

Nowoczesne techniki satelitarne w badaniach deformacji powierzchni terenu

Modern satellite techniques in the study of mining area deformations



Dr hab. inż. Zbigniew Szczerbowski *)



Inż. Maciej Walicki*)

Treść: Wraz z postępem techniki wdrażane są nowe metody w ocenie deformacji powierzchni terenu. W pracy zaprezentowano nowe możliwości jakie dają techniki satelitarne. Przykładem jest zastosowanie techniki PS InSAR jako narzędzia do opisu przemieszczeń pionowych powierzchni terenu. Satelitarna interferometria radarowa w pewnych sytuacjach może uzupełniać pomiary niwelacyjne. Kolejny przykład to możliwości interpretacyjne przemieszczeń rejestrowanych na stacjach ASG-EUPOS. Ostatnia opisana technika pomiarowa ma na razie charakter przyszłościowy i dotyczy zmian w polu siły ciężkości, jako efektu w rozkładzie mas mierzonego w ramach misji satelitarnych. Poszukiwanie coraz to nowych rozwiązań w ocenie deformacji górotworu i powierzchni terenu daje nadzieję na ich pełniejszy opis, w tym wielkopowierzchniowych zmian fizycznych zachodzących w naruszonej eksploatacją górotworze.

Abstract: Along with the technological progress various methods applied in the estimation of terrain surface deformation. The paper presents new possibilities available by satellite techniques. For instance the PS InSAR technique is a tool for the determination of vertical displacements of the terrain surface. Satellite interferometry in certain situations can complete the leveling measurements. Another example refers to the possibilities in the interpretation of displacements that are determined in the stations of ASG-EUPOS. And finally, there is a technique, still a futuristic one – it deals with satellite observations of gravity changes as the effect of mass distribution. Finding new solutions for estimation of rock mass deformation and terrain surface gives expectation of more comprehensive description, including large area physical changes in rock mass affected by mining.

Key words:

deformacje powierzchni terenu, interferometria radarowa, stacje permanentne GPS/GNSS, grawimetryczne misje satelitarne

Słowa kluczowe:

mining area deformations, satellite interferometry, permanent stations GPS/GNSS, satellite gravimetric missions

1. Wprowadzenie

W artykule zaprezentowano nowe ujęcie istniejących i opisywanych już w literaturze polskiej zastosowań istniejących technik satelitarnych (PS InSAR, GNSS) oraz dodatkowo technikę przyszłości – „satelitarne pomiary grawimetryczne”. Wśród nich można wyszczególnić pomiary na stacjach permanentnych GPS/GNSS, gdzie analizowanie i interpretacja szeregów czasowych ciągów liczbowych jako niezależnych danych z obserwacji daje nowe możliwości interpretacyjne. Rozkłady

te są często efektem cyklicznych procesów, które normalnie nie przejawiają się w charakterystyce przemieszczeń punktów w pomiarach nieciągłych (sezonowych). Charakterystyka rozkładów czasowych to często efekt nie do końca zbadanych zjawisk i procesów związanych z kinematyką danego obszaru. Pomocne w ich wyjaśnieniu mogą być grawimetryczne pomiary satelitarne, prowadzone dla potrzeb oceny zmian zachodzących w polu fizycznym Ziemi – w polu siły ciężkości, które mogą mieć związek z przemieszczeniami na powierzchni terenu. Satelitarne pomiary grawimetryczne, dzięki którym powstają coraz to doskonalsze modele geoidy to wciąż jednak technika przyszłości. Zakończona misja GOCE,

*) Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH

wciąż trwająca jeszcze misja GRACE są zaledwie zwiastunem nowych rozwiązań jak w przypadku techniki GPS był system Transit (lata 70.).

Omówione dalej wyniki deformacji powierzchni terenu dla różnych obszarów pozyskane zostały dzięki wspomnianym technikom pomiarowym.

2. PS InSAR

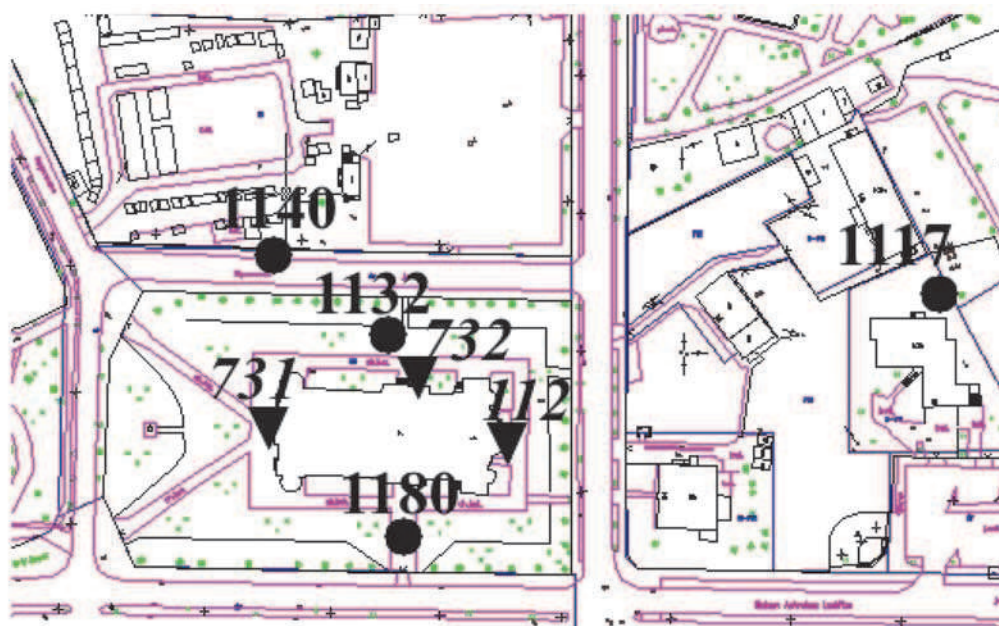
Nowe możliwości, jakie niosą techniki satelitarne, to przede wszystkim nowy typ danych, na podstawie których możliwa jest ocena np. przemieszczeń pionowych dla dużych obszarów. Stale rozwijająca się satelitarna interferometria radarowa, w tym technika PS InSAR daje nadzieję na pokonanie różnych wciąż istniejących ograniczeń (tempo osiadań, występowanie elementów odbijających itp.) i możliwości zastosowania w celach geodezyjnych jak np. w odpowiednio precyzyjnym opisie deformacji powierzchni na terenach górniczych. Stąd istotne są prace poświęcone analizie porównawczej wyników pomiarów przemieszczeń uzyskanych dzięki technice PS InSAR z wynikami metod klasycznych, chociaż dokładniejszych, to mających również pewne ograniczenia. Istnieje już dość bogata literatura krajowa poświęcona zastosowaniu tej techniki w badaniach deformacji terenów górniczych, niektóre pozycje były publikowane również na łamach „Przeglądu Górniczego” [4,6,7]. Wspomniane prace koncentrują się na rozkładach przemieszczeń pionowych na dużych obszarach, dając pogląd na ogólny obraz osiadań. Zaprezentowane wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych realizowanych techniką PS InSAR zostały odniesione do wyników pomiarów niwelacyjnych. Przedstawiony materiał badawczy powstał w współpracy z Państwowym Instytutem Geologicznym w ramach projektu badawczego PIG PIB Nr 61.9202.1101.00.0.

Zakończenie eksploatacji górniczej, likwidacja kopalni „Solno” w Inowrocławiu, ostateczne zatopienie wyrobisk w 1991 r. spowodowało stopniowe wygaszanie obserwowanych przez kilkadziesiąt lat osiadań powierzchni terenu miasta aż do ich zaniku. Ostatnie pomiary niwelacyjne osnowy

kopalnianej z 1995 r. zlecone przez kopalnię (Inowrocławskie Kopalnie Soli) wykazały już tylko nieznaczne przemieszczenia pionowe reperów, często na pograniczu dokładności obserwacji. Sytuację tę obrazuje wykres wybranych 3 reperów zastablizowanych na budynku kościoła p.w. Zwiastowania NMP (rys. 1). Pomiary niwelacyjne realizowane przez AGH w latach 2002-2010 wykazały odwrócenie wieloletniej tendencji i dodatnie wartości przemieszczeń pionowych w północnej części miasta, co najprawdopodobniej jest efektem ruchu wysadowego złoża. Pomiedzy 1995 i 2002 rokiem jest jednak pewna luka czasowa w pomiarach niwelacyjnych. Zakładając liniowy trend procesu przemieszczania reperów, można wyznaczyć wartości przemieszczeń w latach, gdy obserwacje niwelacyjne nie były prowadzone. Jednak w tym przypadku możliwe wykorzystanie danych teledetekcyjnych uzyskanych metodą interferometrii radarowej (InSAR). W przeciwieństwie do metody interferogramów różnicowych metoda PSI pozwala na badanie wartości przemieszczeń niewielkich i powolnych [7,8], czyli takich, które towarzyszą zwykle eksploatacji złóż soli. W przypadku Inowrocławia przemieszczenia powierzchni terenu są również efektem działania różnych procesów geologicznych, w tym ruchu wysadowego.

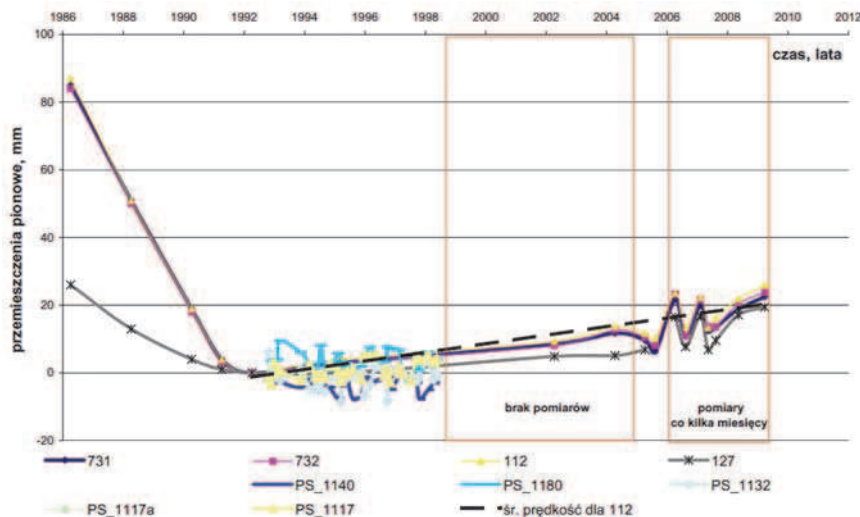
W ramach projektu „Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji mobilności terenu nad wysadem solnym (rejon Inowrocławia)” wykonano identyfikację kilku tysięcy punktów, z czego część znajduje się w obrębie byłego obszaru górniczego w Inowrocławiu [8]. Wśród nich są również takie, które zlokalizowane są w sąsiedztwie budynku kościoła pw. Zwiastowania NMP w odległości nie większej niż 300 m (rys. 1).

Materiał pomiarowy z lat 90. pozwolił na uzyskanie przemieszczeń pionowych tych punktów, także w latach, gdy nie były prowadzone pomiary niwelacyjne. W ten sposób możliwe było uzupełnienie rozkładów przemieszczeń z niwelacji i weryfikację precyzji techniki PSI. Problematyka deformacji terenu w rejonie omawianego obiektu były omawiane m.in. w pracach [9,10]. Charakterystyczne jest dla niego nierównomiernie osiadanie poszczególnych części, co prawdopodobnie jest przyczyną nachylenia obiektu w kierunku zachodnim. Podobne zróżnicowane tempo prędkości przemieszczeń wykazywały punkty PS (rys. 2).



Rys. 1. Szkic rozmieszczenia reperów niwelacyjnych oraz punktów PSI w rejonie kościoła pw. Zwiastowania NMP w Inowrocławiu

Fig. 1. Draft of location of benchmarks and PSI points in the area of the church of Annunciation to the Blessed Virgin Mary in Inowrocław



Rys. 2. Przemieszczenia pionowe reperów oraz punktów PSI w rejonie kościoła pw. Zwiastowania NMP w Inowrocławiu

Fig. 2. Vertical displacements of benchmarks and PSI points in the area of the church of Annunciation to the Blessed Virgin Mary in Inowrocław

Chociaż odchylenia standardowe dla każdego z tych punktów są znaczne (ok. 3-4 mm), to średnia wartość prędkości w okresie 1993-1997 jest zbliżona do tej uzyskanej z pomiarów niwelacyjnych z okresu 1995-2002 (dla punktów PS ok. 0.4 mm/r., w przypadku niwelacji – 0.7 mm/r.). Jednak, jak wynika z rozkładu przemieszczeń pionowych punktów PS, w roku 1995 nastąpiło odwrócenie tendencji i przemieszczenia pionowe zmieniły kierunek. Jednocześnie rozkład punktów PS (szczególnie, jeżeli rozważyć uśrednione wartości przemieszczeń analizowanych punktów) w dużym stopniu „wpisuje się” w rozkład przemieszczeń pionowych reperów niwelacyjnych w okresie braku pomiarów (rys. 2).

3. Pomiary permanentne GPS/GNSS

Istotnym atutem w pomiarach przemieszczeń powierzchni terenu z zastosowaniem techniki PSI jest stosunkowo wysoka częstość obserwacji (dla satelity ERS 35 dni). Jednak w badaniach środowiskowych istotne jest wykazanie wpływu różnych czynników (w tym sezonowych) na obraz deformacji powierzchni terenu, co często wymaga prowadzenia ciągłych obserwacji. Temu służy zakładanie stacji lub sieci stacji permanentnych GPS/GNSS. Oczywiście technika satelitarna GPS nie jest już najnowocześniejszą z technik pomiarowych, jednak pomiary prowadzone na permanentnych stacjach ww. systemu od zaledwie kilku lat dostarczają informację o nowej jakości. Trzeba pamiętać, że w przypadku pomiarów ciągłych przyjmuje się zwykle 5-letni okres jako wyjściowy do przeprowadzenia wiarygodnych analiz w zakresie regionalnych ruchów podłoża. Taki właśnie przedział czasowy minął niedawno od inicjacji systemu ASG EUPOS. Na obszarze Górnego Śląska zlokalizowane są 3 stacje tego systemu: Katowice, Tarnowskie Góry i Wodzisław. Rejestrowane od 2008 r. współrzędne stacji pozwalają na określenie ich prędkości przemieszczeń w układzie ETRF2000 oraz zaburzeń niezwiązanych z wieloletnim trendem. Na rys. 3 przedstawione zostały wektory oraz wartości prędkości przemieszczeń poziomych. Największe tempo ruchu wykazuje stacja w Tarnowskich Górach – 4.5 mm/r. Pozostałe stacje wykazują nieco niższe tempo: Wodzisław 3.5 m/r i Katowice 2.5 mm/r. (rys. 3). Wyjaśnienie kierunku i prędkości ruchu tych stacji

wymaga odrębnej, szczegółowej analizy. Utrzymujące się przez kilka lat tempo nie wskazuje na znaczącą rolę wpływów prowadzonej aktualnie eksploatacji, a głównej przyczyny ruchu należy raczej doszukiwać się w uwarunkowaniach geologicznych. Potwierdzać to mogą kierunki wektorów zorientowane ku centralnej części GZW.



Rys. 3. Wektory przemieszczeń poziomych stacji ASG-EUPOS w GZW (w lokalnym układzie współrzędnych). Objaśnienia w tekście (opracowano na podkładzie Google Earth).

Fig. 3. Vectors of horizontal displacements of ASG-EUPOS stations in Upper Silesian Coal Basin (in local coordinate frame). Description in the text (background based on Google Earth)

4. Badania deformacji metodą grawimetrii satelitarnej

Jedną z metod wykrycia deformacji (w szczególności nieciągłych) oraz jej prognozowania są pomiary grawimetryczne. Zakres zastosowań w górnictwie polskim metody

grawimetrycznej, a w szczególności mikrograwimetrii jest unikatowy w skali światowej [1]. Jednak w ostatnich latach na szczególne zainteresowanie zasługują techniki satelitarne w badaniach zarówno pola siły ciężkości, jak również zmian w nim zachodzących. W tym celu wykonane zostały misje satelitarne CHAMP oraz GRACE. Jednakże rozdzielczość przestrzenna utworzonych modeli na podstawie pozyskanych danych nie pozwoliła na utworzenie dokładnych modeli geoidy, które mogłyby odzwierciedlać regionalne zmiany w górotworze. Znacząca zmiana nastąpiła w ramach realizowanej przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) misji GOCE (*Gravity field and steady - state Ocean Circulation Explorer*). Przyjmuje się, że misja pozwoliła na rozszerzenie informacji w dziedzinach oceanografii, zagadnieniach fizyki Ziemi, jak również geodezji. Dane zaobserwowane przez satelitę są aktualnie przetwarzane przez różne instytuty w celu uchwycenia zmian w polu siły ciężkości Ziemi. Jednym z najciekawszych zjawisk uchwyczonych przez satelitę było trzęsienie ziemi w Japonii, gdzie amplituda drgań spowodowana tym zjawiskiem wywołała perturbację orbity satelity [2]. W ten sposób ustalono wielkość propagacji fali dźwiękowej wygenerowanej przez trzęsienie ziemi oraz ustalono wartości metryczne wychylenia satelity GOCE na zadanej trajektorii. Dodatkowo naukowcy z Niemieckiego Instytutu Badań Geodezyjnych (DGFI) w Monachium na podstawie analizy składowych gradientu grawitacji zinterpretowali wielkość zmian pola grawitacyjnego jakie zaistniało po trzęsieniu ziemi w Fukushima w 2011 [14]. Jednak z punktu widzenia badań deformacji powierzchni terenu bardziej istotna jest ocena przemieszczeń pionowych lub zmian w rozkładzie mas na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej. Takie badania z zastosowaniem satelitów grawimetrycznych były prowadzone w związku z zmianami hydrologicznymi, tj.: magazynowanie wód, ich obieg oraz dynamiczna topografia mórz i oceanów [13].

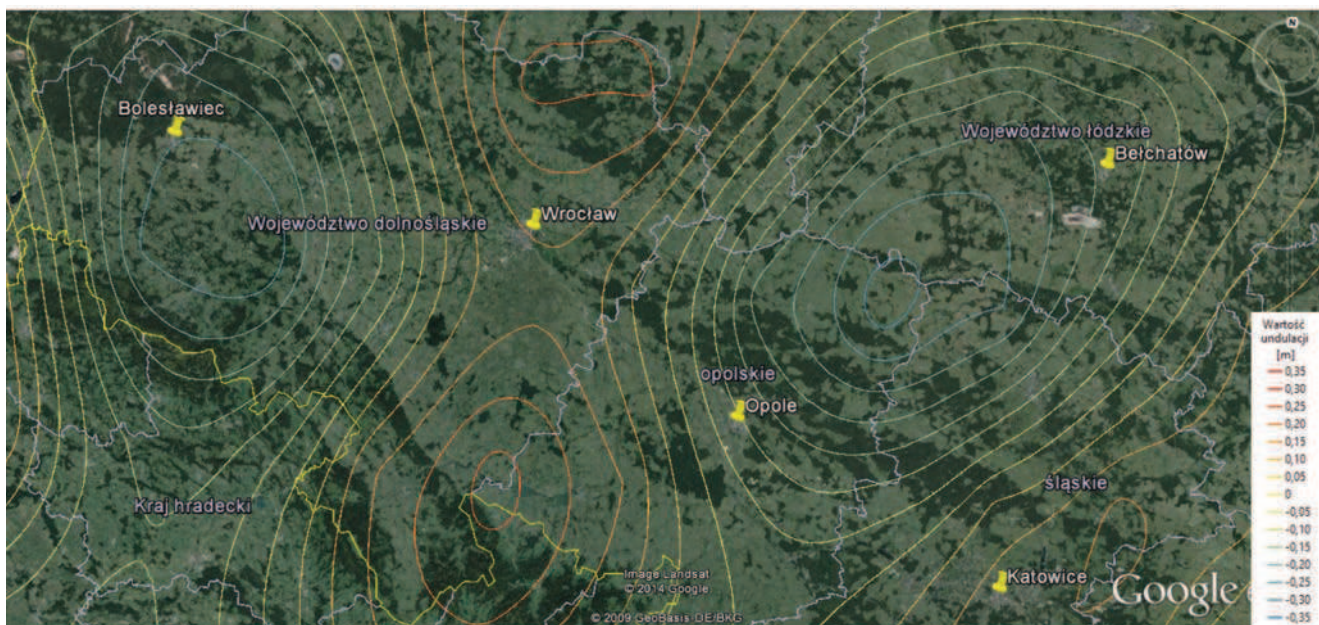
W przeprowadzonych badaniach wykorzystano dwa modele geoidy powstałe z rozwinięcia funkcji harmonii sferycznej. Oba rozwiązania zostały opracowane na podstawie podejścia czasowego TIM (*Time Wise Approach*), wykorzy-

stując wyłącznie dane z pomiarów satelity GOCE. Pierwszy model (TIM 4 - czwarte rozwiązanie danych GOCE) powstał w oparciu o pomiary wykonane w okresie od listopada 2009 roku do czerwca 2012 roku, charakteryzując się rozdzielczością przestrzenną bliską 80 km. Drugi model TIM 2 powstał na podstawie obserwacji z zakresu od listopada 2009 roku do lipca 2010 roku, charakteryzując się rozdzielczością zbliżoną do modelu TIM 4).

W pierwszej części interpretacji poddano analizie rozkład undulacji uzyskanej z dwóch rozwiązań (undulacja stanowi odstęp pomiędzy geoidą przedstawiającą rzeczywisty kształt Ziemi, a przyjętą elipsoidą odniesienia dla Ziemi). Na rys. 4 przedstawiono zmianę wartości undulacji N pomiędzy dwoma modelami w okresie bliskim dwóch lat. Wartości te można przyrównać ze zmianami zachodzącymi w górotworze. Deficyt mas ziemskich (wydobycie złóż kopalin, ich składowanie) powodują zaburzenia wartości gradientu grawitacji, który będzie wpływał na zmniejszenie wartości undulacji, w rejonach wydobywczych.

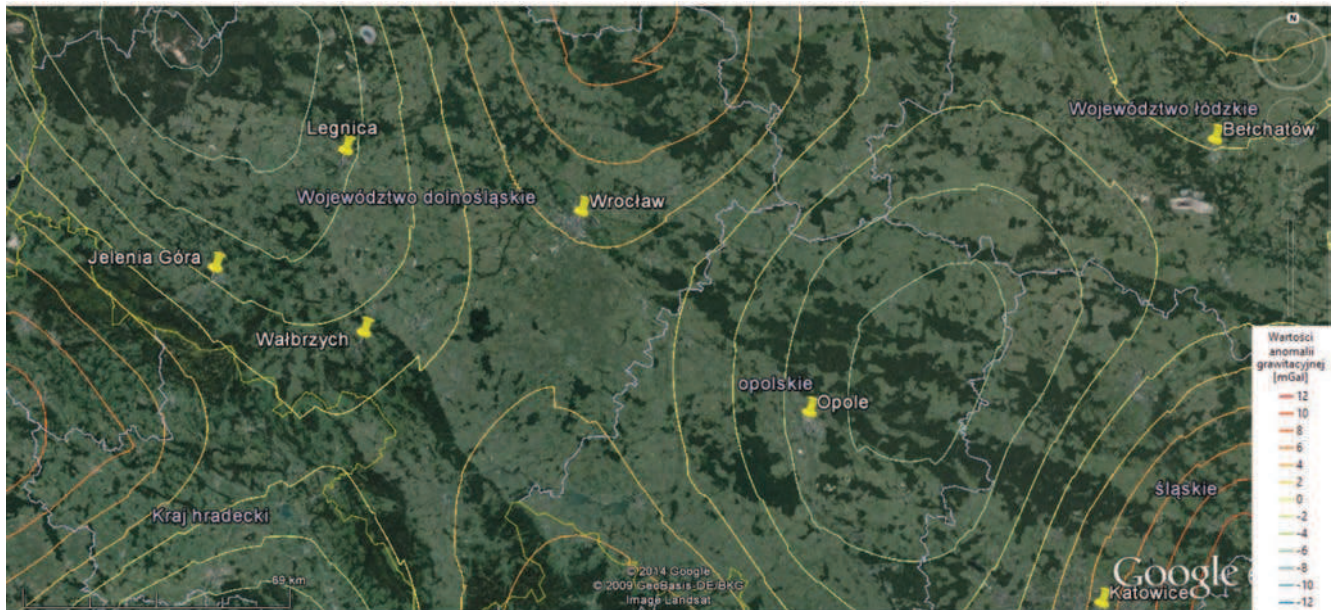
Kolorem niebieskim przedstawiono ujemne zmiany tego odstepu, natomiast kolorem czerwonym jego wzrost. W obszarze województwa dolnośląskiego zauważalne są obniżenia wartości odstepu. Przedstawione zobrazowanie zmian undulacji nie oddaje w pełni charakterystyki zaistniałego zjawiska. Ma to związek z obserwacjami wykonanymi przez satelitę GOCE, który z każdym przelotem zwiększa pokrycie terenu pomiarami, jednak nie w tym samym miejscu. Powoduje to duże trudności w interpretacji sygnału, a wprowadzona regularyzacja modelu wpływa dodatkowo na zaburzenie rozkładu danych poprzez tworzenie nagłych zmian wartości undulacji.

Podobne zmiany można zaobserwować przy badaniu rozkładu anomalii grawitacyjnej (rys. 5). Jak wiadomo, wartość ta jest w szczególności związana z gęstością mas zaburzających ziemskie pole grawitacyjne. Wydobycie złóż kopalin ma wpływ na strukturę górotworu poprzez zmniejszenie gęstości warstw skalnych. Gęstość oraz rozmiar warstw skalnych ma znaczący wpływ na zaburzenie gradientu grawitacji. Dlatego usunięcie mas powoduje zmniejszenie się wartości anomalii grawitacyjnej oraz regularyzację anomalii poprzez zwiększe-



Rys. 4. Rozkład różnic undulacji utworzony na podstawie modeli TIM 4 i TIM 3 na podstawie misji GOCE (opracowano na podkładzie Google Earth).

Fig. 4. Distribution of changes in undulation based on models TIM 4 and TIM 3 derived from GOCE mission (background based on Google Earth)



Rys. 5. Rozkład różnicy anomalii grawitacyjnej utworzony na podstawie rozwiązania danych czasowych TIM satelity GOCE (opracowano na podkładzie Google Earth)

Fig. 5. Distribution of gravity anomaly based on temporal solution TIM of GOCE satellite (background based on Google Earth)

nie jej wartości pomiędzy regionami ujemnymi. Podobnie jak w przypadku zmiany wartości undulacji barwą niebieską zaprezentowano warstwicę o wartościach ujemnych, natomiast barwą czerwoną wartości dodatnie zmiany anomalii grawitacyjnej.

Przedstawione wyniki zostały opracowane w porozumieniu z Europejską Agencją Kosmiczną, która stara się wyjść naprzeciw zapotrzebowaniu różnym dziedzinom nauki, jak również przedsiębiorców. Polska działa w porozumieniu z ESA poprzez Ministerstwo Gospodarki lub przez zgłaszanie własnych propozycji projektów, jak choćby *Copernicus Masters*. Proponuje się, aby przedsiębiorcy zwrócili uwagę na techniki satelitarne oraz możliwości ich zaimplementowania w różnych gałęziach przemysłu.

5. Podsumowanie

Wszystkie przedstawione techniki satelitarne w mniejszym lub większym stopniu są już wykorzystywane w pomiarach niezbędnych do ochrony terenów górniczych. PS InSAR jest nowym algorytmem do określania obniżek, a szczególnie prędkości osiadań, wzdłuż zakładanych linii obserwacyjnych. Jak już wspomniano, niwelacja nie obejmuje całego obszaru na dany okres pomiarowy, natomiast zdjęcia satelitarne są archiwizowane i zawsze dostępne do określenia wielkości deformacji terenu (z uwzględnieniem rozdzielczości czasowej rzędu 30 dni). Do obserwacji obszarów górniczych wymagane są minimum pięcioletnie obserwacje wykonane przez stację GPS do ustalenia jej trendu oraz redukcji szumów. Natomiast satelitarne pomiary grawimetryczne, jak dotąd nie były wprowadzane do zagadnień związanych z ochroną terenów górniczych ze względu na małą rozdzielczość modeli (GRACE powyżej 150 km, GOCE nawet do 80 km - obszar). Można przyjąć, że satelitarne pomiary grawimetryczne są dopiero w fazie próbnej. Testuje się różne sposoby pomiaru, otrzymując coraz to lepsze wyniki i rozdzielczości. Te zupełnie nowatorskie badania – podobnie jak to było w przypadku techniki GPS – cechuje burzliwy rozwój, a kolejne planowane misje dostarczą danych o rozdzielczości pozwalających na analizy

lokalnych zmian w rozkładzie mas, które mają miejsce np., w przypadku prowadzonej eksploatacji górniczej.

Europejska Agencja Kosmiczna przymierza się do realizacji kolejnego projektu o podobnej tematyce, przyjmując różnego rodzaju propozycje zastosowania nowego satelity. Możliwe, że następna tego rodzaju misja pozwoli na uzyskanie większej rozdzielczości, oraz umożliwi badanie zmian przyspieszenia siły ciężkości nie tylko w aspekcie globalnym, ale również lokalnym. Pozwoli to na uzyskanie dokładnego zobrazowania zachodzących zjawisk związanych z deformacją terenów górniczych.

Praca wykonana w ramach badań statutowych Akademii Górniczo-Hutniczej nr 11.11.150.195

Literatura

1. Fajkiewicz Z.: Grawimetria stosowana. Wydawnictwo AGH, Kraków 2007.
2. Garcia Raphael F.: GOCE: The first seismometer in orbit around the Earth" Geophysical Research Letters, Vol. 40, 2013.
3. Łyszkowicz A.: Geodezja fizyczna. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie. Olsztyn 2012.
4. Krawczyk A., Perski Z. Doświadczenia wykorzystania technologii Permanent Scatters InSAR (PSI) do monitoringu deformacji terenów górniczych. „Przeгляд Górniczy”, 2010, nr 10, s. 150-155.
5. Meijde M. van der: Goce data, models, and applications: A review. Int. J. Appl. Earth Observ. and Geoinf., 2013.
6. Perski Z.: Osiedlenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). „Przeгляд Geologiczny”, 1999, nr 2, s. 171-174.
7. Perski Z., Mróz M. Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt GEO-IN-SAR. W: Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji, t. 17, 2007. s. 613-624.
8. Piątkowska A., Surala M., Perski Z., Graniczny M.: Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji mobilności form solnych centralnej Polski na przykładzie wysadu solnego Inowrocław.

- „Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego”. 2012. nr 452, s. 237–244.
9. *Szczerbowski Z.*: Górnictwo-geologiczne uwarunkowania uszkodzeń budynku kościoła p.w. Zwiastowania NMP w Inowrocławiu. *Geodezja, półrocznik AGH*, t. 9 z. 2/1 2003. Ss.529-536.
 10. *Szczerbowski Z., Gawalkiewicz R.*: Użyteczność geodezyjnych pomiarów w diagnostyce zabytkowych obiektów na przykładzie kościoła w Inowrocławiu. „*Przegląd Budowlany*” 2005. s. 22-28.
 11. The European GOCE Gravity Consortium EGG-C „GOCE High Level Processing Facility Technical Note. Product Acceptance Review (PAR) - Level 2 Product Report”. 2012.
 12. www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE (stan na dzień 03.04.2014)
 13. Wahr J. et al. „Time-variable gravity from GRACE: First results” *Geophysical Research Letters* Volume 31, Issue 11, June 2004.
 14. *Zhang Yong-zhi et al.* Gravity anomaly from satellite gravity gradiometry data by GOCE in Japan Ms9.0 strong earthquake region» *Procedia Environmental Sciences* 10, 2011. Pp. 529–534.
-
-