

Osiadanie powierzchni terenu z tytułu szczypania wody - wyznaczanie technikami InSAR

Land subsidence due to groundwater exploitation – investigation with InSAR techniques



Mgr inż. Anna Kopeć*



Dr hab. inż. Andrzej Kwinta*

Treść: Wody podziemne są głównym źródłem zaopatrzenia w wodę publicznych sieci wodociągowych oraz zakładów przemysłowych. Jednocześnie wody podziemne stanowią zagrożenie dla kopalni podziemnych i odkrywkowych, konieczna jest eksploatacja wód z obszarów objętych wydobywaniem. Eksploatacja wód podziemnych, powoduje kształtowanie się wielkopowierzchniowych niecek odwodnieniowych. Pomiar przemieszczeń terenu, wykonuje się głównie klasycznymi metodami geodezyjnymi (niwelacja, tachimetria). W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania technik pomiarowych InSAR (DInSAR, PSInSAR, SBAS) do monitoringu osiadań powierzchni terenu, wynikających z szczypania wód podziemnych. Techniki InSAR umożliwiają jednoczesną obserwację całego obszaru eksploatacji w quasi-ciągłej postaci (bardzo duża ilość punktów pomiarowych) i bardzo krótkich interwałach czasowych (nawet co 6 dni), co stanowi zdecydowaną przewagę nad punktowym i czasochłonnym, klasycznym pomiarem geodezyjnym.

Abstract: Groundwater is the main source of water supply for public water supply and industry. Simultaneously, groundwater is a threat to underground and open-cast mines. It is necessary to exploit water from mining areas. Exploitation of groundwater causes the formation of large-scale drainage basins. Measurements of ground displacements are carried out mainly by classic geodetic methods (leveling, tachymetry). This paper presents the possibilities of using InSAR measurement techniques (DInSAR, PSInSAR, SBAS) to monitor the subsidence of the land surface resulting from groundwater extraction. InSAR techniques allow to observe the whole area of exploitation in a quasi-continuous form (very large number of measurement points) and at very short time intervals (even every 6 days) at the same time, which is a decisive advantage over the point and time-consuming classic geodetic measurements.

Słowa kluczowe:

InSAR, szczypanie wód podziemnych, wielkopowierzchniowe niecki odwodnieniowe

Keywords:

InSAR, groundwater extraction, large-scale drainage basins

1. Wprowadzenie

Zarówno w Polsce, jak i na świecie, kwestia dostępu do wody jest bardzo istotnym problemem. Ze względu na zanieczyszczenia większość wód powierzchniowych nie spełnia norm wód wykorzystywanych jako wody pitne, i dlatego eksploatuje się coraz więcej wód podziemnych o zdecydowanie lepszych parametrach jakościowych. Eksploatacja wód podziemnych niesie za sobą negatywne skutki, m.in. takie jak: osiadanie powierzchni terenu, zanieczyszczenie wód podziemnych oraz stepowanie.

Zapotrzebowanie w wodę jest problemem globalnym, w 1974 roku UNESCO powołało Międzynarodowy Program Hydrologiczny (ang. *International Hydrological Programme, IHP*), który koordynuje działania związane z badaniem wód, zarządzaniem gospodarką wodną oraz edukacją wodną. W ramach IHP została powołana grupa robocza zajmująca się osiadaniami powierzchni terenu z tytułu szczypania wód. Jej celem jest poszerzenie wiedzy w zakresie identyfikacji i charakterystyzowania zagrożeń związanych z naturalnym i antropogenicznym osiadaniami gruntów oraz ocena ryzyka (Galloway i in. 2016). Osiadanie gruntu może skutkować uszkodzeniami budynków, infrastruktury technicznej (rurociągi, linie napowietrzne itp.), a także przyczynić się do zwiększenia zagrożenia powodziowego (Huang 2012).

* Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

2. Wody podziemne i ich eksploatacja

Wody podziemne są głównym źródłem: wody pitnej, wody wykorzystywanej w przemyśle oraz produkcji roślinnej. Silną eksploatację wód podziemnych prowadzi się zwłaszcza w rejonie dużych aglomeracji miejskich oraz ośrodków przemysłowych.

Szczerpywanie wód podziemnych prowadzi się również z powodu zagrożenia wodnego w kopalniach, zarówno odkrywkowych, jak i podziemnych. W celu minimalizacji zagrożenia wodnego w górnictwie, obniża się zwierciadło wód podziemnych w rejonie eksploatacji, w wyniku czego powstaje lej depresji. Drenaż wód podziemnych przyczynia się do zmian środowiskowych, zarówno w bliskim, jak i dalszym otoczeniu kopalni (Motyka i in. 2007).

3. Klasyczne i nowoczesne metody pomiaru wielkopowierzchniowych niecek odwodnieniowych

Eksploatacja wody podziemnej na bieżące potrzeby mieszkańców wielkich metropolii lub rolnictwa, od dziesiątków lat powoduje powstawanie wielkopowierzchniowych niecek obniżeniowych. W wielu miejscach na świecie obserwowane były, metodami geodezyjnymi, przemieszczenia pionowe, których przyczyn pierwotnie nie znano. Dopiero drastyczne zwiększenie zapotrzebowania na wodę i wzrost prędkości obniżen powierzchni terenu spowodował połączenie tych dwóch procesów. Obserwacje przemieszczeń punktów powierzchni terenu klasycznie wykonywane są metodami geodezyjnymi, co w połączeniu z hydrologicznymi metodami pomiarowymi pozwala na monitoring konfiguracji powierzchni. Oczywiście pomiary klasyczne dostarczają informacji dyskretnej (punktowych), dlatego pojawiają się teledetekcyjne (ang. *Synthetic Aperture Radar, SAR*) i fotogrametryczne (ang. *Light Detection and Ranging, LIDAR*) metod pomiarowych, obejmujących duże powierzchnie terenu natychmiast zostało wykorzystane w badaniach wielkopowierzchniowych nie-

cek obniżeniowych (Galloway, Burbey 2011). W tabeli 3.1 przedstawiono podstawowe metody pomiarowe służące do wyznaczania przemieszczeń wykorzystywane w Kalifornii.

Klasyczne techniki pomiarowe charakteryzują się wysoką dokładnością, jednak ich zasięg przestrzenny jest ograniczony do punktowej (dyskretnej) reprezentacji, w postaci wyznaczonej sieci pomiarowej. Ponadto pomiary są czasochłonne i rzadko wykonywane (nawet co kilka czy kilkanaście lat). Nowoczesne techniki pomiarowe umożliwiają pozyskanie bardzo dużej ilości punktów w krótkim czasie.

4. Techniki InSAR do wyznaczania przemieszczeń

Głównym założeniem technik InSAR, jest wykorzystanie obrazów z radarów wysokiej rozdzielczości do wygenerowania interferogramów. Obraz interferometryczny przedstawia różnice faz fali elektromagnetycznej, między dwoma obrazowaniami wykonanymi z różnych pozycji i/lub w różnym czasie. Na tej podstawie można określić względną wysokość powierzchni terenu lub jej zmianę w czasie, w kierunku padania fali elektromagnetycznej (ang. *line of sight, LOS*) (Ferretti i in. 2007).

Interferogram reprezentuje całkowite przesunięcie fazy (φ), na którą składają się (Hooperi in. 2012, Osmanoglu i in., 2016):

- przemieszczenie powierzchni terenu - przesunięcie piksela w kierunku padania wiązki (φ_{def}),
- błędy wynikające ze zmiany topografii terenu – zmiany kąta padania wiązki (φ_θ),
- różnice w opóźnieniu atmosferycznym między dwoma obrazowaniami (φ_{atm}),
- błędy orbit (φ_{orb}),
- szum termiczny i zmienności rozpraszania fali elektromagnetycznej (φ_N)

$$\varphi = W\{\varphi_{def} + \varphi_\theta + \varphi_{atm} + \varphi_{orb} + \varphi_N\}$$

Tabela 1. Metody pomiaru przemieszczeń – na podstawie (Borchers, Carpenter 2014)

Table 1. Displacement measurement methods - based on (Borchers, Carpenter 2014)

Metoda	Kierunek przemieszczeń	Dokładność w mm	Minimalna ilość punktów	Kształt
1	2	3	4	5
Niwelacja	pionowy	0.1-1	10-100	linia
Elektroniczny pomiar odległości	poziomy	1	10-100	linia
Ekstensometr mechaniczny	poziomy	0.3	1-10	linia
Ekstensometr inwarowy	poziomy	0.0001	1	linia
Ekstensometr kwarcowy	poziomy	0.00001	1	linia
GPS	pionowy, poziomy	20 5	10-100	punkt
Ekstensometr wgłębny	pionowy	0.01-0.1	1-3	punkt
InSAR	pionowy	5-20	100 tys.-10 mln	piksel 40-80 m
PS InSAR	pionowy	1-5	zmienne	piksel 40-80 m
Skaning naziemny	pionowy, poziomy	10 10	1 mln-100 mln	chmura punktów
LIDAR	pionowy, poziomy	300 360	zmienne	piksel 0.25-2 m

gdzie: W jest operatorem zwiniętej fazy ($-\pi, \pi$) (Hanssen 2001, Hooper i in. 2012).

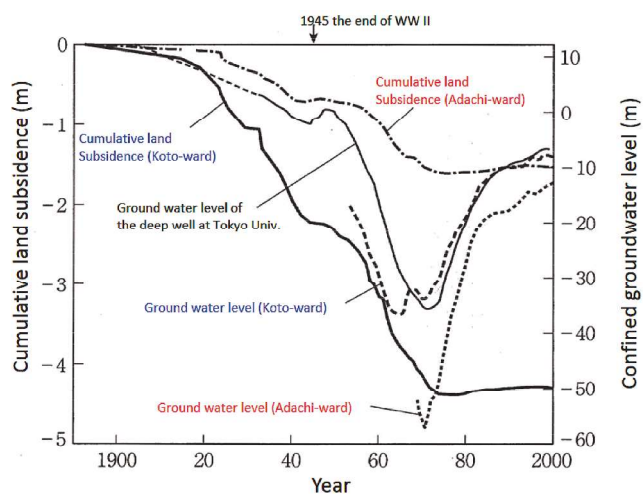
Dodatkowo na wynik obliczeń wpływ mają dekorrelacje czasowe, przestrzenne i geometryczne.

Podstawową techniką wyznaczania przemieszczeń na podstawie obrazów SAR jest interferometria różnicowa (ang. *Differential SAR, DInSAR*), gdzie interferogram jest tworzony na podstawie minimum dwóch obrazów. Otrzymane wyniki są jednak obciążone największymi błędami, wynikającymi z wyżej wymienionych czynników zewnętrznych. Kolejnym krokiem było opracowanie technik opartych na przetwarzaniu wielu obrazów – otrzymany wynik jest w postaci szeregów czasowych (ang. *time series*). Pierwsza z nich zakłada identyfikację tzw. stabilnych rozpraszaczy (ang. *Permanent Scatterers, PS*), pikseli, dla których intensywność odbicia fali jest wysoka i stabilna w czasie (Ferretti i in. 2000, Ferretti i in. 2001). Wyniki są reprezentowane w postaci bardzo dużej ilości punktów (PS), jednak ich rozmieszczenie nie jest regularne. Kolejna technika (ang. *Small Baseline Subset, SBAS*) przetwarzania wielu obrazów, opiera się na tworzeniu interferogramów dla takich obrazów, dla których baza orbitalna i czasowa jest jak najmniejsza, co pozwala zminimalizować dekorrelację (Berardino i in. 2002). Wynikiem jest gęsta, regularna siatka punktów, pokrywająca cały obszar zobrazowania.

5. Przykłady światowe

Możliwości satelitarnych, radarowych metod pomiarowych zaraz po ich wprowadzeniu zostały wykorzystane do zobrazowania skutków trzęsień Ziemi czy też właśnie do zobrazowania skutków szczypania wody. Bogata jest literatura światowa, która dotyczy tego zagadnienia. Poniżej przedstawione zostaną światowe przykłady skutków szczypania wody i ich monitoringu.

Jednym z klasycznych przykładów monitoringu są obniżenia rejestrowane w Japonii. Powierzchnia terenu była obserwowana od początków XX wieku. Pierwsze istotne obniżenia zostały zarejestrowane około 1920 roku (rys 1). W latach 60. poziom wód gruntowych opadał o około 2,5 metra na rok, zaś obniżenia powierzchni terenu osiągały prędkość 0,1 metra na rok (Okada 2017).

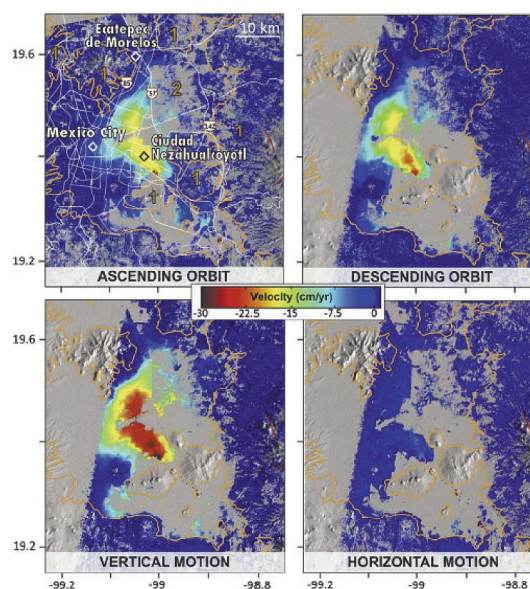


Rys. 1. Obniżenia powierzchni terenu i poziomu wód podziemnych w rejonie Zatoki Tokijskiej (Okada 2017)

Fig. 1. Subsidence of land surface and groundwater level in the Gulf of Tokyo (Okada 2017)

Przemieszczenia w rejonie Tokio były również analizowane metodami SAR (Pasquali i in. 2015). Przeprowadzono badania obniżeń w okresie 2006–2010 w rejonie Urayasu. Uzyskano przemieszczenia z danych ASAR i PALSAR metodami PS i SBAS. Wyniki tych badań potwierdziły skuteczność metod SAR.

Innym typowym przykładem obniżania się powierzchni terenu dużej metropolii jest Mexico City. Obniżenia w tym mieście osiągają rzeczywistość duże wartości (Waltham 2014). Duża część centrum miasta obniżyła się o ponad 9 metrów w ciągu ostatnich stu lat, a obniżenia miejscami sięgają nawet 12 metrów. Ma to poważne konsekwencje w odniesieniu do nowych obiektów budowlanych, jak i zabezpieczenia obiektów historycznych. Poza klasycznymi metodami pomiarowymi, prowadzone są badania z wykorzystaniem metod satelitarnych (Sowter i in. 2016, Castellazzi i in. 2016). Na podstawie serii danych radarowych z uwzględnieniem szeregów czasowych można analizować również prędkości przekształcania powierzchni terenu. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki analizy prędkości zmian konfiguracji powierzchni terenu w latach 2007–2011, zarówno w płaszczyźnie pionowej, jak i poziomej (Chaussard i in. 2014).

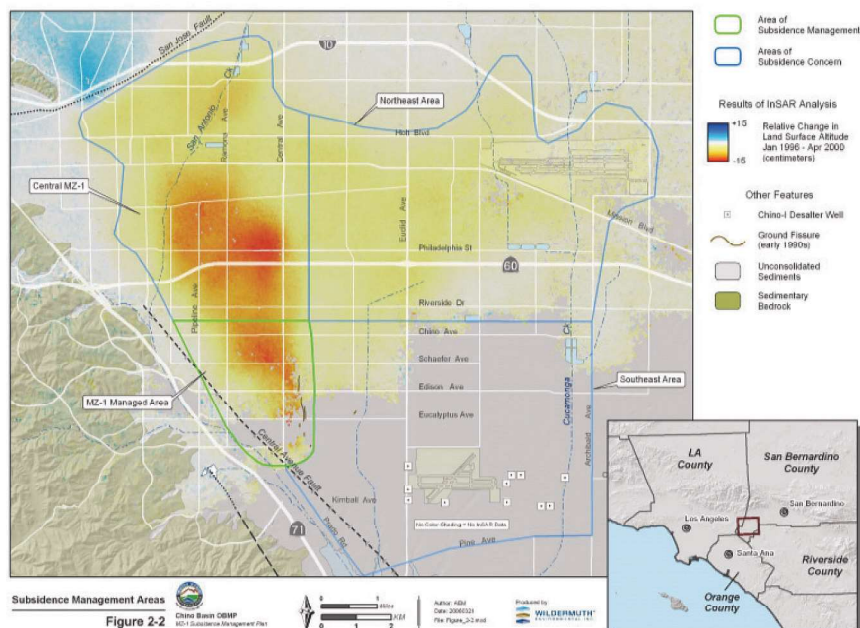


Rys. 2. Przekształcania powierzchni terenu w rejonie Mexico City (Chaussard i in. 2014)

Fig. 2. The transformation of the land surface in the area of Mexico City (Chaussard i in. 2014)

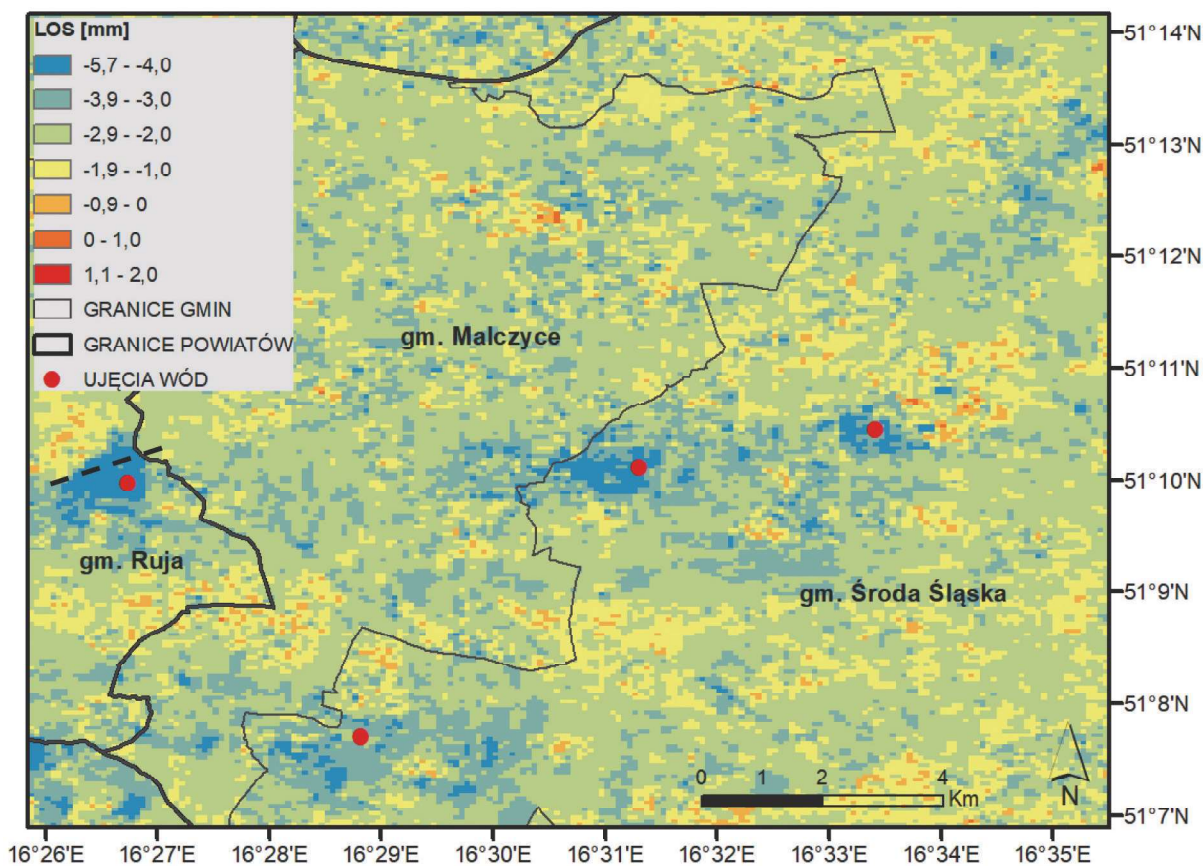
Jak widać na rysunku 2, maksymalne prędkości przemieszczeń pionowych wynoszą do 0,30 m/rok.

Stan Kalifornia obejmuje swoim zasięgiem ponad 400 tys. km² powierzchni. Stąd przekształcania powierzchni na skutek eksploatacji wody mają bardzo zróżnicowany charakter. W niektórych miejscach obniżenia dochodzą do kilku metrów, ale miejscami dochodzi do wypiętrzeń. W Kalifornii nadochodzą na siebie skutki eksploatacji wody oraz ropy naftowej. Obecnie podstawą obniżeń jest eksploatacja wód podziemnych. Intensywne szczypanie wody w Kalifornii prowadzone było już w wieku XIX. Wodę eksploatuje się na potrzeby mieszkańców, ale również intensywnie na potrzeby rolnictwa. Począwszy od początków XX wieku rozpoczęto monitorowanie przemieszczeń powierzchni terenu. Początkowo były to pomiary niwelacyjne (od 1900 roku), następnie GPS (od lat 80. XX wieku), i InSAR (od lat 90. XX wieku), a obecnie



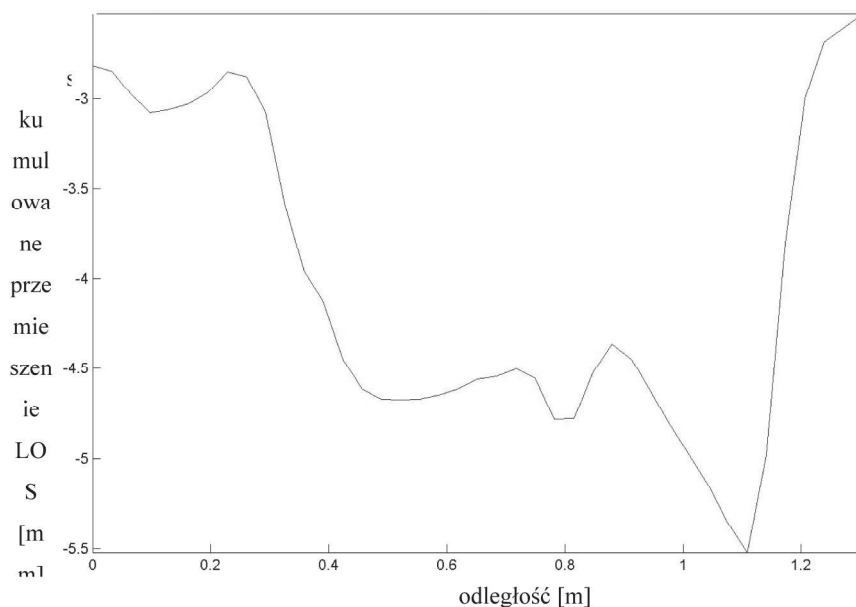
Rys. 3. Wyniki analizy przemieszczeń techniką InSAR dla rejonu Chino w Kalifornii (Wildermuth Environmental 2007)

Fig. 3. Results of InSAR displacement analysis for the Chino area in California (Wildermuth Environmental 2007)



Rys. 4. Skumulowane przemieszczenia w kierunku LOS dla okresu listopad 2014 – styczeń 2015, gminy Środa Śląska, Ruja, Malczyce, opracowanie własne. Czarną przerywaną linią oznaczono lokalizację przekroju

Fig. 4. Cumulative displacement LOS for November 2014 – January 2015, in Środa Śląska, Ruja, Malczyce communes, own study. The location of the cross-section was marked with the black dotted line



Rys. 5. Przekrój przez nieckę obniżeniową w gm. Ruja, opracowanie własne
Fig. 5. Cross-section through the subsidence basin in Ruja commune, own study

wykorzystuje się również misję satelitarną GRACE do pomiarów wielkopowierzchniowych (Borchers, Carpenter 2014).

Na rysunku 3 przedstawiono przykładową analizę wyników przemieszczeń powierzchni terenu w rejonie Chino. W rejonie tym prędkość obniżen sięga średnio około 4 cm/rok w okresie od 1996 do 2000 roku. Dzięki zastosowaniu technologii radarowej możliwe jest pozyskanie dużej ilości danych do analizy, co przyczynia się do poprawy dokładności modelowania (Wildermuth Environmental 2007).

Przedstawione w tym rozdziale przykłady jedynie pokazują jak powszechnym problemem jest ruch powierzchni terenu z tytułu szczypania wody oraz wykorzystanie metod interferometrii radarowej do wyznaczenia tych ruchów.

6. Przykład krajowy

Problem osiadania powierzchni terenu na skutek szczypania wód podziemnych jest powszechny również w Polsce. Jak wspomniano wcześniej, obniżenie zwierciadła wód podziemnych najczęściej związane jest z szczypaniem wód na użytek przemysłowy i komunalny.

Przykładem szczypania wód na potrzeby przemysłowe (technologiczne) i komunalne jest rejon Środy Śląskiej na Dolnym Śląsku. Pobór wód na tym obszarze jest rozproszony na kilka ujęć, jego efektem jest powstawanie wielkopowierzchniowej niecki odwodnieniowej.

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki pomiaru techniką SBAS, na podstawie zobrazowań z satelitów Sentinel 1 A i B, od listopada 2014 do stycznia 2015. Obniżenie terenu w kierunku LOS maksymalnie osiąga wartość 5 mm w okresie 3 miesięcy. Obliczenia wykonano z wykorzystaniem oprogramowania GMTSAR (Sandwell i in. 2011). Otrzymane wyniki w postaci szeregów czasowych pozwalają obserwować zmiany zachodzące na powierzchni terenu. Dodatkowo dzięki ciągłej reprezentacji wyników, możliwe jest generowanie przekrojów, którego przykład przedstawiono na rysunku 5. Powyższy przykład pokazuje, że wykorzystanie technik InSAR umożliwia zaobserwowanie nawet niewielkich przemieszczeń, które dotychczas nie były zidentyfikowane i wskazanie ich lokalizacji, co nie jest możliwe z wykorzystaniem innych technik pomiarowych.

7. Podsumowanie

Techniki InSAR bazujące na zobrazowaniach satelitarnych, niewątpliwie dostarczają bardzo istotnych informacji do badania osiadań gruntów. Ich zaletą jest przede wszystkim duży zasięg, ciągła reprezentacja wyników oraz częsty i bezpłatny dostęp do danych. Tak jak przedstawiono w tabeli 1, dokładność technik InSAR, jest niższa od klasycznych metod pomiarowych, jednak zdecydowanie przewyższa inne nowoczesne techniki pomiarowe, takie jak LIDAR, czy naziemny skaning laserowy. Może stanowić uzupełnienie klasycznych pomiarów geodezyjnych, a także pozwala zidentyfikować rozwój nowych osiadań. Wykorzystanie interferogramów SAR jest innowacyjną i bardzo prędko rozwijającą się techniką, która stanowi przyszłość dla monitoringu zmian powierzchni terenu.

Literatura

- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R., and SANSOSTI E. 2002 - A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11):2375–2383.
- BORCHERS J.W., CARPENTER M. 2014 - Land Subsidence from Groundwater Use in California. California Water Foundation Full Report of Findings/April 2014.
- CASTELLAZZI P., ARROYO-DOMINGUEZ N., MARTEL R., CALDERHEAD A.I., NORMAND J.C.L., GARFIAS J., RIVIERA A., 2016 - Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 47.
- CHAUSSARD E., WADOWINSKI S., CABRAL-CANO E., AMELUNG F., 2014 - Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 140.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCA F. 2000 - Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry *IEEE TGRS*, 38 (5), pp. 2202-2212
- FERRETTI A., PRATI C., ROCA F. 2001 - Permanent scatterers in SAR interferometry *IEEE TGRS*, 39 (1), pp. 8-20

- FERETTIA., MONTI-GUARNIERIA., PRATIC., ROCCAF., MASSONNER D. 2007 -InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, ESA Publications.
- GALLOWAY D.L., TEATINI P., CARREON D., YE S. 2016 - The UNESCO-IHP Working Group on Land Subsidence: Four Decades of International Contributions to Hydrogeological Related Subsidence Research and Knowledge Exchange. RAUGM2016, Puerto Vallarta, 30 October-4 November 2016.
- GALLOWAY D., BURBEY T. 2011 - Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal* 19 (8)
- HANSEN, R.F. 2001 - Satellite Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Springer Netherlands.
- HOOPER A., BEKAERT D., SPAANS K., and ARIKAN M. 2012 - Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517:1 – 13.
- HUANG B., SHU L., YANG Y.S. 2012 - Groundwater Overexploitation Causing Land Subsidence: Hazard Risk Assessment Using Field Observation and Spatial Modelling, *Water Resources Management*, vol. 26, p. 4225-4239.
- MOTYKA J., CZOP M., JOŃCZYK W., STACHOWICZ Z., JOŃCZYK I., MARTYNIAK R. 2007 - Wpływ głębokiej eksploatacji węgla brunatnego na zmiany środowiska wodnego w rejonie kopalni „Bełchatów”, „*Górnictwo i Geoinżynieria*” nr 31 (2), s. 477-487
- OKADA T. 2017 - Land Subsidence Management in Japanese Deltas. <http://www.delta-alliance.org/>
- OSMANOGLU B., SUNAR F., WDOWINSKI S., CABRAL-CANO E. 2016 - Time series analysis of InSAR data: Methods and trends, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115:90 – 102. Theme issue 'State-of-the-art in photogrammetry, remote sensing and spatial information science'.
- PASQUALI P., CANTONE A., RICCARDI P., DE FILIPPI M., OGUSHI F., TAMURA M., GAGLIANO S., 2015 - Monitoring Land Subsidence in the Tokyo Region with SAR Interferometric Stacking Techniques. In: Lollino G., Manconi A., Guzzetti F., Culshaw M., Bobrowsky P., Luino F. (eds) *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5*. Springer.
- SANDWELL D., MELLORS R., TONG X., WEI M., WESSEL P., 2011 - Open radar interferometry software for mapping surface deformation. *EOS Trans. Am. Geophys. Union* 92, 234 (2011).
- SOWTER A., AMAT M.B.C., CIGNA F., MARSH S., ATHAB A., ALSHAMMARI L., 2016 - Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. vol. 52.
- WALTHAM T., 2014 - Ground subsidence in Mexico City. *Mercian Geologist*. Vol 18, part 3.
- WILDERMUTH ENVIRONMENTAL, 2007 - MZ-1 Subsidence Management Plan, variously paginated. http://ayala.wildermuthenvironmental.com:8888/AyalaPark/documents/20071017_MZ1_Plan.pdf

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2018
Artykuł akceptowano do druku 17.12.2018