



Monitorowanie deformacji powierzchni terenu przy wykorzystaniu lotniczego skaningu laserowego na przykładzie miasta Bytom

Monitoring of ground deformation by use aerial laser scanning illustrated with the example of the city of Bytom

Mgr inż. Piotr Polanin^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono wyniki porównania wartości obniżenia punktów obserwacyjnych w latach 2010-2012 i 2010-2014, określonych przy wykorzystaniu dwóch metod pomiarowych, tj. pomiaru niwelacyjnego, jako wzorcowego z uwagi na większą dokładność wyznaczania wysokości rozpatrywanych punktów oraz pomiaru ALS. Naloty prowadzono w latach 2010-2014 nad obszarem w granicach administracyjnych miasta Bytom. Do analizy zmian wysokości powierzchni wykorzystano numeryczne modele rzeźby terenu z lat 2010, 2012 i 2014 oraz mapy z okresowymi obniżeniami. Na podstawie wyników uzyskanych niezależnymi metodami pomiarowymi została przeprowadzona ocena możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego w obszarze poruszanego zagadnienia.

Abstract: This paper presents the results of comparison of subsidence of observation points during 2010-2012 and 2010-2014 determined by two different measurement methods, such as leveling survey and aerial laser scanning. The first method was assumed as reference because of higher accuracy of determination of the point's height. Flights were carried out between 2010 and 2014 over the land inside the administrative boundaries of Bytom. Maps of periodic subsidence and digital terrain models from 2010, 2012 and 2014 were used for analysis of ground elevation changes. On the basis of the results obtained by independent measuring methods, evaluation was made to determine the possibility of use of aerial laser scanning in within the discussed content.

Słowa kluczowe:

podziemna eksploatacja górnicza, lotniczy skaning laserowy (ALS), pomiary geodezyjne, numeryczny model terenu, analiza

Keywords:

underground mining, aerial laser scanning (ALS), geodetic surveys, digital terrain model, analysis

1. Wprowadzenie

Lotniczy skaning laserowy (ALS - *Aerial Laser Scanning*) jest ciągle rozwijającą się metodą pomiarową, stosowaną w celu odwzorowania rzeźby terenu, zabudowy i obiektów na powierzchni terenu. Omawiana technologia znajduje różne zastosowanie w takich dziedzinach jak geologia (Graniczny i in. 2012, Wojciechowski i in. 2012, Kamiński, Nitichoruk 2015), archeologia, zagospodarowanie przestrzenne, gospodarka leśna (Będkowski, Stereńczak 2010), ochrona środowiska. Materiał pomiarowy umożliwia szeroko pojętą analizę przestrzenną ze względu na duży zasięg realizacji pomiarów w stosunkowo krótkim czasie.

Celem analizy jest próba odpowiedzi na pytanie, czy przy obecnej dokładności pomiaru jest możliwe wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego w monitorowaniu wpływu podziemnej eksploatacji górnicznej na powierzchnię terenu.

Bez względu na dokładność pomiaru ALS jest sumą dokładności systemu skanującego, danych nawigacyjnych i inercyjnych, złożenia i kalibracji bloków danych oraz uzależniona jest w dużej mierze od zróżnicowania rzeźby, rodzaju i pokrycia terenu (Kraus i in. 2006, Pawłuszek i in. 2014).

Na podstawie różnych źródeł dokładność wysokościowa chmury punktów ALS po wyrównaniu i kalibracji znajduje się w przedziale od 0,1 m do 0,3 m, natomiast dokładność sytuacyjna w przedziale od 0,2 m do 0,55 m.

W górnictwie lotnicze skanowanie laserowe znajduje zastosowanie m.in. w analizie obniżenia powierzchni terenu

w Australii (Harrower i in. 2010) oraz w identyfikacji występowania zapadlisk w rejonie dawnych wyrobisk górniczych i szybów w Kanadzie (Froese, Shilong 2008). Popiołek z zespołem zaproponowali wykorzystanie pomiaru ALS do rejestrowania niecek obniżeniowych w celu oszacowania objętości pustek w zrobach poeksploatacyjnych, jako miejsca lokowania odpadów (Popiołek i in. 2014). Obecnie w polskim górnictwie istnieje trend wykonywania nalotów w zakresie aktualizacji map sytuacyjno-wysokościowych terenów w granicach obszarów górniczych kopalń.

W artykule przedstawiono wyniki porównania wartości obniżenia punktów obserwacyjnych w latach 2010-2012 i 2010-2014, określonych przy wykorzystaniu dwóch metod pomiarowych, tj. pomiaru niwelacyjnego, jako wzorcowego z uwagi na większą dokładność wyznaczania wysokości rozpatrywanych punktów oraz pomiaru ALS, który był prowadzony w latach 2010-2014 nad obszarem w granicach administracyjnych miasta Bytom. W tym celu wygenerowano modele rzeźby terenu z chmury punktów sklasyfikowanych, jako grunt z lat 2010, 2012 i 2014 oraz wykonano mapy z okresowymi obniżeniami powierzchni na podstawie różnic zmian rzeźby terenu w latach 2010-2012 i 2010-2014.

Dla wybranych punktów pomiarowych zastabilizowanych w podłożu gruntowym o znanych współrzędnych porównano wartości ich obniżenia z różnic wysokości numerycznych modeli terenu otrzymanych z poszczególnych nalotów oraz odpowiadających im zmian wysokości określonych pomiarami niwelacyjnymi w okresie od listopada 2009 do maja 2012 i od listopada 2009 do maja 2014. Na podstawie analizy

^{*)} Główny Instytut Górnictwa, Katowice

porównawczej wyników uzyskanych niezależnymi metodami pomiarowymi została przeprowadzona ocena możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego w obszarze poruszanego zagadnienia.

2. Charakterystyka analizowanego obszaru

Omawiany obszar jest położony w zachodniej części Bytomia, w granicach administracyjnych dzielnicy Miechowice (rys. 1). Teren obejmuje zachodnią część Wyżyny Śląskiej, gdzie wysokość nad poziomem morza zmienia się od 267 m w części południowej i wschodniej do 310 m w części północnej. Rzeźba terenu jest zróżnicowana ze względu na prowadzoną działalność górnictw, której efektem są niecki bezodpływowe, np. staw 24, zbiornik W-47 oraz hałdy skał płonnych, które w większości zostały już zrehabilitowane. Zabudowę terenu stanowią głównie budynki mieszkalne: kamienice, domki jednorodzinne i budynki z wielkiej płyty, obiekty użyteczności publicznej (przedszkola, szkoły, kościoły) oraz oczyszczalnia ścieków Miechowice.

Na analizowanym obszarze działalność górnictwa sięga czasów średniowiecznych, kiedy to eksploatowano galenę. Na skalę przemysłową rozpoczęto eksploatację złoża galmanu po otwarciu w 1823 r. kopalni „Maria” oraz węgla kamiennego po wybudowaniu kopalni „Preussengrube” („Prusy”, po 1945 r. „Miechowice”) w 1902 r. (<https://...>) Obecnie pod rozpatrywanym obszarem węgiel kamienny jest wydobywany przez kopalnię „Bobrek-Piekary” Ruch „Bobrek”, należąca do spółki Węglokoks Kraj, w granicach obszarów górniczych „Bytom III” i „Bobrek – Miechowice I”.

3. Charakterystyka materiałów obserwacyjnych

3.1. Zakres i charakterystyka pomiarów geodezyjnych

Sieć obserwacyjną służącą monitorowaniu obniżenia powierzchni terenu wywołanych podziemną eksploatacją górnictw stanowią repery zastabilizowane na budynkach oraz ciągi punktów ziemnych tworzących linie pomiarowe. Linie biegną głównie wzdłuż ulic Frenzla, Reptowskiej, Wolnego, Andersa, Hutniczej, Elsnera, Warszawskiej, Karbowskiej, Dzierżonia, Racjonalizatorów, Francuskiej i Dalekiej (rys. 1). Na obszarze Miechowic założono 23 linie obserwacyjne o łącznej długości około 14 km.

Pomiary zmian wysokości punktów obserwacyjnych prowadzone są przez dział mierniczo-geologiczny kopalni „Bobrek-Piekary” Ruch „Bobrek” dwa razy w roku, na wiosnę na przełomie kwietnia i maja oraz jesienią na przełomie października i listopada. Częstsze obserwacje wraz z zagęszczeniem osnowy obserwacyjnej są realizowane podczas prowadzenia eksploatacji złoża węgla kamiennego pod obiektami szczególnie wrażliwymi na wpływy górnicze.

Referencyjne wysokości punktów obserwacyjnych nr 1282 (budynek przy ul. Frenzla 7) i nr 605 (budynek przy ul. Stolarzowickiej 86) są wyznaczane cyklicznie pomiarami niwelacyjnymi II klasy w nawiązaniu do repera 5411009, który jest usytuowany poza zasięgiem wpływów eksploatacji górnictw w Suchej Górze. Pomiar realizowany jest niwelatorem samopoziomującym Zeiss Ni 007 i dwupodziałowymi łąkami inwarowymi firmy Zeiss, stawianymi w odległości 25 m od niwelatora. Wyznaczona maksymalna wartość błędów średniego wysokości tych punktów wynosi kolejno $\pm 6,7$ mm i $\pm 7,5$ mm. Stanowią one nawiązanie do niwelacji IV klasy dla pozostałych punktów obserwacyjnych.

Maksymalny średni błąd wysokości obliczony dla punktów pomiarowych położonych na obszarze w granicach filaru ochronnego dzielnicy Miechowice wynosi $\pm 15,4$ mm, natomiast dla punktów zlokalizowanych na terenie poza filarem ochronnym $\pm 17,6$ mm.

3.2. Zakres i charakterystyka danych z lotniczego skaningu laserowego

Wyniki lotniczego skaningu laserowego udostępnione przez Wydział Geodezji Urzędu Miasta w Bytomiu pochodzą z czterech okresów. Dane zostały zapisane w formacie plików „las” w standardzie 1.1 (dane z 09.03.2010 r.) i w standardzie 1.2 (dane z 18.04.2011 r., 26.05.2012 r. i 15.05.2014 r.) według specyfikacji zatwierdzonej przez Amerykańskie Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji (APSR – *The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing*).

Parametrem użytkowym świadczącym o jakości danych ALS jest gęstość skanowania, czyli liczba punktów przypadających na jednostkę powierzchni, zazwyczaj wyrażoną w metrach kwadratowych. Parametr ten jest określany na etapie planowania nalołów w celu osiągnięcia zamierzonej jakości produktów pochodnych, jakimi są numeryczny model terenu i numeryczny model pokrycia terenu. W tym celu dobiera się odpowiedni system aparatury pomiarowej oraz parametry lotu, tak aby uzyskać w miarę równomierne pokrycie terenu (Wężyk red. 2014).

Z informacji przekazanych przez Wydział Geodezji Urzędu Miasta w Bytomiu, wynika że na metr kwadratowy skanowanej powierzchni terenu przypada osiem zarejestrowanych punktów. Średni bezwzględny błąd pomiaru wysokości z poszczególnych nalołów nie przekraczał 0,15 m.

Ze względu na różne okresy realizacji pomiarów geodezyjnych i ALS wykluczono z dalszej analizy dane z nalołu w 2011 r.

4. Zakres eksploatacji górnictw podczas nalołów prowadzonych w latach 2010-2014

W okresie objętym pomiarami od 09.03.2010 r. do 15.05.2014 r., kopalnia „Bobrek-Centrum” Ruch „Bobrek”, jako Oddział Kompani Węglowej S.A. (od 08.05.2015 r. pod nazwą „Bobrek-Piekary” Ruch „Bobrek” w strukturach Węglokoks Kraj Sp. z o.o.), prowadziła podziemną eksploatację trzech pokładów: 503, 509 w.d. i 510 w.d. systemem ścianowym z zawalem stropu.

W tabeli 1 zostały zestawione podstawowe dane charakteryzujące eksploatację w poszczególnych pokładach, tj. wysokość i średnią głębokość w granicach ścian, okres rozpoczęcia i zakończenia.

Między pierwszym oraz trzecim pomiarem rzeźby i pokrycia analizowanego terenu (okres od 09.03.2010 r. do 26.05.2012 r.) eksploatacja górnictw była prowadzona w dwóch rejonach:

- w części zachodniej, bezpośrednio pod ulicą Stolarzowicką, Frenzla i Matki Ewy: w warstwie dolnej pokładu 510 ścianą 20a na średniej głębokości 810 m, w warstwie dolnej pokładu 509 ścianą 97a na średniej głębokości 780 m oraz ponownie w warstwie dolnej pokładu 510 ścianą 18a na średniej głębokości 800 m. Wysokość ścian wynosiła 2,0 m.
- w części wschodniej w pokładzie 503 ścianą 4 na średniej głębokości 655 m. Od uruchomienia ściany do osiągnięcia wybiegu 730 m pokład wybierano na wysokość 3,2 m, następnie wysokość została obniżona do 2,6 m.

Między trzecim i czwartym pomiarem ALS (okres od 26.05.2012 r. do 15.05.2014 r.) kontynuowano eksploatację pokładu 510 w.d. ścianą 18a na głębokości 750 m i pokładu 503 ścianą 4 na średniej głębokości 705 m, które zatrzymano kolejno w lipcu 2012 i w lipcu 2013. W tym okresie w odstępie jednego miesiąca uruchomiono dwie kolejne ściany 30a i 31a w dolnej warstwie pokładu 510, które podczas ostatniego pomiaru osiągnęły odpowiednio wybieg 615 m i 550 m na głębokości 780 m. Z uwagi na ochronę kościoła pw. Świętego Krzyża zmniejszono wysokość ścian z 2,4 m do 2,0 m. Względem powierzchni ich krawędzie znajdują się między ulicą Warszawską i Frenzla.

5. Opracowanie numerycznych modeli terenu

Każdy plik danych ALS z nalołów realizowanych w latach 2010-2014 zawiera sklasyfikowaną chmurę zarejestrowanych punktów według następujących oznaczeń, opracowanych przez Amerykańskie Towarzystwo Fotogrametrii i Teledetekcji:

- 1 – punkty niesklasyfikowane (Unclassified),
- 2 – punkty reprezentujące grunt (Ground),
- 3 – punkty stanowiące niską szatę roślinną (Low Vegetation),
- 4 – punkty stanowiące średnią szatę roślinną (Medium Vegetation),

Tabela 1. Zakres eksploatacji górniczej podczas prowadzenia lotniczego skaningu laserowego w latach 2010-2014

Table 1. The reach of underground mining during aerial laser scanning between 2010 and 2014

l.p.	wysokość eksploatacji, m	głębokość eksploatacji, m	czas eksploatacji		pokład	ściana
1	2,0	810	01.02.2010	01.08.2010	510 w.d.	śc. 20a
2	2,0	780	01.07.2010	01.04.2011	509 w.d.	śc. 97a
3	2,0	775	01.10.2011	01.07.2012	510 w.d.	śc. 18a
4	3,2 / 2,6	680	01.02.2011	16.07.2013	503	śc. 4
5	2,4 / 2,0	780	01.07.2013	01.08.2015	510 w.d.	śc. 31a
6	2,4 / 2,0	780	01.08.2013	01.05.2015	510 w.d.	śc. 30a

w.d. – warstwa dolna pokładu



Rys. 1. Sieć obserwacyjna i zakres eksploatacji górniczej prowadzonej w latach 2010-2014 (ortofotomapa z 2014 r.)
Fig. 1. Observation network and the reach of underground mining during 2010-2014 (orthophotomapa, 2014)

5 – punkty stanowiące wysoką szatę roślinną (High Vegetation),

6 – punkty reprezentujące budynki (Building),

7 – punkty sklasyfikowane jako szum (Low Points).

Dane ALS zostały zweryfikowane pod kątem poprawności zarejestrowania punktów według zestawionej powyżej klasyfikacji, przy wykorzystaniu oprogramowania Global Mapper z modułem Lidar firmy Blue Marble. W uzasadnionych przypadkach punkty błędnie reprezentujące grunt zostały przydzielone do właściwej klasy przy pomocy filtra morfologicznego lub zostały sklasyfikowane ręcznie za pomocą funkcji digitalizacji. W celu właściwej identyfikacji rodzaju obiektu w postaci chmury punktów pomocne były również ortofotomapy z lat 2009, 2011, 2012 i 2014, które również zostały udostępnione przez Wydział Geodezji Urzędu Miasta w Bytomiu.

Z chmury punktów reprezentujących grunt z poszczególnych nalołów wygenerowano numeryczne modele terenu w postaci siatki nieregularnych trójkątów. Model TIN (*Triangulated Irregular Network*) umożliwia wierne odwzorowanie rzeźby terenu o zróżnicowanym nachyleniu, przy zachowaniu odpowiedniej liczby punktów definiujących powierzchnię, pomijając punkty nadmiarowe dla obszarów o mniej zróżnicowanej morfologii. Dobranie odpowiednich wymiarów pojedynczej komórki siatki pozwala na zachowanie dokładności odwzorowania rzeźby terenu, przy jednoczesnym unikaniu lub zmniejszeniu ryzyka występowania nieoczekiwanych, lokalnych ekstremów. Przyjmowanie dużych rozmiarów oczek siatki powoduje generalizację numerycznego modelu terenu (niska rozdzielczość) i wzrost wartości błędów interpolacyjnych (Palamara i in. 2007, Gonga-Saholiariliva i in. 2011, Montealegre i in. 2015).

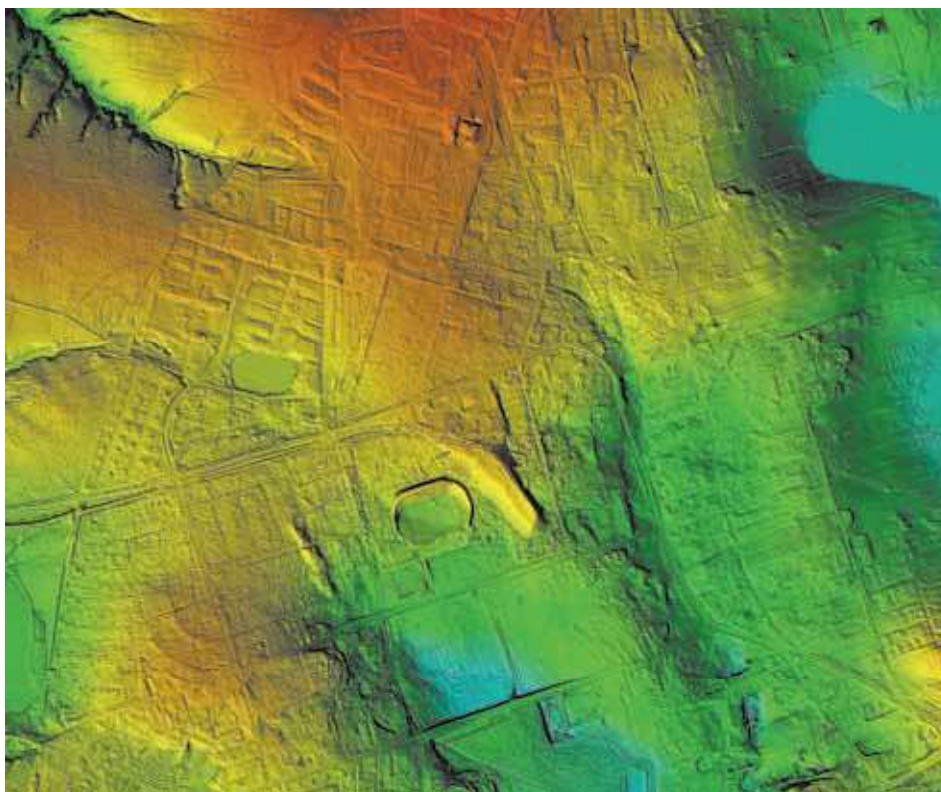
Odległości między punktami danych ALS z poszczególnych nalołów znajdują się w przedziale od 0,2 do 0,4 m.

Obliczenia zostały wykonane za pomocą programu LasInfo pakietu oprogramowania LASTOOLS, autorstwa Martina Isenburga (rapidlasso GmbH). Jako kryterium doboru wymiaru oczka siatki przyjęto trzykrotność średniej odległości między punktami, co odpowiada w przybliżeniu wartości 1 m.

Jako model referencyjny przyjęto stan rzeźby terenu zarejestrowany podczas nalotu w 2010 roku (rys. 2). Wysokości numerycznych modeli terenu zostały zapisane do regularnej siatki kwadratów (grid) o boku równym 1 m. W następnym etapie wykonano różnicowe mapy wysokości, jako wynik odejmowania wartości w poszczególnych punktach siatki odpowiadające zmianom powierzchni terenu w latach 2010-2012 oraz w latach 2010-2014 (rys. 3 i rys. 4).

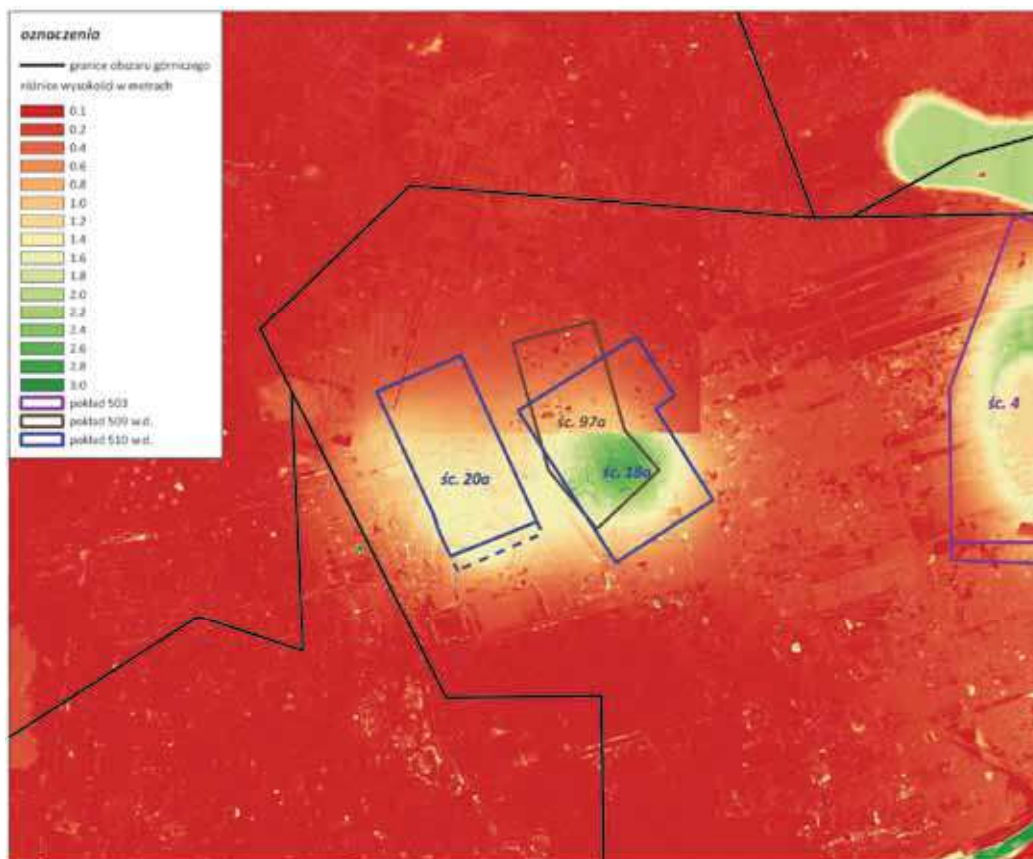
Jak można było się spodziewać, oprócz lokalnych zmian powierzchni terenu spowodowanych m.in. wykonaniem wykopów pod fundamenty nowych obiektów oraz pracami ziemnymi związanymi z budową Obwodnicy Północnej (fragment południowo-wschodniej części analizowanego obszaru), na rysunkach 3 i 4 widoczne są granice niecek obniżeniowych powstałych w wyniku prowadzenia ścian eksploatacyjnych scharakteryzowanych w punkcie trzecim. W okresie pierwszym można wyróżnić trzy, a w drugim cztery niecki obniżeniowe, w których największe obniżenia powierzchni zarejestrowane pomiarami ALS wynosiły:

- w latach 2010-2012:
 - nad polem ścian 97a i 18a - 2,6 m,
 - nad polem ściany 20a - 1,4 m,
 - nad polem ściany 4 - 1,3 m,
- w latach 2010-2014:
 - nad polem ścian 97a i 18a - 3,6 m,
 - nad polem ściany 20a - 1,7 m,
 - nad polem ściany 4 - 2,4 m,
 - nad polem ścian 30a i 31a - 2,3 m.

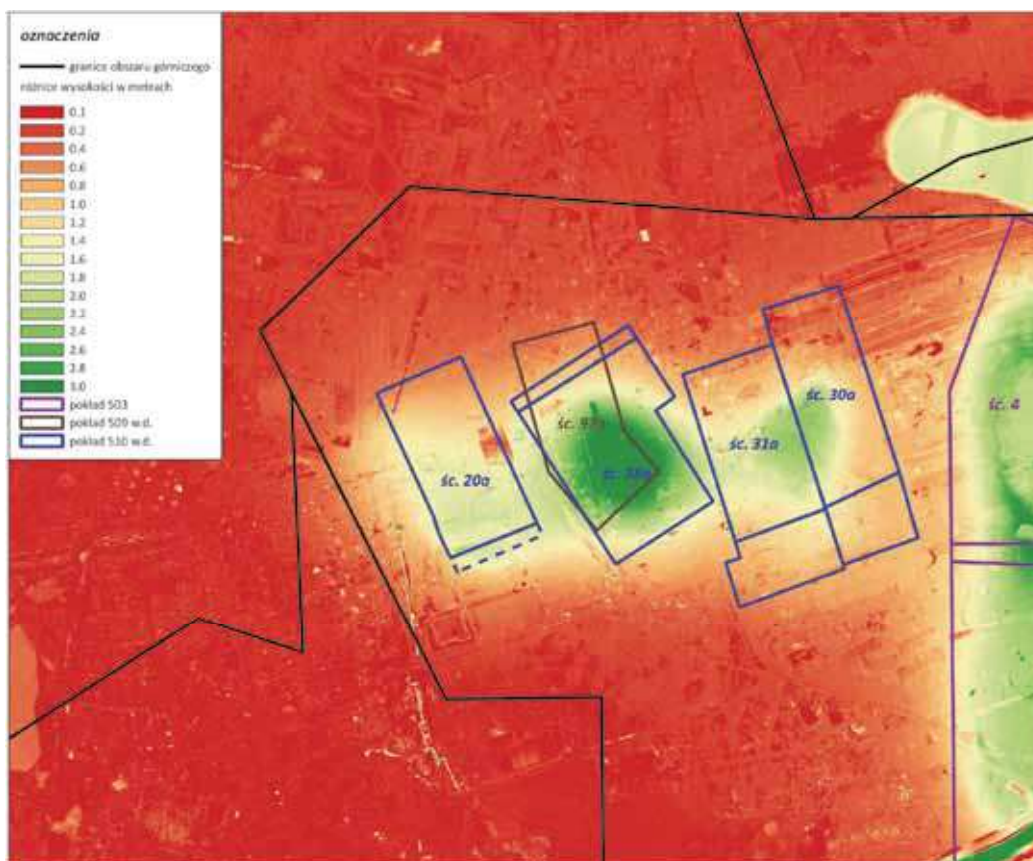


Rys. 2. Numeryczny model terenu analizowanego obszaru z 2010 r.

Fig. 2. Digital terrain model of the analyzed area from 2010



Rys. 3. Różnice wysokości reprezentujące zmiany numerycznej rzeźby terenu w latach 2010-2012
 Fig. 3. Elevation differences representing changes of digital surface topography during 2010-2012



Rys. 4. Różnice wysokości reprezentujące zmiany numerycznej rzeźby terenu w latach 2010-2014
 Fig. 4. Elevation differences representing changes of digital surface topography during 2010-2014

6. Porównanie obniżeń punktów obserwacyjnych określonych pomiarami geodezyjnymi i pomiarami ALS

Mając na uwadze, że bezwzględna dokładność wysokościowa danych z nalogów wynosiła do 0,15 m, podjęto próbę oceny możliwości wykorzystania lotniczego skaningu laserowego do monitorowania obniżeń powierzchni terenu, na podstawie różnic wysokości wygenerowanych, numerycznych modeli terenu.

Analizę porównawczą wyników pomiarów geodezyjnych i ALS przeprowadzono dla wybranych punktów sieci niwelacyjnej o znanych współrzędnych X, Y (rys. 5 - rys. 10). Objęto nią dwa okresy: 2010-2012 oraz 2010-2014. Założenia do analizy są następujące:

- dla standardowych pomiarów geodezyjnych:
 - jako stan początkowy przyjęto wysokości punktów obserwacyjnych z listopada 2009 roku,
 - porównaniu w przypadku pierwszego okresu podlegały różnice wysokości punktów od listopada 2009 do maja 2012, w przypadku drugiego okresu od listopada 2009 do maja 2014,
 - odrzucono wartości odstające, wskazujące na uszkodzenie punktu pomiarowego,
 - rozpatrywano odcinki linii obserwacyjnych, na których zaobserwowano ustalone wpływy eksploatacji górniczej, przy założeniu granicznej wartości miesięcznego przyrostu obniżeń równej 15 mm,
- dla pomiarów ALS:
 - jako stan początkowy przyjęto chmurę punktów sklasyfikowanych jako grunt z 09.03.2010 r.,
 - z danych grid wyinterpolowano wartości reprezentujące różnice wysokości numerycznych modeli terenu z poszczególnych nalogów dla współrzędnych odpowiadających lokalizacji punktów obserwacyjnych.

W celu porównania obniżeń otrzymanych dwiema metodami dla wytypowanych punktów obserwacyjnych wyznaczono:

- minimalną i maksymalną różnicę:

$$\Delta w_{i\text{MIN}/\text{MAX}} = (w_{i\text{ALS}} - w_{i\text{GEO}}), \text{mm}$$

- średnią różnicę:

$$v_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \Sigma (w_{i\text{ALS}} - w_{i\text{GEO}})}{n}, \text{mm}$$

- średnią bezwzględną różnicę:

$$v_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \Sigma (|w_{i\text{ALS}} - w_{i\text{GEO}}|)}{n}, \text{mm}$$

- odchylenie standardowe różnic:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta w_i - \Delta w_{sr})^2}{n-1}}, \text{mm}$$

- błąd średniokwadratowy różnic:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_{i\text{ALS}} - w_{i\text{GEO}})^2}{n}}, \text{mm}$$

W tabeli 2 i 3 zostały zestawione wartości wskaźników dla poszczególnych linii pomiarowych z podziałem na dwa okresy. W pierwszym uwzględniono w analizie 143 punkty. Natomiast w drugim ograniczono ich liczbę do 107, ze względu na ujawniające się na linii obserwacyjnej wzdłuż ulicy Warszawskiej, wpływy ścian 30 i 31a w pokładzie 510 w.d.

Pomiary realizowane rozpatrywanymi metodami były prowadzone w podobnym okresie. Jednak różnice w granicach 10 do 20 dni, mają istotny wpływ na wynik w przypadku bezpośrednich ruchów warstwy przypowierzchniowej.

Różnice między obniżeniami punktów obliczonych z danych ALS i pomiarów geodezyjnych znajdują się w przedziale od -150 mm do 253 mm. Oprócz czynnika najbardziej istotnego, jakim jest dokładność pomiaru, na różnice może mieć wpływ szorstkość powierzchni numerycznego modelu terenu, który uwzględnia płynną granicę między podłożem, a niskim poszyciem jakim jest trawa.

Wartości wskaźników dla dwóch przedziałów czasu są spójne. Wartości średnie różnic wskazują, że obniżenia otrzymane z danych ALS są większe od wartości obliczonych z pomiarów niwelacyjnych. Dla rozpatrywanych danych są w granicach od 5 mm do 120 mm przy odchyleniu standardowym różnic w przedziale od ±31 mm do ±86 mm. Wartości średnie różnic bezwzględnych potwierdzają różnice dokładnościowe dwóch metod pomiarowych, które dla rozpatrywanego zbioru danych wynoszą od 50 mm do 120 mm (tabela 1 i 2). Wskazują to również wartości błędu średniokwadratowego (różnice od 55 mm do 130 mm), które są większe od wartości średnich różnic bezwzględnych o 4 % do 42%.

Pomimo zauważalnych różnic, ze względu na dokładność wysokościową lotniczego skanowania laserowego, która dla analizowanego obszaru wynosi do 0,15 m, można stwierdzić, że wyznaczone obniżenia punktów za pomocą dwóch metod pomiarowych wykazują zadowalającą zgodność i wskazują, że lotniczy skaningu laserowy umożliwia rejestrowanie wpływów górniczych na powierzchni terenu.

7. Podsumowanie

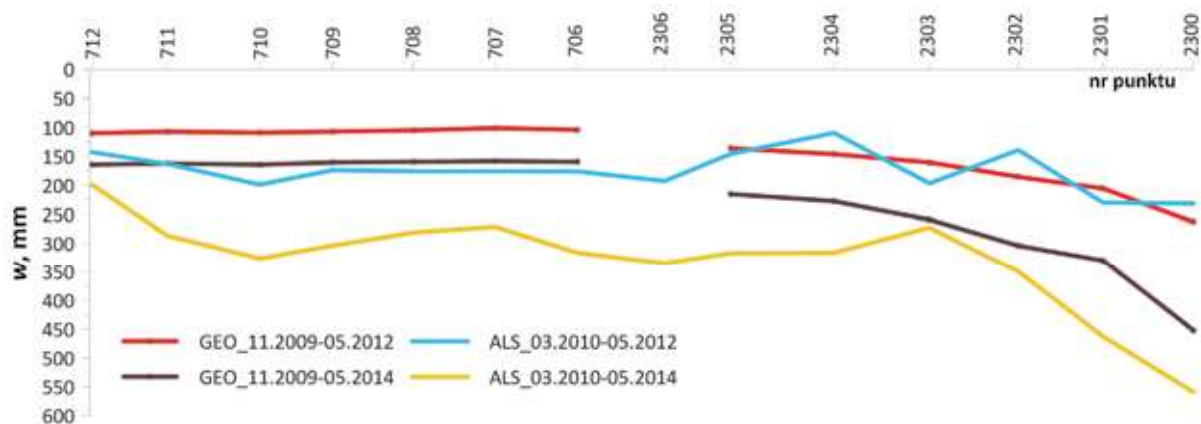
W przypadku monitorowania obniżeń powierzchni terenu wymagana jest milimetrowa dokładność w kierunkach XYZ. Z praktycznego punktu widzenia jako granicę zasięgu

Tabela 2. Zestawienie wskaźników porównawczych analizowanych metod pomiarowych dla pierwszego okresu
Table 2. Dataset of comparative indicators for the analyzed survey methods for the first period of time

Nazwa ulicy (linia pomiarowa)	Lata 2010-2012						
	n	v_{sr} [mm]	σ [mm]	RMSE [mm]	v_0 [mm]	Δw_{MIN} [mm]	Δw_{MAX} [mm]
Daleka	13	32.0	46.0	54.6	49.8	-46.2	89.6
Dzierżonia	36	42.7	40.9	58.8	50.4	-45.7	120.5
Frenzla	15	5.4	85.9	83.2	58.5	-90.8	253.0
Karbowska	12	65.4	68.7	92.7	70.1	-19.6	199.1
Reptowska, Wolnego, Andersa, Hutnicza	43	101.5	50.2	113.0	101.6	-1.5	251.8
Warszawska	24	78.1	53.2	93.9	85.5	-51.7	150.9

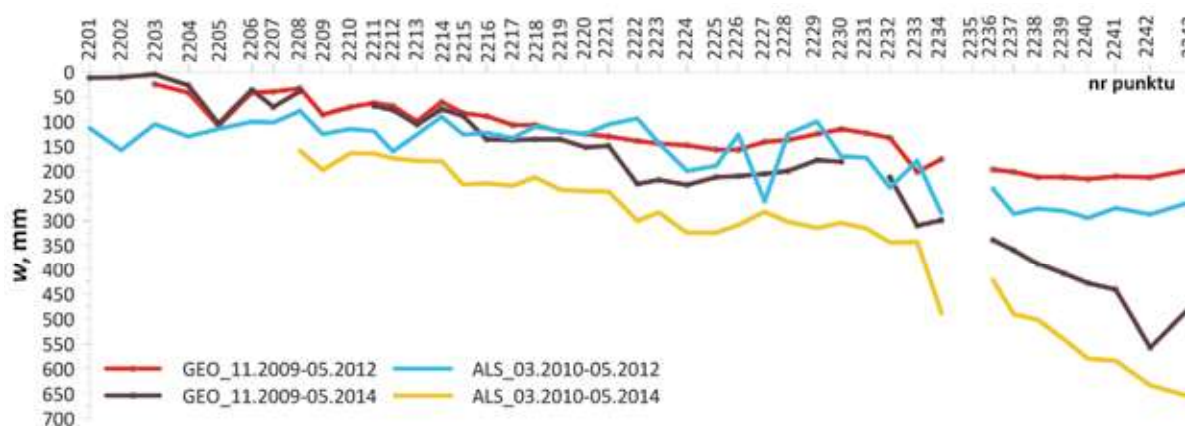
Tabela 3. Zestawienie wskaźników porównawczych analizowanych metod pomiarowych dla drugiego okresu
Table 3. Dataset of comparative indicators for the analyzed survey methods for the second period of time

Nazwa ulicy (linia pomiarowa)	Lata 2010-2014						
	n	v_{sr} [mm]	σ [mm]	RMSE [mm]	v_0 [mm]	Δw_{MIN} [mm]	Δw_{MAX} [mm]
Daleka	13	103.7	46.5	113.0	103.7	13.6	162.4
Dzierżonia	31	110.3	30.7	114.3	110.3	64	189.1
Frenzla	30	28.5	81.6	85.2	66.8	-149.6	217.6
Karbowska	10	119.7	48.2	128.2	119.7	29.9	183.2
Reptowska, Wolnego, Andersa, Hutnicza	23	115.2	61.7	130.1	117.1	-16.3	189.6
Warszawska	-	-	-	-	-	-	-



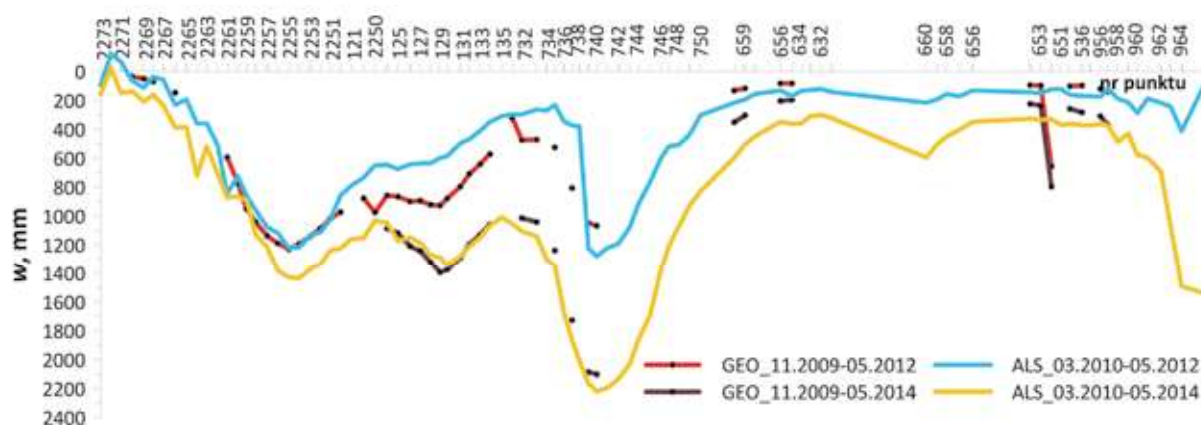
Rys. 5. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulicy Dalekiej z pomiarów niwelacyjnych i ALS

Fig. 5. Subsidence of observation points along Daleka Street on the basis of the level survey and aerial laser scanning (ALS)



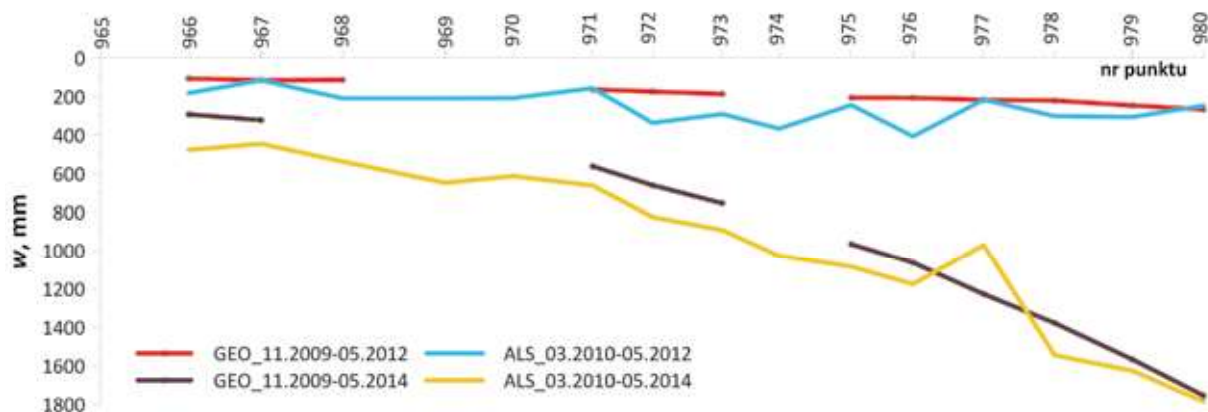
Rys. 6. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulicy Dzierżonia z pomiarów niwelacyjnych i ALS

Fig. 6. Subsidence of observation points along Dzierżonia Street on the basis of the level survey and aerial laser scanning (ALS)

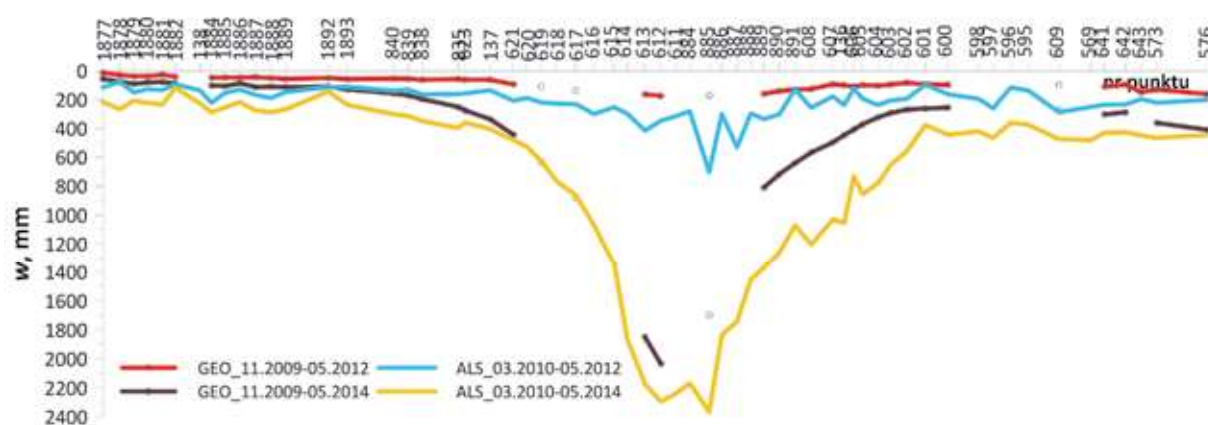


Rys. 7. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulicy Frenzla z pomiarów niwelacyjnych i ALS

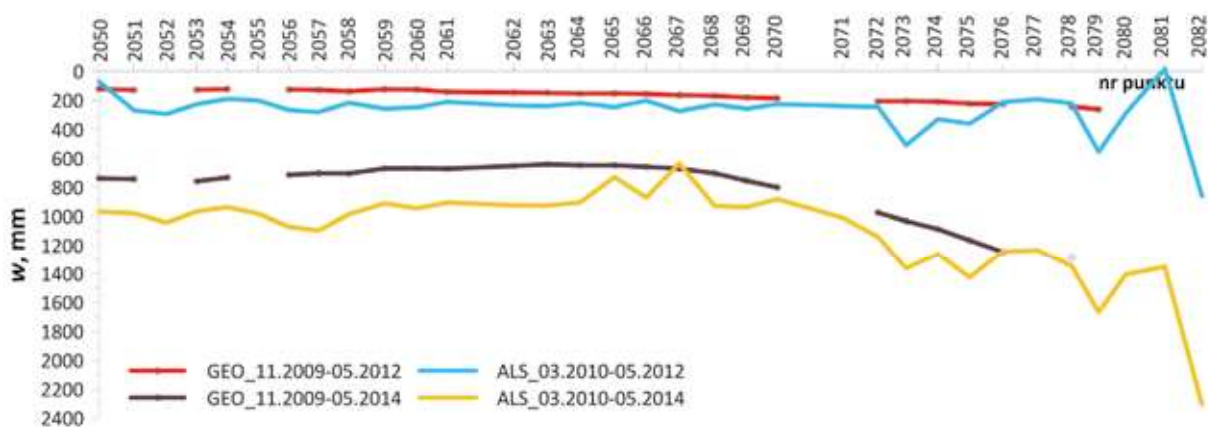
Fig. 7. Subsidence of observation points along Frenzla Street on the basis of the level survey and aerial laser scanning (ALS)



Rys. 8. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulicy Karbowskiej z pomiarów niwelacyjnych i ALS
 Fig. 8. Subsidence of observation points along Karbowska Street on the basis of the level survey and aerial laser scanning (ALS)



Rys. 9. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulic Reptowskiej, Wolnego, Andersa i Hutniczej z pomiarów niwelacyjnych i ALS
 Fig. 9. Subsidence of observation points along Reptowska, Wolnego, Andersa and Hutnicza Streets on the basis of Streets level survey and aerial laser scanning (ALS)



Rys. 10. Obniżenia punktów obserwacyjnych wzdłuż ulicy Warszawskiej z pomiarów niwelacyjnych i ALS
 Fig. 10. Subsidence of observation points along Warszawa Street on the basis of the level survey and aerial laser scanning (ALS)

wpływ podziemnej eksploatacji górniczej przyjmuje się obniżenia terenu rzędu 10-30 mm. Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskano zgodność obniżeń określonych z pomiarów niwelacyjnych i ALS. Stwierdzone różnice dochodzą do około 13 cm i mieszczą się w granicach bezwzględnej dokładności pomiaru. Lotniczy skaninng laserowy można wykorzystać do monitorowania obniżeń powierzchni

terenu o stosunkowo dużych przyrostach, szczególnie dla rozległych obszarów, poddawanych wpływom wielokrotnej eksploatacji górniczej. Metoda ALS umożliwia rejestrowanie całych niecek obniżeniowych. Pozwala też na analizowanie obniżeń terenu, gdzie nie są prowadzone obserwacje oraz w rejonach, gdzie stosowanie klasycznych pomiarów geodezyjnych jest utrudnione. Jednak z uwagi na duży błąd sytuacyjny

(rzędu 0,2 do 0,55 m) pomiaru ALS nie należy stosować do rejestrowania przemieszczeń i odkształceń poziomych. Z punktu widzenia jakości numerycznego modelu terenu należy rozważyć przeprowadzanie nalołów poza okresem wegetacyjnym, czyli wiosną (marzec/kwiecień) lub jesienią (październik/listopad), co umożliwi zarejestrowanie większej liczby punktów reprezentujących grunt. Porównując chmurę punktów z nalołów wykonanych w marcu 2010 i kolejnych realizowanych w maju 2012 i 2014, zauważono mniejszy zbiór punktów stanowiących powierzchnię terenu, szczególnie w rejonach o gęstym poszyciu, jak np. parki i lasy.

Literatura

- BĘDKOWSKI K., STEREŃCZAK K. 2010 - Porównanie numerycznych modeli terenu obszarów leśnych generowanych z wykorzystaniem danych skaningu laserowego (LIDAR) uzyskanych w okresie wiosennym i letnim. *Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej. Roczniki Geomatyki 2010*, t. VIII, z. 7 (43).
- FROESE C., SHILONG M. 2008 - Mapping and monitoring coal mine subsidence using LiDAR and InSAR. *GeoEdmonton'08. Conference of the Canadian Geotechnical Society. Edmonton 21-24.09.2008*.
- GONGA-SAHOLIARILIVA, N.; GUNNELL, Y.; PETIT, C.; MERING, C. 2011 - Techniques for quantifying the accuracy of gridded elevation models and for mapping uncertainty in digital terrain analysis. *Progr. Phys. Geogr.*, 35, 739–764.
- GRANICZNY M., KAMIŃSKI M., PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M. 2012 - Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańnicy (gmina Lanckorona), pogórze Wielickie, Karpaty zewnętrzne. „*Przegląd Geologiczny*” 60 (2), s. 89–94.
- HARROWER M., SERGEANT P., SHIELD S. 2010 - Subsidence Analysis for Underground Coal Mining Operations: The Use of Airborne Laser Scanning Data. *International Federation of Surveyors (FIG) Congress 2010: Facing the Challenges – Building the Capacity. Sydney, Australia, 11-16 April 2010*.
<https://pl.wikipedia.org/wiki/Miechowice>
- KAMIŃSKI M., NITYCHORUK J. 2015 - Cyfrowa analiza fotogrametryczna tempa i charakteru ruchów masowych skarpy rzecznej doliny Bugu w rejonie Drohiczyzna (południowe Podlasie). „*Przegląd Geologiczny*” 63 nr 12/2, s. 1461-1471.
- KRAUS K., KAREL W., BRIESE C., MANDLBURGER G. 2006 - Local accuracy measure for digital terrain models. *Photogrammetric Record* 2 (116), 342–354.
- MONTEALEGRE A.L., LAMELAS M.T., RIVA J. 2015 - Interpolation Routines Assessment in ALS-Derived Digital Elevation Models for Forestry Applications. *Remote Sensing Journal*, 7, Pages 8631-8654.
- PALAMARA D.R., NICHOLSON M., BAAFI FLENTJE P.E., BRASSINGTON G. 2007 - An evaluation of airborne laser scan data for coalmine subsidence mapping. *International Journal of Remote Sensing* Volume 28, Issue 15, Pages 3181-3203.
- PAWLUSZEK K., ZIAJA M., BORKOWSKI A. 2014 - Ocena dokładności wysokościowej danych lotniczego skaningu laserowego systemu ISOK na obszarze doliny rzeki Widawy. *Acta Sci. Pol., Geodesia et Descriptio Terrarum* 13 (3-4), s. 27-37.
- POPIOLEK E., NIEDOJADŁO Z., SOPATA P., STOCH T. 2014 - Możliwości wykorzystania pogórnich niecek obniżeniowych do oszacowania objętości pustek w zrobach poeksploatacyjnych. „*Przegląd Górniczy*” nr 8, s. 102-108.
- WEŻYK P. (red.) 2014 - Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR – Główny Urząd Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- WOJCIECHOWSKI T., BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIK A. 2012 - Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). „*Przegląd Geologiczny*” 60 (2), s. 95–102.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2017
Artykuł akceptowano do druku 10.11.2017