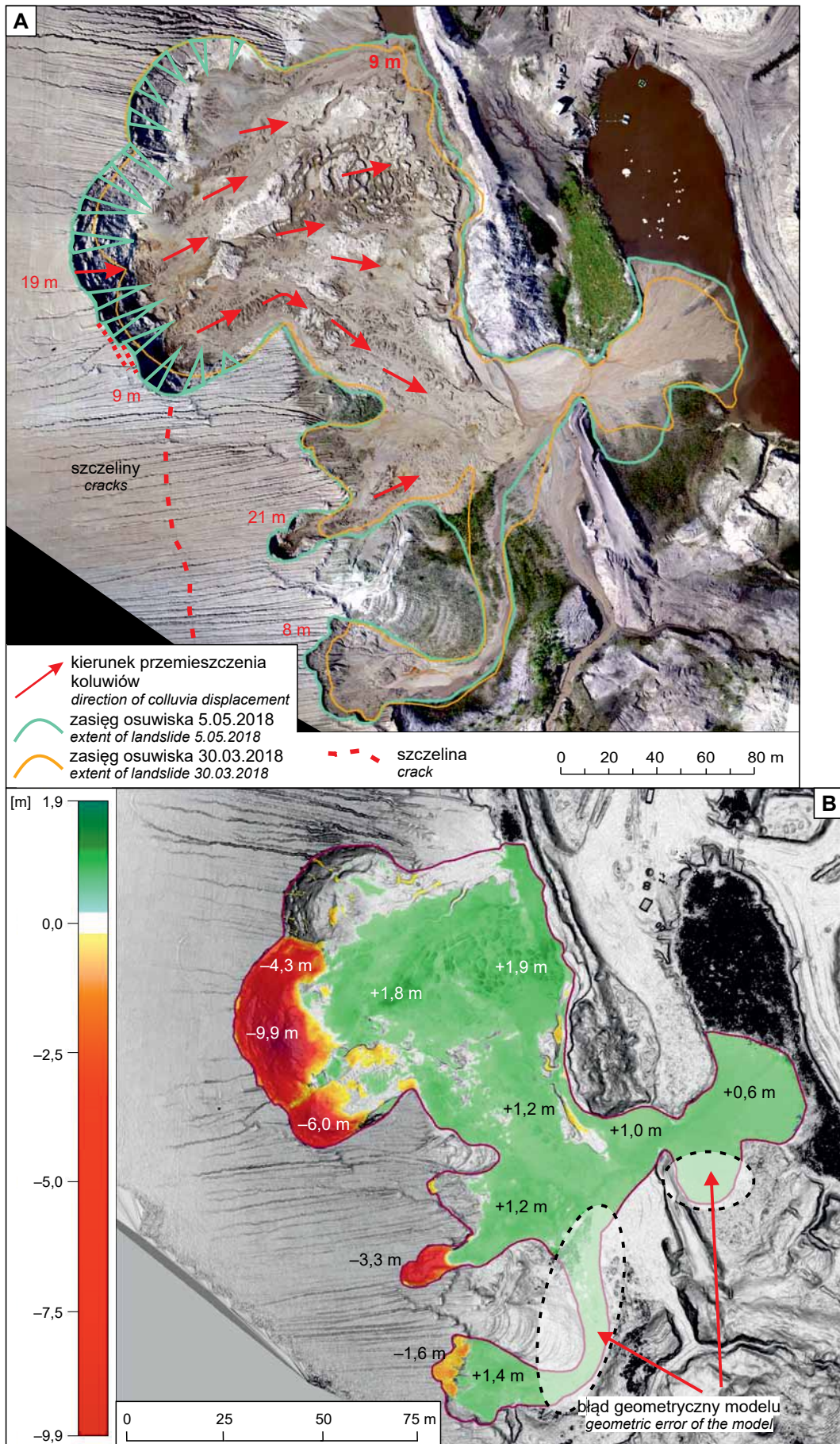
Model różnicowy (ryc. 6B) nie oddaje w pełni skali przemieszczeń jakie zaszły w tym okresie ze względu na mniejszy zasięg przestrzenny nalotu czwartego. W tym czasie doszło do dużych zmian pionowych na obszarze całego osuwiska. W górnej części osuwiska teren obniżył się od 13,5 do 19,0 m, a w strefie jezora teren podniósł się maksymalnie o 9 m (ryc. 6B). Zmierzona objętość przemieszczeń pionowych to odpowiednio 91,5 tys. m<sup>3</sup> ubytku na powierzchni 2,0 ha i 117,4 tys. m<sup>3</sup> przyrostu mas ziemnych na powierzchni 4,4 ha (tab. 2). Nie ma informacji



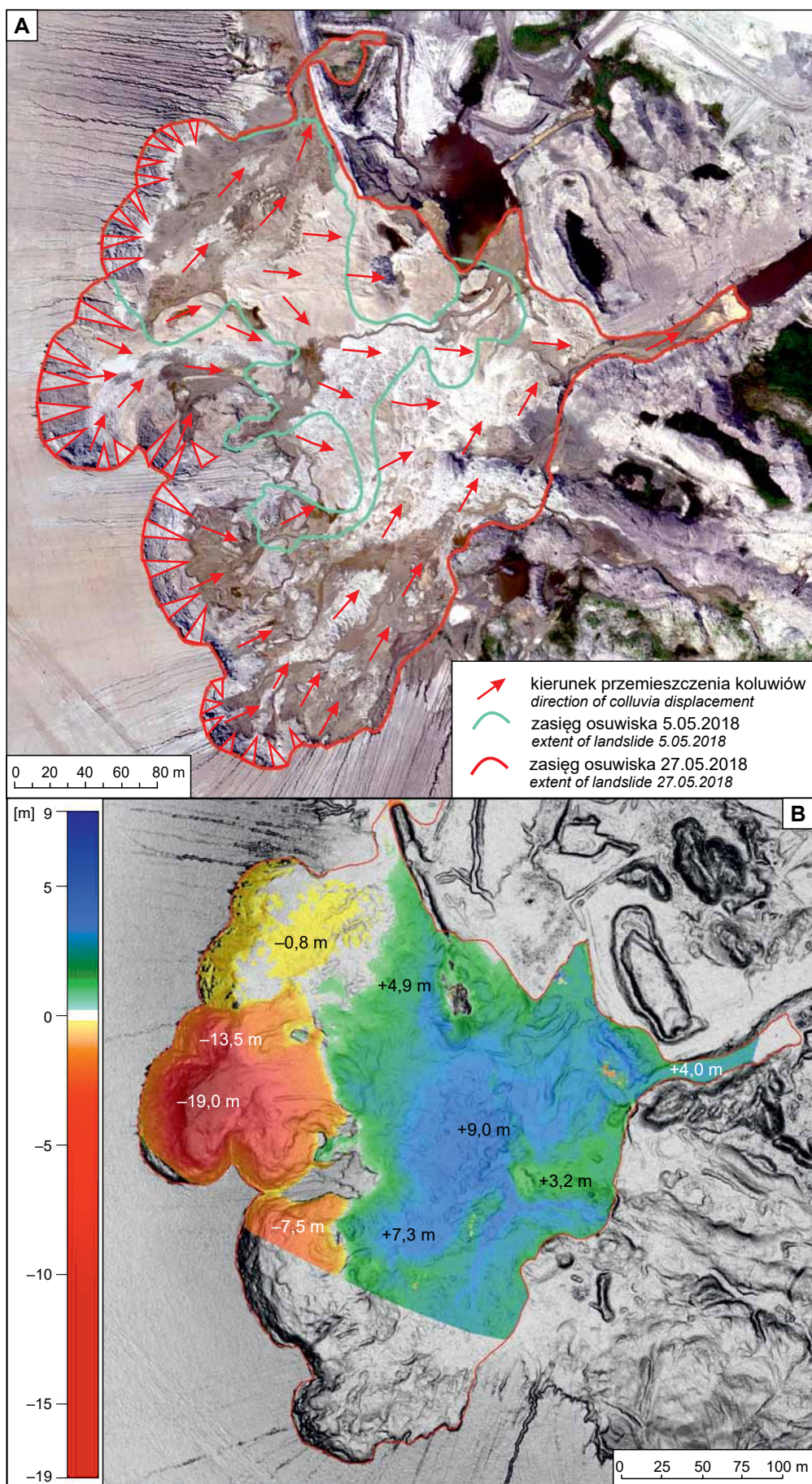
Ryc. 3. Zmiany zasięgu (A) i przemieszczenia pionowe (B) na osuwisku w Koźminie w pierwszym okresie pomiarowym  
 Fig. 3. Changes in extent (A) and vertical displacements (B) on the landslide in Koźmin in the first measurement period



**Ryc. 4.** Zmiany zasięgu (A) i przemieszczenia pionowe (B) na osuwisku w Koźminie w drugim okresie pomiarowym  
**Fig. 4.** Changes in extent (A) and vertical displacements (B) on the landslide in Koźmin in the second measurement period

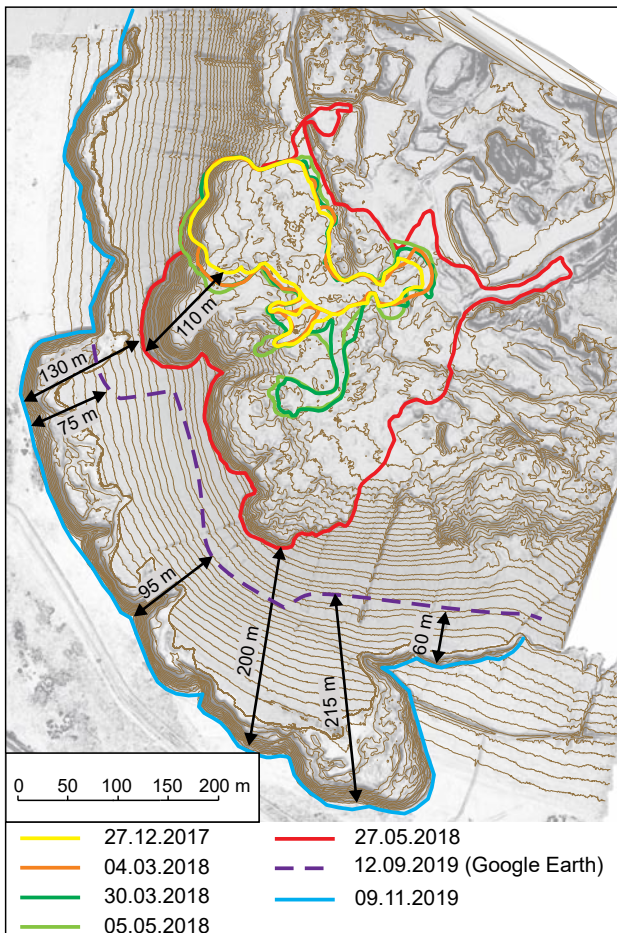


Ryc. 5. Zmiany zasięgu (A) i przemieszczenia pionowe (B) na osuwisku w Koźminie w trzecim okresie pomiarowym  
 Fig. 5. Changes in extent (A) and vertical displacements (B) on the landslide in Koźmin in the third measurement period



**Ryc. 6.** Zmiany zasięgu (A) i przemieszczenia pionowe (B) na osuwisku w Koźminie w czwartym okresie pomiarowym  
**Fig. 6.** Changes in extent (A) and vertical displacements (B) on the Koźmin landslide in the fourth measurement period





**Ryc. 7.** Zmiany zasięgu osuwiska Koźmin w okresie między pierwszym i szóstym nalotem UAV

**Fig. 7.** Changes in extent of the Koźmin landslide in the period between the 1<sup>st</sup> and the 6<sup>th</sup> UAV flight mission

o przemieszczeniach z obszaru wielkości 1,2 ha, co stanowi ok. 15 % całej powierzchni ówczesnego osuwiska.

Ostatni nalot (tab. 1) został wykonany już po częściowym napełnieniu zbiornika (9.11.2019 r.), około trzy tygodnie po dużym osunięciu się zbocza zbiornika wodnego Koźmin Końcowy. W wyniku procesów grawitacyjnych krawędź skarpy głównej cofnęła się na odległość 130–200 m w stosunku do poprzedniego nalotu (ryc. 7). Ogromne przesunięcie granicy osuwiska wystąpiło w południowej części, gdzie utworzona skarpa miała 600 m długości i maksymalną wysokość 12 m. Wyznaczenie dolnego zasięgu osuwiska było niemożliwe ze względu na częściowe wypełnienie zbiornika wodą.

## PODSUMOWANIE

Procesy osuwiskowe w największym stopniu rozwinęły się na zachodnich i południowych zboczach zbiornika Koźmin Końcowy. Jako pierwsze powstało osuwisko w części zachodniej, kilka tygodni po uformowaniu zbocza sztucznego zbiornika. Osuwisko to, podobnie jak w przypadku osuwiska na zboczach zbiornika Głowy, rozwinęło się w miejscu wypływu wód gruntowych u podnóża skarpy odkrywkowej obserwowanych na etapie eksploatacji pokładu węgla. Aktywność osuwiska przejawiała się sko-

kowo. Ruch mas ziemnych miał charakter gwałtowny i szybki, bardzo często odbywał się po intensywnych opadach atmosferycznych, nabierając cechy splotu błotnego (np. w maju 2018 r.). Przesycone wodą koluwia przemieszczały się na duże odległości (ryc. 7), stąd ich niewielka miąższość w stosunku do wysokości skarpy głównej. Osuwisko w ciągu 5 miesięcy (27.12.2017–27.05.2018 r.) zwiększyło powierzchnię prawie 4,5-krotnie (tab. 2), a skarpa główna przesunęła się na odległość ok. 110 m (ryc. 7). Główną przyczyną powstania i rozwoju osuwiska w tym okresie była zmiana właściwości fizyczno-mechanicznych gruntów zwałowanych, spowodowana infiltracją wód opadowych.

Dalszy rozwój osuwiska, oprócz zmienności i niestabilności gruntów zwałowanych, był związany głównie ze zmiennymi warunkami hydrogeologicznymi panującymi w rejonie, co wynikało m.in. z jednoczesnego napełniania trzech zbiorników wodnych w bliskim sąsiedztwie Warty (zbiornik Koźmin, zbiornik Głowy, zbiornik Końcowy Koźmin). W drugiej połowie 2018 r. zbiornik Końcowy Koźmin był już częściowo wypełniony wodą, co uniemożliwiło analizę danych na całej powierzchni osuwiska. Zdjęcia z pułapu UAV potwierdzają jednak dalszą aktywność osuwiska w zachodniej części zbiornika oraz pokazują rozwój ruchów masowych na jego południowych zboczach (ryc. 8).

Do największego zsuwu doszło 24.10.2019 r., kiedy osuwisko uruchomiło się na 800-metrowym odcinku zbocza zbiornika Koźmin Końcowy. Na długości ok. 600 m rozwinęła się nowa skarpa osuwiska w odległości od 75 do 215 m od krawędzi osuwiska, zarejestrowanej na zdjęciach satelitarnych z 12.09.2019 r., dostępnych w Google Earth (ryc. 7, 9). Na tym obszarze, od momentu uformowania zbocza w gruntach zwałowanych (27.12.2017 r.), stwierdzono wypływy wód gruntowych oraz wywołane nimi ruchy osuwiskowe. Zarys krawędzi osuwiska w ostatnim dużym obserwowanym epizodzie osuwiskowym (24.10.2019 r.) zbiega się z zasięgiem gruntów zwałowanych, czyli znajduje się ona w miejscu, gdzie kończyła się odkrywka Koźmin. Ze względu na obniżoną wytrzymałość na ścinanie gruntów zwałowanych w stosunku do gruntów rodzimych (Rybicki, 1986; Rybicki, Woźniak, 1994), można przypuszczać, że rozwój osuwisk zostanie zatrzymany na kontakcie tych dwóch ośrodków gruntowych. Obecnie stosunki wodne na obszarze byłych odkrywek ulegają stabilizacji, a wody w zbiorniku Końcowym Koźmin już prawie osiągnęły zakładaną rzędność (94,5 m n.p.m.). Na zboczach zbiorników nie widać dużych przejawów aktywności osuwisk, a niewielkie obrywy są obserwowane tylko w obrębie stromych skarp osuwisk wystających powyżej lustra wody.

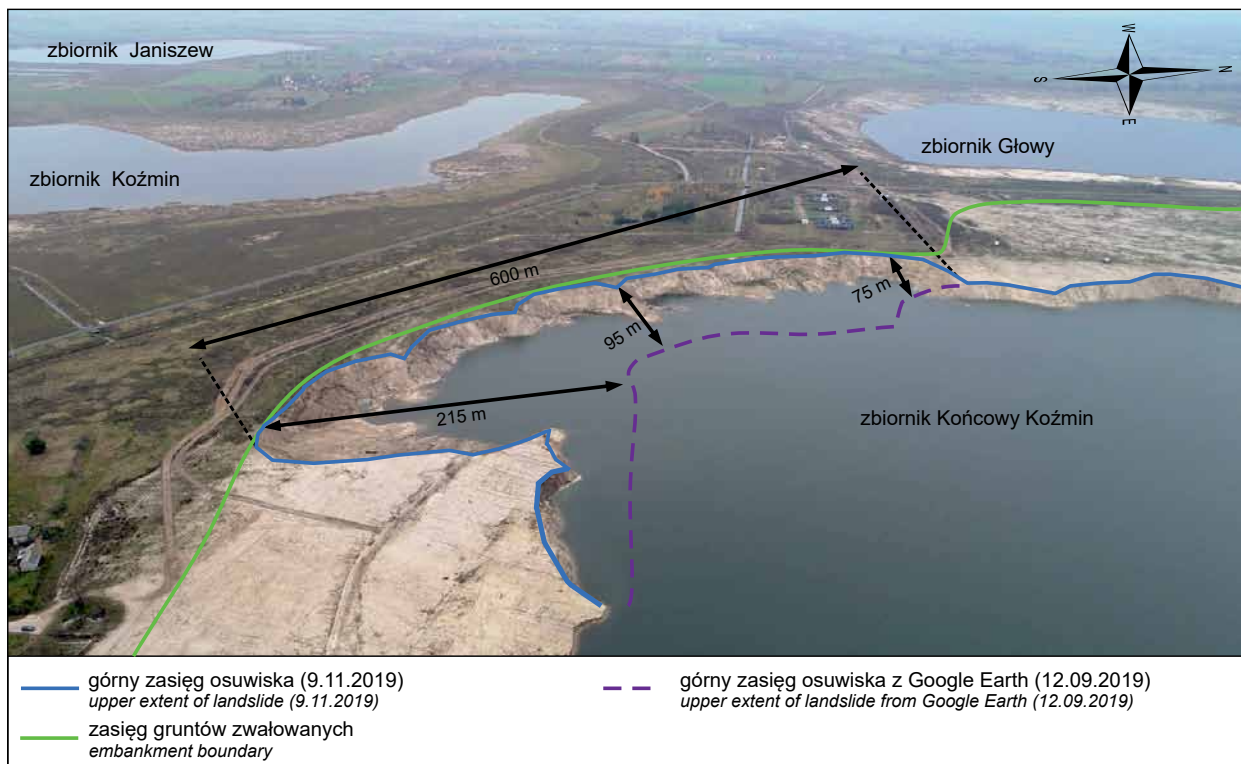
Fotogrametria cyfrowa przy użyciu bezzałogowego statku powietrznego (fotogrametria niskiego pułapu) jest bardzo skuteczną metodą do pozyskiwania informacji wysokościowej (NMT) i danych optycznych na obszarach objętych odkrywkową działalnością górniczą. Tereny te zwykle ze względu na dość szybki ruch zakładu górniczego są pozbawione roślinności, czyli głównego czynnika powodującego obniżenie efektywności metody fotogrametrycznej. Cykliczne pozyskiwanie danych umożliwia detekcję zmian zachodzących na skarpach odkrywek, a w przypadku badanego obszaru – na zboczach



**Ryc. 8.** Osuwisko na zboczu zbiornika Końcowego Koźmin w dniu 7.10.2018 r.  
**Fig. 8.** Landslide on the slope of the zbiornik Końcowy Koźmin on October 7, 2018

zbiornika poeksploatacyjnego. Analiza danych wysokościowych pozwala, oprócz wykrycia obszarów alimentacji (oderwania) i depozycji (akumulacji), wykonywać obliczenia objętości przemieszczonych mas ziemnych. Porównanie drugiego zestawu danych w postaci wysokorozdziel-

czych danych optycznych (ortomozaik) umożliwia prześledzenie zmian zasięgu osuwisk, a niekiedy prognozę zmian zasięgu osuwiska na podstawie szczelin zarejestrowanych na zdjęciach. Metoda fotogrametrii niskiego pułapu ma również ogromną zaletę, jaką jest ograniczenie nie-



**Ryc. 9.** Widok na osuwisko Koźmin w dniu 9.11.2019 r.  
**Fig. 9.** View of the Koźmin landslide on November 9, 2019

bezpieczeństwa dla osób dokonujących pomiarów, z jednoczesnym pozyskaniem bardzo szczegółowych danych o powierzchni terenu. Sprawia to, że na obszarach pozbawionych roślinności stanowi atrakcyjną alternatywę dla pomiarów powierzchni terenu przy pomocy skaningu laserowego.

Autor dziękuje przedstawicielom PAK KWB *Adamów* za udostępnienie danych do celów naukowych oraz Koleżankom i Kolegom z Państwowego Instytutu Geologicznego, biorącym udział w opracowaniu dokumentacji. Podziękowania kieruje również do Recenzentów za bardzo cenne uwagi i komentarze.

## LITERATURA

- BEDNARCZYK Z. 2019 – Zagrożenia osuwiskowe w polskich odkrywkowych kopalniach węgla brunatnego, przykłady przeciwdziałania oraz możliwości zastosowania zdalnego monitoringu w celu ograniczenia ryzyka. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 477: 1–20.
- FLISIAK J., FRANKOWSKI Z., HAŁADUS A., MAJER E., KOWALSKI M., PIETRZYKOWSKI P., RYBICKI S. 2014 – Rozwój i określenie przyczyn osuwiska na skarpie zbiornika wodnego po odkrywkowej kopalni siarki „Piaseczno”. *Prz. Geol.*, 62: 190–197.
- FRANKOWSKI Z., FILAR S. (red.), MAJER E., RYŻYŃSKI G., SZŁASA M., PACANOWSKI G., PIECHOTA A., KARWACKI K., SOBÓTKA P., ŁUKAWSKA A., ŚMIETAŃSKI L., JÓŻWIĄK K., NIDENTAL M. 2018 – Ekspertyza stateczności skarp i zboczy projektowanego wodnego zbiornika końcowego Koźmin wraz z określeniem sposobu i tempa napełniania zbiorników wodnych powstałych po eksploatacji złoża Koźmin. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- FRANKOWSKI Z. (red.), MAJER E., SOKOŁOWSKA M., ROGUŃSKI A., PIECHOTA A., RYŻYŃSKI G., KARWACKI K., SAMEL I., MAJER K., JUDKOWIAK M., JAROS M., SZABŁOWSKA M., SOBÓTKA P., WASILEWSKI K. 2020 – Ekspertyza określająca warunki geotechniczne skarp zbiorników poeksploatacyjnych O/Koźmin na etapie dalszego napełniania w aspekcie stateczności gruntów zwałowych i rodzimych. *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- GAWIN A. 2004 – Ocena możliwości zastosowania fotogrametrii cyfrowej do inwentaryzacji stanu robót górniczych w KWB „BEŁCHATÓW”. *Arch. Fot. i Tel.*, 14: 1–10.
- GAWIN A. 2009 – Zastosowanie naziemnej fotogrametrii cyfrowej do aktualizacji mapy numerycznej w odkrywkowych zakładach górniczych. *Górn. i Geoinż.*, 33 (2): 127–135.
- KAMIŃSKI M. 2011 – Zastosowanie fotogrametrycznych modeli cyfrowych terenu i zdjęć lotniczych w badaniu dynamiki osuwiska Śliwnica (Pogórze Dynowskie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 85–94.
- KARSZNIA K., CZARNECKI L., STAWOWY L. 2010 – System ciągłego monitoringu przemieszczeń i deformacji wyrobisk górniczych w PGE KWB BEŁCHATÓW S.A. – aspekt funkcjonalny i dokładnościowy. *Górn. i Geoinż.*, 34 (4): 279–288.
- KARWACKI K. 2016 – Zastosowanie modeli fotogrametrycznych w badaniu osuwiska w Lachowicach (Karpaty Zachodnie, Beskid Makowski). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 466: 115–122.
- KARWACKI K. 2019 – Zastosowanie bezzałogowego statku latającego (UAV) w monitoringu powierzchniowym ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Kasince Małej (Beskid Wyspowy, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie). *Prz. Geol.*, 67: 339–350.
- 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. Geomaterial.*, 15 (2): 117–129.
- MACIASZEK J., ĆWIAKAŁA P. 2010 – Badania możliwości zastosowania skanowania laserowego do monitoringu osuwisk zboczy wyrobisk odkrywkowych na przykładzie KWB „Bełchatów”. *Prz. Górn.*, 66 (6): 52–57.
- MARKIEWICZ J., ŁAPIŃSKI S., PILARSKA M., ZAWIESKA D., LEVYTSKY V., GRZYB M., PASIK M., BYLINA P. 2019 – Ocena dokładności opracowania fotogrametrycznego wyrobisk odkrywkowych z wykorzystaniem UAV. *Zesz. Str. XIV Konferencji Naukowo-Technicznej „Aktualne problemy w geodezji inżynierskiej”*. Wyd. Geod. i Kartogr. PW, Chęciny: 35.
- MILKOWSKI D., NOWAK J. 2009 – Zabezpieczenie i monitoring zagrożenia osuwiskowego na filarze rzeki Nysa Łużycka oraz osuwiska „Swiniec”. *WUG : Bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie*, 6: 14–21.
- MILKOWSKI D., GÓRECKA A., WÓJCICKA-MILEWSKA M. 2008 – Zabezpieczenie i monitoring osuwisk powstałych na zboczu północnym wyrobiska odkrywkowego BOT KWB TURÓW S.A. *Górn. i Geoinż.*, 32 (2): 247–256.
- MIREK A., BIAŁY L. 2009 – Stan zagrożeń naturalnych w kopalniach węgla brunatnego ze szczególnym uwzględnieniem zagrożeń występujących w KWB „BEŁCHATÓW”. *Górn. i Geoinż.*, 33 (2): 327–341.
- OKUPNY D. 2009 – Morfologiczne skutki procesów stokowych zachodzących na zboczach zwałowiska zewnętrznego Adamów. [W:] Machowski R., Rzętała M.A. (red.), *Z badań nad wpływem antropopresji na środowisko*. Studenckie Koło Naukowe Geografów UŚ, Wydział Nauk o Ziemi UŚ, Sosnowiec, 9: 32–43.
- PIECHOTA A., SOBÓTKA P. 2021 – Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w dokumentowaniu geologiczno-inżynierskim. *Prz. Geol.*, 69: 861–866.
- PIECHOTA A., WASILEWSKI K., KARWACKI K. 2021 – Wykorzystanie nowoczesnych technologii na potrzeby oceny stateczności skarp zbiorników wodnych. 7. Ogólnopolskie sympozjum współczesne problemy geologii inżynierskiej w Polsce 4–17.09.2021, Bydgoszcz. *Zesz. Abstr.*: 66–68.
- RYBICKI S. 1986 – Structure and physico-mechanical properties of dump soils. [W:] *Proceedings of the 5th International IAEG Congress*, Buenos Aires. Balkema, Rotterdam–Boston: 1019–1027.
- RYBICKI S., WOŹNIAK H. 1994 – Shear strength of dump soils with reference to water saturation. [W:] *Proceedings of the 7\* International IAEG Congress*, Lisboa. Balkema, Rotterdam–Brookfield: 2847–2851.
- SOŁON J., BORZYSZKOWSKI J., BIDEŁASIK M., RICHLING A., BADORA K., BALON J., BRZEZIŃSKA-WÓJCIK T., CHABUDZIŃSKI Ł., DOBROWOLSKI R., GRZEGORCZYK I., JODŁOWSKI M., KISTOWSKI M., KOT R., KRAŹ P., LECHNIO J., MACIAS A., MAJCHROWSKA A., MALINOWSKA E., MIGOŃ P., MYGA-PIĄTEK U., NITA J., PAPIŃSKA E., RODZIK J., STRZYŻ M., TERPIŁOWSKI S., ZIAJA W. 2018 – Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geogr. Pol.*, 2 (91): 143–170.
- SOŁOWCZUK M. 2016 – Wykorzystanie fotogrametrii cyfrowej w geologii i górnictwie. *Gór. Odk.*, 57 (3): 14–19.
- SZMULC M., BURDA M. 2016 – Zjawiska osuwiskowe w zawodniowych utworach geologicznych byłego wyrobiska poeksploatacyjnego Kopalni Siarki Piaseczno. *Zesz. N. Inst. Gosp. i Sur. Min. i En.*, 96: 301–310.
- TOMASZEWSKI R., JAGODZIŃSKI Z., STASIŃSKI J., SZYMONOWICZ K. 2016 – Koncepcja rekultywacji dla odkrywki Koźmin – zbiornik końcowy – po zakończeniu eksploatacji. *Arch. PAK KWB Adamów, Warenka*.

Praca wpłynęła do redakcji 22.07.2022 r.

Akceptowano do druku 10.08.2022 r.