

Hydrogeologiczne przyczyny zmian przyspieszenia siły ciężkości na stanowisku w Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnym w Józefosławiu

Tomasz Olszak¹, Marcin Barlik¹, Andrzej Pachuta¹

Hydrogeological influences in the absolute gravity changes at Astro-Geodetic Observatory in Józefosław. Prz. Geol., 65: 1139–1143.

Abstract. The article presents the results of measurements of gravity performed in the Astronomical and Geodetic Observatory Józefosław. Time series have been verified for parameters related to celestial bodies, atmospheric pressure changes and metrological factors. The analysis of these changes includes geodynamic and hydrological aspects taking into account global and local changes in groundwater levels. The aim of the article is to indicate the interpretation of contemporary measurements of gravity field against the contemporary accuracy of such measurements and to indicate the need for information on the level of groundwater (collected by the Polish Hydrogeological Survey) in procedures for the elaboration and interpretation of gravimetric measurements and support from hydrogeologists. Contemporary the gravity measurements with use of absolute gravimeters gives possibility determination of gravity value with uncertainty of the order 10^{-8} ms^{-2} . Such accuracy corresponds to a vertical displacement of a point of less than 1 cm or a change in the water level of 2.5 cm. Use of gravimetric methods in the broadly understood Earth sciences must be supported by information related to changes in mass distribution around the measuring station, mainly related to the groundwater level changes. This allows to see the role of hydrogeological information related to the monitoring of groundwater as an indispensable information describing changes in the Earth's gravity field.

Keywords: absolute gravimetry, gravity field, Bouguer plate, hydrogeological effect

W obserwacjach natężenia pola siły ciężkości Ziemi aktualnie wykorzystuje się grawimetry pozwalające na osiągnięcie dokładności pomiaru rzędu 10^{-8} ms^{-2} . Jest to współczesna granica precyzyjności grawimetrów absolutnych, wyznaczających przyspieszenie siły ciężkości metodami balistycznymi. Taka dokładność odpowiada pionowemu przemieszczeniu punktu o niecały 1 cm lub zmianie poziomu lustra wody o 2,5 cm. Szereg efektów wpływających na zmiany pola siły ciężkości, głównie pływowych (oddziaływanie Słońca i Księżycy), atmosferycznym (wahania ciśnienia atmosferycznego) oraz zmiany orientacji osi obrotu Ziemi, a nawet zmiany wilgotności w przypowierzchniowych warstwach Ziemi (do głębokości 1,5 m) są z dużą dokładnością modelowane i wprowadzane do wyników pomiarów grawimetrycznych jako poprawki. Z tego punktu widzenia wykorzystanie metod grawimetrycznych w szeroko pojętych naukach o Ziemi musi być wsparte informacjami związanymi ze zmianami rozkładu mas wokół stanowiska pomiarowego, głównie z wahaniami poziomu wód gruntowych. Pozwala to widzieć rolę informacji hydrogeologicznej, powiązanej z monitorowaniem stanu wód podziemnych, jako niezbędną informację opisującą zmiany pola siły ciężkości Ziemi. Efekt ten jest ważny nie tylko z punktu widzenia metod grawimetrycznych, ale poprzez swoje oddziaływanie na deformację powierzchni Ziemi i zmianę potencjału grawitacyjnego, również dla obserwacji o charakterze geometrycznym (niwelacji precyzyjnej, pomiarów technologiami GNSS i pomiarów inklinometrycznych). Celem jest wskazanie możliwości interpretacyjnych współczesnych pomiarów natężenia pola siły ciężkości na tle aktualnej dokładności takich pomiarów oraz zasygnalizowanie potrzeby zaistnienia informacji dotyczącej poziomu wód gruntowych (gromadzonej przez państwową służbę hydrogeologiczną) w procedurach opracowania i interpretacji pomiarów grawimetrycznych, a przy tym wsparcia ze strony hydrogeologów.

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów natężenia pola siły ciężkości wykonanych w Obserwatorium Astro-

nomiczno-Geodezyjnym w Józefosławiu. Szeregi czasowe zweryfikowano o parametry związane z oddziaływaniem ciał niebieskich, zmian ciśnienia atmosferycznego oraz wzięto pod uwagę czynniki metrologiczne, wynikające z międzynarodowych i lokalnych mitingów kalibracyjnych grawimetrów. Analiza tych zmian obejmuje aspekty geodynamiczne i hydrologiczne uwzględniające globalne i lokalne zmiany poziomu wód gruntowych.

POMIAR NATĘŻENIA POLA SIŁY CIĘŻKOŚCI I DOKŁADNOŚĆ JEGO WYZNACZENIA

Pomiary grawimetryczne mają na celu określenie wartości wektora przyspieszenia siły ciężkości Ziemi w funkcji miejsca obserwacji i czasu. Najczęściej w tym celu wykorzystuje się aparaty absolutne balistyczne. Zasada działania grawimetru balistycznego wykorzystuje ruch masy próbnej w polu siły ciężkości, bowiem jest obserwowany swobodny spadek masy próbnej w komorze próżniowej. Wyznaczenie wartości przyspieszenia siły ciężkości bazuje na wykorzystaniu równania drogi w niejednorodnym polu siły ciężkości. Obserwowane są w tym celu droga i czas spadku masy próbnej w postaci zwierciadła geodezyjnego z wykorzystaniem interferometrii laserowej, wspartej zegarem atomowym. Stąd też uzyskuje się wyniki przyspieszenia siły ciężkości bezpośrednio w układzie jednostek SI (Timmen, 2010). Potwierdzona podczas synchronicznych pomiarów kalibracyjnych precyzyjność wyznaczenia pionowej składowej przyspieszenia siły ciężkości współczesnych grawimetrów jest scharakteryzowana błędem średnim ok. $2 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ ($2 \mu\text{Gal}$). Dokładność ta uwzględnia nie tylko czynniki instrumentalne, ale również te, które są związane z dokładnościami wprowadzanych poprawek do pomierzonej wartości przyspieszenia.

Obserwacje wykonywane grawimetrem absolutnym są stosunkowo czasochłonne, bowiem typowa sesja składa się z 12–48 serii obserwacyjnych powtarzanych co godzinę.

¹ Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska, Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa; tomasz.olszak@pw.edu.pl.

Zwykle stosuje się pełną dobową sesję obserwacyjną, czyli 24 serie. Sam instrument, poprzez swoją wagę i wymagania co do stabilności termicznej w pomieszczeniu, jest też mało mobilny, zatem wykorzystuje się go jedynie w miejscach do tego przygotowanych. Wyznaczona na podstawie równania drogi wartość przyspieszenia nie uwzględnia wielu czynników powodujących krótko- lub długookresowe zmiany przyspieszenia (wywołane przez różnice grawitacyjnego wpływu ciał niebieskich, wahnięcia ciśnienia atmosferycznego, położenie bieguna itp.). Wpływ każdego z tych efektów należy wprowadzić do obserwowanej wartości przyspieszenia jako poprawkę. Standardowo stosuje się następujący zestaw poprawek:

- poprawkę pływową litosferyczną – związaną ze zmianą położenia Słońca i Księżyca, a co za tym idzie, zmianą ich grawitacyjnego oddziaływania;

- poprawkę pływową oceaniczno-obciążeniową – związaną z pływopochodnymi przemieszczeniami mas wody mórz i oceanów oraz ich grawitacyjnym oddziaływaniem;

- poprawkę barometryczną – odnoszącą wyznaczaną ciężkość do nominalnej (normalnej) wartości ciśnienia atmosferycznego, będącej funkcją wysokości punktu;

- poprawkę ze względu na ruch bieguna – uwzględniającą zmiany położenia osi obrotu Ziemi w stosunku do bieguna konwencjonalnego, a tym samym zmiany ciężkości wywołane zmianami przyspieszenia odśrodkowego;

- redukcję przyspieszenia na wybrany poziom odniesienia – w której wyznaczane grawimetrem przyspieszenie jest odniesione do początku drogi spadku, czyli dla grawimetru balistycznego nawet do wysokości ok. 130 cm nad znakiem pomiarowym. Redukcja na wybrany poziom odniesienia wymaga znajomości rzeczywistego (naturalnego) gradientu przyspieszenia siły ciężkości;

- poprawki instrumentalne – związane z układem optycznym interferometru, masą własną instrumentu i transferem czasu oraz sygnału interferometru.

Obserwowana wartość przyspieszenia jest korygowana wymienionymi poprawkami, wyznaczanymi na podstawie obserwacji dodatkowych elementów lub matematycznych modeli. Analiza dokładności pomiaru serii obserwacyjnej wykorzystuje wyniki analizy statystycznej obserwacji oraz niepewności wyznaczenia poprawek do obserwowanej wartości g . Takie podejście powoduje, że pojęcie błędu wyznaczenia wartości mierzonej, wywodzące się jedynie z analizy statystycznej obserwacji, jest uzupełnione w myśl procedur szacowania niepewności pomiaru, stosowanych w metrologii. Sposób postępowania zgodny z metodami przyjętymi w publikacji *Guide to the Expression of Uncertainty In Measurement*, zaprezentowanej po raz pierwszy w 1993 r. przez Międzynarodowe Biuro Miar w Paryżu (BIPM) i przyjętej przez polską służbę metrologiczną (ISO, 1995; GUM, 1999), prowadzi do uzyskania całkowitej niepewności rzędu $1,8\text{--}2,2 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$, dla standardowej dobowej serii obserwacyjnej wyznaczającej wartość przyspieszenia siły ciężkości w punkcie na fizycznej powierzchni Ziemi (Olszak, 2011).

ANALIZA WPŁYWU HYDROLOGICZNYCH I HYDROGEOLOGICZNYCH CZYNNIKÓW ŚRODOWISKOWYCH

Zmiany natężenia pola siły ciężkości, wynikające z globalnych efektów geofizycznych i geodynamicznych, są w pewnej części eliminowane poprzez wprowadzenie

wymienionych poprawek. Mają one wspólną cechę bowiem można je określić jako czynniki globalne, systematyczne i opisane pewnymi modelami wpływu na przyspieszenie siły ciężkości. Skoro wartość przyspieszenia po tych korektach jest niejako „wyczyszczona” z wpływów globalnych elementów pojawia się inny przedmiot interpretacji zmian przyspieszenia, wynikający z aspektów przemieszczenia stanowiska (zmiany odległości od środka mas Ziemi) lub zmiany rozkładu mas wokół stanowiska. Niekiedy oba te efekty mogą się dublować lub wzajemnie znosić. Przemieszczenie punktu jest jednak dokładniej wyznaczane na podstawie metod obserwacji geodezyjnych (GNSS i niwelacja) i może zostać w ten sposób odseparowane od sygnału zmian przyspieszenia, wynikających ze zmian rozkładu mas wokół stanowiska badawczego (Kowalczyk, 2006). W ujęciu lokalnym, w otoczeniu stanowiska badawczego za zmiany natężenia pola siły ciężkości odpowiadają wówczas zmiany rozkładu mas, interpretowanych głównie ze zmianą zwierciadła wód gruntowych, wilgotności gruntu oraz ewentualnej warstwy śniegu. Odpowiednie rozpoznanie i modelowanie zjawisk środowiskowych jest niezwykle ważne przy obserwacjach związanych z ciągłym lub okresowym monitoringiem grawimetrycznym, gdyż wpływ tych zjawisk może sięgać nawet dziesiątek mGal (rzędu 10^{-7} ms^{-2}).

Najprostszym i najczęściej stosowanym modelem matematycznym związanym z wpływem zmian w rozkładzie mas jest przedstawienie ich w postaci płaskiej płyty Bouguera i zastosowanie tzw. redukcji Bouguera, która jest używana do usunięcia wpływu przyciągania mas na wartość przyspieszenia siły ciężkości. Zakładając, że pod punktem pomiarowym znajduje się masa o gęstości σ [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$] w postaci walca o wysokości H [m] o średnicy dążącej do nieskończoności, to zmiana wartości przyspieszenia siły ciężkości w punkcie wyniesie:

$$dg = 2 \pi G \sigma H = 0,00419 \sigma H [\mu\text{ms}^{-2}]$$

Dla wynoszącego 1 m wzniosu zwierciadła wody ($H = 1 \text{ m}$), pojawiającego się pod punktem pomiarowym, bez uwzględnienia porowatości warstwy wodonośnej, zmiana wartości przyspieszenia wynosi $42 \mu\text{Gal}$ ($4,2 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-2}$). Przy porowatości równej 50% zmiana lustra wody o tej samej wysokości skutkuje połową wartości wymienionego przyrostu przyspieszenia siły ciężkości.

Z punktu widzenia źródeł wpływu zmian warunków hydrologicznych i hydrogeologicznych na wartość przyspieszenia siły ciężkości należy rozróżnić:

- wpływ mas grawitacyjnych śniegu charakteryzujących się w stosunkowo płaskim terenie możliwością interpretacji jako płyty bouguerowskiej;

- zmiany hydrologiczne w przypowierzchniowych warstwach Ziemi uwzględniane w tzw. globalnych modelach hydrologicznych czyli zgeneralizowanych i uśrednionych zawartościach ekwiwalentu wód gruntowych jako miernik wilgotności (Guntner i in., 2007; Sood, Smakhtin, 2015);

- wpływ wahań poziomów wód gruntowych, jako uproszczony model wynikający z obserwacji zmian rejestrowanych w piezometrze nieopodal punktu grawimetrycznego.

Każdy z tych elementów wymaga dodatkowych obserwacji i założeń, jednak z punktu widzenia istotności dominuje czynnik hydrogeologiczny, którego uwzględnienie

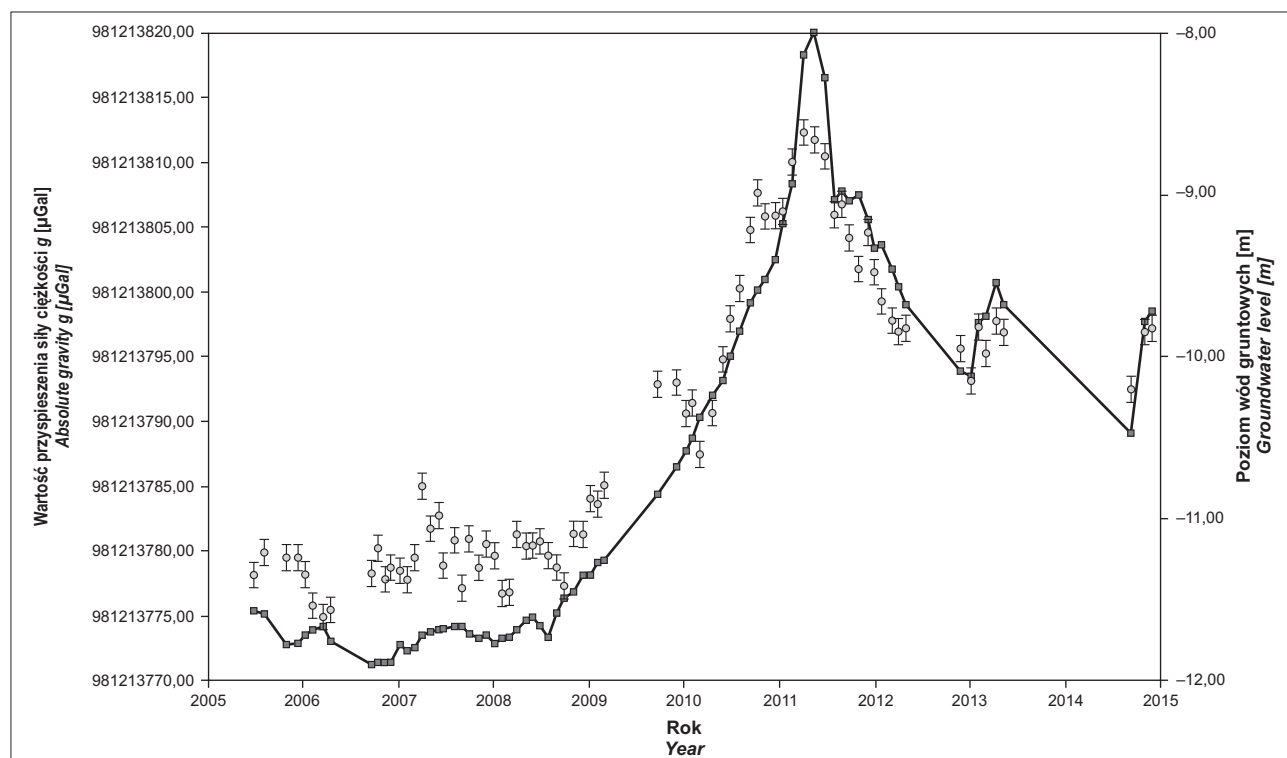
wymaga zastosowania dodatkowych sensorów w postaci piezometru (piezometrów) i dodatkowego aparatu interpretacyjnego.

WPLYW ZMIAN LOKALNYCH WARUNKÓW HYDROLOGICZNYCH NA WYNIKI OBSERWACJI GRAWIMETRYCZNYCH WYKONYWANYCH W OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNO-GEODEZYJNYM W JÓZEFOSŁAWIU

Badania zmian absolutnej wartości przyspieszenia siły ciężkości na punkcie zlokalizowanym w Laboratorium Grawimetrycznym Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego w Józefosławiu są prowadzone od czerwca 2005 r. Obserwatorium dysponuje unikalną w skali Polski, ponad dziesięcioletnią serią obserwacyjną wyznaczeń „quasi-permanentnych” prowadzonych systematycznie w interwałach ok. jednego miesiąca. Wyznaczenia są wykonywane przy użyciu grawimetru FG-5 No. 230 firmy Micro-g Solutions Inc. Instrument ten umożliwia wyznaczenie z jednodobowych obserwacji wartości natężenia siły ciężkości z błędem średnim rzędu $2 \cdot 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$. Obserwacje są wykonywane na podstawie identycznego w każdej epoce reżimu sesji obserwacyjnej i opracowania wyników – każda sesja obserwacyjna jest wykonywana w dobowym cyklu obejmującym minimum 24 serie obserwacyjne. Oprócz absolutnych i względnych obserwacji grawimetrycznych w Laboratorium wykonuje się również pomocnicze obserwacje monitorujące zmianę warunków środowiskowych wokół stanowisk grawimetrycznych. Wśród nich należy wymienić pomiary zwierciadła wody gruntowej w pierwszym poziomie wodonośnym na głębokości ok. 5 m pod punktem

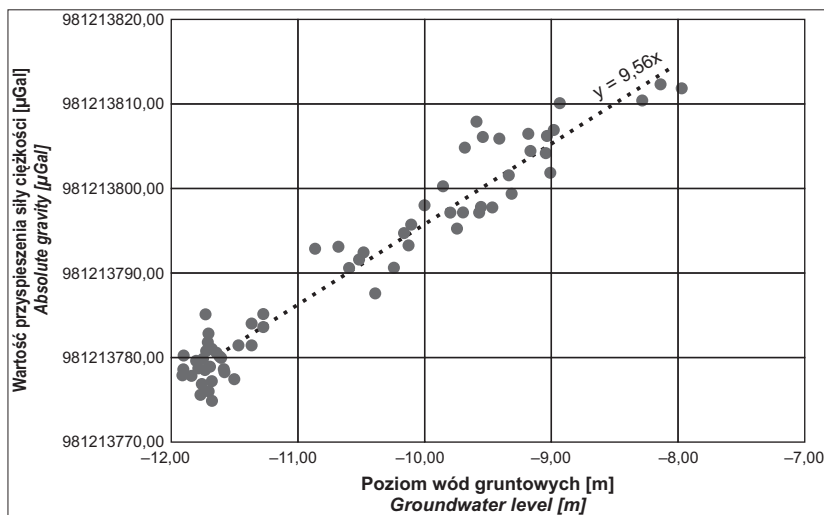
grawimetrycznym (w piezometrze), wilgotności gruntu wokół stanowiska (pomiar sondą ML-1 ThetaProbe) i ciśnienia atmosferycznego. Z punktu widzenia interpretacji geodynamicznej związanej z geometrycznym przemieszczeniem punktu Obserwatorium dysponuje permanentną stacją GNSS należącą do sieci Euref Permanent Network (EPN). Pozwala to na śledzenie kinematyki Obserwatorium w globalnym układzie odniesienia ITRF i jego europejskiej realizacji ETRF (Brzezinski i in., 2016). Na rycinie 2 przedstawiono wykres przyspieszenia siły ciężkości wraz z odczytami pomiarów swobodnego zwierciadła wody gruntowej w piezometrze zlokalizowanym w odległości 20 m od Laboratorium Grawimetrycznego. Punkt grawimetryczny jest umieszczony na głębokości 5,8 m pod górnym poziomem odniesienia studni piezometrycznej, względem którego przedstawiono głębokości lustra wody na rycinie 1.

Na podstawie rejestracji pomiarów przyspieszenia i poziomu zwierciadła swobodnego wód gruntowych można wyznaczyć zależność zmiany przyspieszenia i zmiany poziomu wód gruntowych w postaci funkcji liniowej, opisującej zmianę przyspieszenia siły ciężkości w funkcji głębokości poziomu wody gruntowej. W podejściu tym zakłada się niezależność zmiany przyspieszenia od wszystkich innych efektów omówionych w pierwszym rozdziale i wyeliminowanych na drodze wprowadzania poprawek. Przyczyny zmian przyspieszenia w tym podejściu tkwią jedynie w zmianach środowiskowych o charakterze lokalnym. Wyznaczenie tej funkcji obejmuje m.in. lata 2009–2013, charakteryzujące się największą notowaną w historii obserwacji w Józefosławiu zmiennością poziomu wód gruntowych. Funkcję tę graficznie przedstawiono na rycinie 2.



Ryc. 1. Wykres zmian absolutnej wartości przyspieszenia siły ciężkości i zmian poziomu zwierciadła wód gruntowych na stanowisku w Józefosławiu (punkty ze słupkami błędów opisują wartości przyspieszenia siły ciężkości, czarna linia łączy rejestracje poziomu wód gruntowych w piezometrze w czasie pomiaru grawimetrycznego)

Fig. 1. Changes of absolute gravity values and groundwater level at the Józefosław Observatory (points with error bars-gravity, black line links groundwater level measured by piezometer at gravity measurement epoch)



Ryc. 2. Zależność zmian absolutnej wartości przyspieszenia siły ciężkości od zmian poziomu wód gruntowych na stanowisku w Józefosławiu

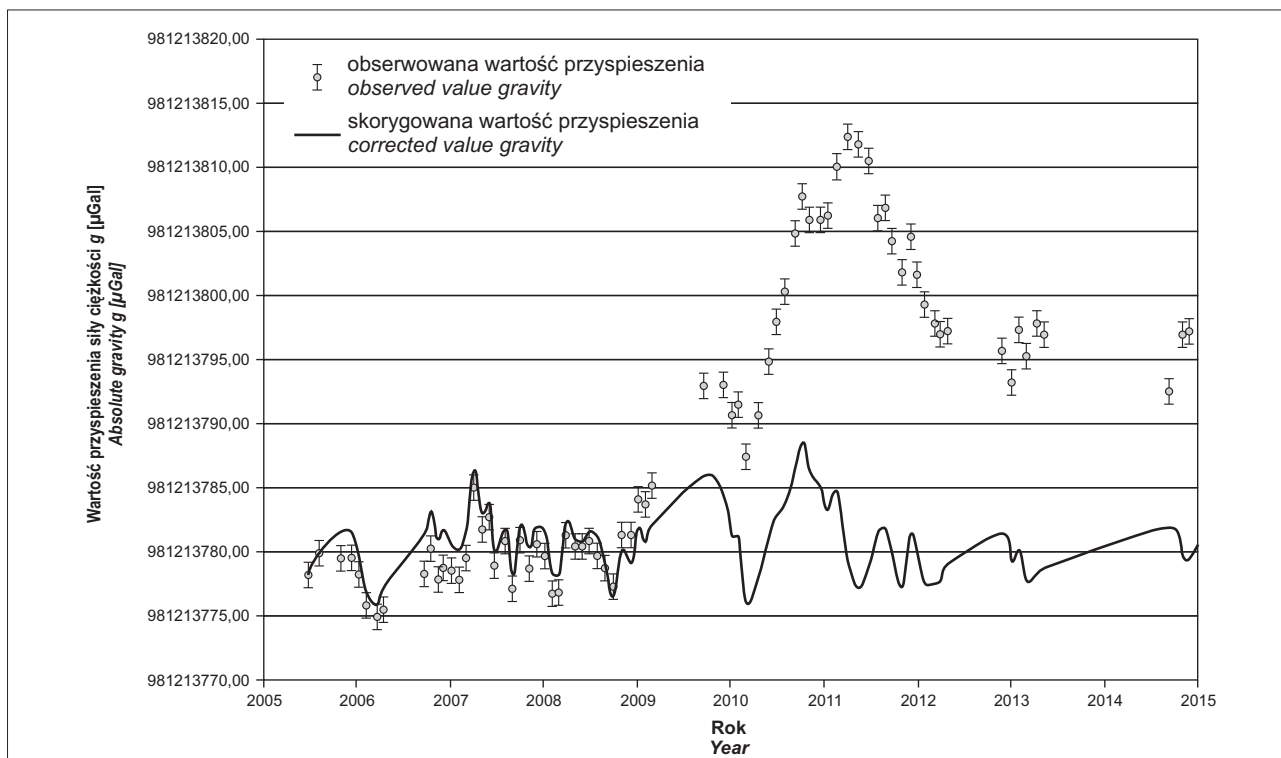
Fig. 2. Dependence of absolute gravity and groundwater level at the Józefosław Observatory

Funkcja zależności określa istotną liniową zależność zmiany przyspieszenia o wartości 9,6 µGal na 1 m zmiany poziomu wody gruntowej. Tak proste ujęcie wskazuje, że wykorzystany model płyty Bouguera jest jedynie przybliżeniem bowiem zgodność trendu liniowego z analizowaną próbka jest opisana współczynnikiem R2 wynoszącym 0,3. Uzyskana wartość zależności zmiany przyspieszenia siły ciężkości wynosi 23% całego wpływu płyty Bouguera (41,9 µGal/m) o gęstości równej gęstości wody co jednoznacznie sugeruje wielkość porowatości utworów nasiąkłych. Wyznaczenie tego współczynnika daje zatem możliwość śledzenia zmian poziomu wód gruntowych w sensie

interpretacji ilościowej, a przy zastosowaniu szerszego powierzchniowego zdjęcia grawimetrycznego wskazuje na możliwości grawimetrii naziemnej w dziedzinie szacowania wielkości płytkich zbiorników podziemnych i charakteru zmian jego zasobności. Z punktu widzenia dokładności metod grawimetrii absolutnej należy zestawić uzyskaną wartość wpływu zmiany zwierciadła wody rzędu 10 µGal/m z dokładnością wyznaczania przyspieszenia ziemskiego rzędu 2 µGal. Wskazuje to na graniczną rozdzielczość metody grawimetrycznej w dziedzinie śledzenia zmian poziomu wody rzędu 20 cm. Należy jednak zaznaczyć, że jest to wniosek jedynie dla stanowiska w Józefosławiu bowiem ta wartość ma ścisły związek z porowatością (nasiąkliwością) utworów wokół stanowiska grawimetrycznego.

Eliminacja zmian ciężkości z wykorzystaniem wyznaczonego współczynnika w postaci skorygowania szeregu czasowego zmian przyspieszenia siły ciężkości redukuje zmiany przyspieszenia do krzywej przedstawionej na rycinie 3.

Zakres zmian skorygowanej wartości przyspieszenia wyraźnie zmniejszył się w szeregu czasowym obserwowanych wartości, wykazując jednak rezydualne zależności o wartościach przekraczających dokładność wyznaczenia. Sugeruje to niezbitcie, że sposób eliminacji wpływu wód gruntowych za pomocą najprostszego podejścia poprzez płytę bougerowską oraz bazującego na wykorzystaniu pojedynczego sensora z jednego poziomu wodonośnego nie



Ryc. 3. Szereg czasowy zmian przyspieszenia siły ciężkości – obserwowanych i skorygowanych o wpływ zmian poziomu wody gruntowej na stanowisku w Józefosławiu

Fig. 3. Time series of observed gravity and corrected by groundwater influence for Józefosław Observatory

jest do końca skuteczny zwłaszcza w momentach istotnych zmian poziomu wód. Największe residua wartości przyspieszenia, sięgające wartości $\pm 6 \mu\text{Gal}$ pokrywają się bowiem z momentami największych zmian w poziomie wód gruntowych.

PODSUMOWANIE

Grawimetria naziemna, dzięki swojej dokładności i mobilności, obejmuje możliwościami interpretacyjnymi elementy związane z obecnością i zmianami poziomu wód gruntowych. Oprócz ich wpływu na zmiany natężenia pola siły ciężkości ten sygnał natury fizycznej ma również wpływ na inne techniki obserwacji geodezyjnych. Skupiając się jednak na polu siły ciężkości daje się zauważyć, że zależność zmiany poziomu wód i natężenia pola siły ciężkości ma lokalnie charakter liniowy i w proporcji do porowatości utworów nawadnianych może „wyłapać” sygnał o rozmiarze 1–2 dm zmiany poziomu wód gruntowych. Cechą pomiarów grawimetrycznych jest ich bezinwazyjność i możliwość pokrycia przestrzeni 2D dzięki czemu umożliwiają interpretację geofizyczną w dziedzinie szacowania parametrów złoża i jego eksploatacji. Wykazano jednak, że proste empiryczne podejście do opisu wpływu zmian poziomu wód na wartość przyspieszenia nie jest pozbawione wad, a przy okazji wymaga wyznaczenia długich ciągów obserwacyjnych na stanowiskach badawczych. Takie po-

dejście powinno być wsparte stosowną wiedzą geologiczną wynikającą z rozpoznania struktury złóż wodonośnych oraz objąć włączenie informacji dotyczącej monitoringu poziomu wód podziemnych prowadzonego przez państwową służbę hydrogeologiczną.

LITERATURA

- BRZEZIŃSKI A., BARLIK M., ANDRASIĆ E., IZDEBSKI W., KRUCZYK M., LIWOSZ T., OLSZAK T., PACHUTA A., PIENIAK M., PRÓCHNIEWICZ D., RAJNER M., SZPUNAR R., TERCJAK M., WALO J. 2016 – Geodetic and Geodynamic Studies at Department of Geodesy and Geodetic Astronomy WUT. Reports on Geodesy and Geoinformatics, 100 (1): 165–200, doi:10.1515/rgg-2016-0013.
- GŁÓWNY URZĄD MIAR 1999 – Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik, Warszawa.
- GUNTNER A., STUCK J., WERTH S., DOLL P., VERZANO K., MERZ B. 2007 – A global analysis of temporal and spatial variations in continental water storage. *Water Resour. Res.*, 43 (5): 1–19.
- International ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 1995 – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Genewa.
- KOWALCZYK K. 2006 – Porównanie współcześnie wyznaczonych ruchów pionowych skorupy ziemskiej na obszarze Polski z wyznaczeniami wcześniejszymi. *Prz. Geodez.*, 78 (12): 4–7.
- OLSZAK T. 2011 – Analiza warunków zapewniających wykorzystanie absolutnych wyznaczeń grawimetrycznych w badaniach geodynamicznych. Rozprawa Doktorska. Wydz. Geodezji i Kartografii. P.Warsz.
- SOOD A., SMAKHTIN V. 2015 – Global hydrological models: a review. *Hydrol. Sci. J.* 60 (4): 549–565, dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.950580.
- TIMMEN L. 2010 – Absolute and relative gravimetry. [W:] Guochang Xu Sci. of Geodesy-I. Wyd. Springer, Berlin Heidelberg: 58–62.