

Marcin BARLIK
Politechnika Warszawska

SATELITARNO – GRAWIMETRYCZNA METODA BADANIA RUCHÓW POWIERZCHNI ZIEMI NA TERENACH OBJĘTYCH INTENSYWNĄ EKSPLOATACJĄ GÓRNICZĄ

Streszczenie. W artykule przedstawiono zastosowanie równoczesnych pomiarów techniką GPS i grawimetrycznych do monitorowania wariacji wysokości i geometrii pola siły ciężkości na terenie Górnego Śląska.

SATELLITE AND GRAVIMETRICAL MONITORING METHOD OF THE EARTH'S SURFACE MOVEMENT IN THE INTENSIVE COAL MINING AREA

Summary. Simultaneously executed satellite GPS observations and gravimetric determinations used for investigations of heights and gravity field geometry variations in the area of intensive coal mining at Upper Silesia Region in the paper are reported.

1. WPROWADZENIE

Wyniki powtarzalnych pomiarów satelitarnych techniką globalnego systemu pozycyjnego (GPS) i obserwacji grawimetrycznych, wykonanych na obszarze intensywnej eksploatacji górniczej w pobliżu miejscowości Jastrzębie Zdrój, Wodzisław Śląski i Żory na Górnym Śląsku, wskazują na wyraźną zależność występujących ruchów znaków geodezyjnych i charakterystyk pola siły ciężkości. Zwraca uwagę fakt, że przemieszczenia takie są poprzedzane zmianami geometrii powierzchni ekwipotencjalnych w otoczeniu stanowiska obserwacyjnego. Autor przedstawia propozycję wykorzystania badań lokalnych parametrów krzywiznowych figury Ziemi do przewidywania ruchów powierzchni skorupy ziemskiej. Wyznaczanie pełnej i średniej krzywizny powierzchni poziomej wyprzedzać powinny inwentaryzację ruchów znaków

metodą satelitarną. Te dwie wymienione techniki wzajemnie się więc uzupełniają. Eliminuje się też pewien niepotrzebny nakład pracy w zakresie prac satelitarnych, gdyż metoda grawimetryczna może wskazać miejsca, gdzie występuje większe prawdopodobieństwo deformacji powierzchni Ziemi. W kolejnych rozdziałach przedstawiono zarys teorii zastosowania wyznaczeń grawimetrycznych w odniesieniu do anomalii pełnej i średniej krzywizny powierzchni ekwipotencjalnej za pośrednictwem gradientu anomalii Poincarego – Preya, ponadto też możliwości wykorzystania badań rozkładu zmian gradientu pionowego ciężkości ziemskiej do określania wariacji parametrów krzywiznowych.

W dalszym ciągu zrelacjonowano prowadzone pomiary na obiekcie SATGRAVMINE, obejmującym obszar eksploatacji trzech kopalń węgla kamiennego wokół Jastrzębia Zdroju, podając wyniki analiz i obliczeń.

2. OKREŚLENIE ANOMALII PARAMETRÓW KRZYWIZNOWYCH POLA SIŁY CIĘŻKOŚCI

Za udowodnioną doświadczalnymi pomiarami można uznać tezę, że wszelkie zmiany w układzie mas wewnątrz skorupy ziemskiej przejawiają się w pierwszej kolejności w zmianach kształtu powierzchni ekwipotencjalnej $W(X, Y, Z) = 0$ w obszarze Ω , w którym funkcja W jest ciągła wraz z pierwszymi i drugimi pochodnymi, a następnie poprzez deformację powierzchni topograficznej. Dowód stanowią wyniki badań prowadzonych pod kierunkiem autora w rejonach intensywnej działalności górniczej na Górnym Śląsku.

Do wprowadzenia niezbędnych wzorów początek prostokątnego układu współrzędnych umieszcza się w centrum masy Ziemi, który jest jednocześnie środkiem elipsoidy geocentrycznej E_0 , stosowanej w wyznaczeniach satelitarnych. Oś OZ tego układu pokrywa się z osią obrotu Globu, oś OX jest lokowana w płaszczyźnie początkowego południka geodezyjnego, oś OY skierowana jest na wschód. Geodezyjnymi współrzędnymi punktu P znajdującego się na powierzchni $W(X, Y, Z) = 0$ są: jego odległość od elipsoidy E_0 , czyli $PP_0 = h$ (wysokość geodezyjna, elipsoidalna) otrzymywana z pomiarów techniką GPS, geodezyjna szerokość B i kąt L (długość geodezyjna) między płaszczyzną PP_0Z i płaszczyzną OXZ . Do określenia średniej krzywizny J powierzchni ekwipotencjalnej i krzywizny pełnej K w systemie krzywych $B = \text{const}$ i $L = \text{const}$ na powierzchni $W = 0$ wykorzystuje się równanie Eulera [3], wiążące tzw. pierwszą i drugą formę kwadratową powierzchni dla głównych promieni R :

$$\left(EG - F^2\right) \frac{1}{R^2} + \left(\frac{2FM - EN - GL}{2FF_1 - FG_1 - GE_1}\right) \frac{1}{R^2} + \left(\frac{LN - M^2}{EG_1 - F_1^2}\right) = 0 \quad (1)$$

Jest to symboliczny zapis dwóch równań dla maksymalnego i minimalnego promieni przekrojów w punkcie powierzchni. Następnie otrzymuje się wzory na parametry krzywiznowe:

$$J = \frac{ED_2 - 2FD_1 + GD}{(EG - F^2)^{3/2}} \quad (2)$$

$$K = \frac{DD_2 - D_1^2}{(EG - F^2)^2} \quad (3)$$

Zarówno E, F, G jak i E₁, F₁, oraz D₁, D₂, G₁, itd. są funkcjami południkowego M i w pierwszym wertykale N promieni krzywizny elipsoidy satelitarnej, jak i wysokości elipsoidalnej, np.

$$G = (N + h)^2 \cos^2 B + \left(\frac{\partial h}{\partial \lambda}\right)^2 \quad (4)$$

Po niewielu przekształceniach, które znaleźć można w pozycji M. Bursy [2], definiuje się ściśle wzory na K i J. Są one spełnione dla każdej powierzchni ciągłej, a więc i na powierzchni ekwipotencjalnej.

Wartości krzywizny nie zmieniają się szybko na naszym globie. Od bieguna do równika różnica w wartościach tych parametrów wynosi ok. $0,01056 \cdot 10^{-7}$, co stanowi ok. 0,7% K lub J. Zatem są one zbyt mało czułymi parametrami dla wyznaczeń satelitarno-grawimetrycznych. Autor proponuje zatem użycie anomalii tych wielkości w celu scharakteryzowania kształtu powierzchni ekwipotencjalnych, przechodzących przez stanowiska jednoczesnych wyznaczeń obydwoma technikami.

Anomalie krzywizn zostaną zdefiniowane rozbieżnościami K i J od wartości:

$$J_0 = \frac{1}{M+h} + \frac{1}{N+h}, \quad K_0 = \frac{1}{(M+h)(N+h)} \quad (5)$$

Błąd wyznaczenia elipsoidalnej wysokości rzędu 0,5 m wywoła błąd anomalii ΔJ ok. $8 \cdot 10^{-14}$ i ok. 10^{-20} w ΔK . Jednoczesne pomiary satelitarne i grawimetryczne, powtarzane okresowo, mogą zostać użyte do badania ΔK i ΔJ jeszcze w inny sposób.

Przyrost składowych odchyłeń pionu na powierzchni W otrzymamy poprzez gradienty wysokości elipsoidalnych:

$$\delta\xi = \left[-\frac{1}{M+h} \delta \left(\frac{\partial h}{\partial B} \right) - \delta \left(\frac{1}{M+h} \right) \frac{\partial h}{\partial B} \right] \cos^2 \xi \quad (6)$$

$$\delta\eta = \left[-\frac{1}{(N+h)\cos B} \delta \left(\frac{\partial h}{\partial B} \right) - \delta \left(\frac{1}{(N+h)\cos B} \right) \frac{\partial h}{\partial L} \right] \cos^2 \eta \quad (7)$$

Profile satelitarne i pomiary grawimetryczne, służące określaniu poprawek ortometrycznych, pozwalają wyznaczyć zmiany undulacji geoidy, a stąd gradienty składowych odchyłeń parametrów krzywiznowych, bez straty dokładności, można uzyskać z zespołu równań:

$$\Delta J = -\xi \frac{1}{N+h} \operatorname{tg} B + \frac{1}{M+h} (\operatorname{grad} \xi)_B + \frac{1}{(N+h)\cos B} (\operatorname{grad} \eta)_L + \quad (8)$$

$$-0,5J_0(\xi^2 + \eta^2)$$

$$\Delta K = -\xi K_0 \operatorname{tg} B + K_0 (\operatorname{grad} \xi)_B + K_0 \sec B (\operatorname{grad} \eta)_L + \quad (9)$$

$$-K_0 \frac{M+h}{N+h} \sec^2 B$$

Błąd określania składowych odchyłeń pionu nie powinien być większy od $0,2''$, co wywoła błędy w anomaliiach krzywizn odpowiednio równe $1,6 \cdot 10^{13}$ i $2,4 \cdot 10^{20}$.

Zauważyć w tym miejscu rozważań należy, że pochodne wysokości ponad elipsoidą, niezbędne w realizacji równań, powiązane są z komponentami odchylenia pionu i ich gradientami. Inklinacja powierzchni W w stosunku do E_0 , odpowiednio w płaszczyźnie południka i w kierunku wschód-zachód, jest zdefiniowana przez równanie:

$$\operatorname{tg} \xi = -\frac{\partial h_m}{\partial s_m}, \operatorname{tg} \eta = -\frac{\partial h_r}{\partial s_r} \quad (10)$$

gdzie δh_m oznacza różniczkowy przyrost wielkości geoidy, odpowiadający przyrostowi długości południka δs_m i odpowiednio dla δh_r . Wartości tych pochodnych mogą być określone

w praktyce przez kompozycję wyznaczeń techniką GPS i pomiarów grawimetrycznych. Dla powierzchni ekwipotencjalnych gradienty są określone przez sumę wysokości ortometrycznej H^{ort} i odstępów geoidy od elipsoidy N , co wynika z podstawowego równania niwelacji satelitarnej:

$$H^{ort} + N = h, \quad (11)$$

gdź

$$(\text{grad}\xi)_B = -\frac{dN}{dB} = +\frac{dH^{ort}}{dB} - \frac{dh}{dB} \quad (12)$$

i odpowiednio dla I wertykału.

W wypadku badania zmian czasowych niezbędne jest powtarzanie obserwacji przewyższeń i przyrostów grawitacji. Na profilach wykonuje się zatem niwelację techniką satelitarną GPS, aby uzyskać wariację $\delta\Delta h$ przewyższenia elipsoidalnego oraz pomiary grawimetrem, by uzyskać zmiany niwelacyjnej poprawki ortometrycznej, co prowadzi do określenia zmian wysokości ortometrycznych z upływem czasu. Zatem profile satelitarne i pomiary grawimetryczne, służące określaniu poprawek ortometrycznych, pozwalają wyznaczyć zmiany undulacji geoidy, a stąd gradienty składowych odchyła pionu.

Zmiany krzywizny średniej związane są także ze zmianami pionowego gradientu natężenia siły ciężkości. Stosuje się przy tym równanie Brunsza, wiążące J z gradientem ciężkości:

$$-\frac{\partial g}{\partial z} = 2Jg + 2\omega^2 \quad (13)$$

Anomalia pionowego gradientu ciężkości jest zatem zdefiniowana równaniem:

$$\Delta\left(\frac{\partial g}{\partial z}\right) = -2g\left[J - \left(\frac{1}{M+h} + \frac{1}{N+h}\right)\right] - 2\Delta g\left(\frac{1}{M+h} + \frac{1}{N+h}\right) \quad (14)$$

Anomalia krzywizny i anomalia grawimetryczna odnoszą się do powierzchni ekwipotencjalnej.

Poprzez powtarzanie pomiarów grawimetrycznych i satelitarnych określa się zmiany czasowe krzywizny średniej:

$$\delta J = -\delta \left(\frac{\partial g}{\partial z} \right) \frac{1}{2g} - \delta g \frac{J_0}{g} \quad (15)$$

Należy jednak wyraźnie zaznaczyć, że ta stosunkowo prosta zależność stwarza poważne komplikacje w wypadku realizacji praktycznej. Pomiar gradientu odbywa się w omawianym zagadnieniu w rejonie intensywnej eksploatacji górniczej. Wiadomo natomiast, że ta druga pochodna potencjału siły ciężkości jest bardziej „czuła” na zmiany położenia mas w otoczeniu stanowiska niż przyspieszenie ziemskie. Zatem prawidłowa interpretacja wyników powtarzanych obserwacji pionowego gradientu przyspieszenia wymaga uprzednio usunięcia grawitacyjnego wpływu przemieszczeń mas topograficznych. Osłabia się także uboczne działania mas powierzchniowych przez odpowiedni dobór stanowisk grawimetru i odbiornika satelitarnego z dala od hałd, wysypisk itp.

3. POMIARY SATELITARNE I GRAWIMETRYCZNE NA OBIEKCIE „SATGRAVMINE”

Na wstępie niniejszego rozdziału należy podać, że prace pomiarowe związane z rozwinięciem systemu informacji geograficznej regionu Górnego Śląska podjęto w 1991 roku. Wtedy jednak problemem zasadniczym była inwentaryzacja deformacji terenu, wywołanych działalnością wydobywczą i aktualizacja osnowy geodezyjnej. Pomiar satelitarne i wyznaczenia anomalii siły ciężkości wykonywano na punktach osnowy fotogrametrycznej [1]. Po trzech cyklach pomiarowych zdecydowano się założyć nieco mniejsze pole doświadczalne.

Zestabilizowano przeto 26 uniwersalnych znaków geodezyjnych, wykorzystywanych do obserwacji satelitarnych grawimetrycznych i niwelacyjnych. Tworzą one sześć profili. Kierunki tych linii przecinają granice eksploatacji górniczej trzech kopalni, które wyraźnie uwidaczniają się we wcześniej uzyskanych izarytmach ruchów i izoliniami anomalii Bourgera. Odległości między markami zawierają się w granicach od 0,6 do 1 km. Pole testowe SATGRAVMINE leży w zachodniej części Górnos Śląskiego Okręgu Węglowego. Eksploatacja w kopalniach „1 Maja”, „Jastrzębie” i „Moszczenica” odbywa się głównie na zawał. Tylko niektóre pokłady eksploatuje się przy użyciu posadzki hydraulicznej. Węgiel wydobywa się obecnie na głębokości 800 i więcej metrów. Główną przyczyną pojawienia się na tych terenach deformacji powierzchni terenu jest tworzenie się w górotworze pustek powstających w czasie wybierania złoża, jak również podczas prowadzenia górniczych prac przygotowawczych i udostępniających złoża.

Mniejszy, choć znaczący wpływ na deformację terenu mają ubytki wody w poziomach wodonośnych powstające na skutek pompowania. Obszar deformacji z tego tytułu jest zwykle bardzo rozległy i zależy od charakteru budowy hydrogeologicznej.

Pomiary wspomnianej sieci geodezyjnej na obszarze Górnego Śląska wykonano dotychczas pięciokrotnie: dwa razy w 1991, dwa razy w 1992 i w kwietniu 1993 roku techniką PS, metodą statystyczną przy użyciu odbiorników TRIMBLE 4000SR i TRIMBLE 4000SST Geodetic Surveyor I I P, a pomiary grawimetryczne w tych samych epokach za pomocą instrumentów Worden–Master i LaCoste&Romberg. Trzy pierwsze sesje pomiarowe pokrywały obszar rozleglejszy niż sieć SATGRAVMINE, by wytypować rejony o większych ruchach powierzchni Ziemi i zmianach anomalii ciężkości, o czym mowa w pracy [1]. Obliczenia współrzędnych cięciw i wyrównanie sieci zostały wykonane za pomocą pakietu TRIMVEC i dla ostatniej sesji, programem BERNESE.

Jakość wyznaczeń charakteryzuje przeciętny błąd średni w kierunku O_x i O_y rzędu 0,8 i 0,9 cm oraz 2,1 cm w kierunku O_z .

Rezultaty pomiarów techniką GPS wykorzystane zostały do określenia wariacji wysokości elipsoidalnych w przeciągu upływu czasu od kwietnia 1991 do maja 1993 roku. Depresje sięgały do -32 cm na obszarze badań w odniesieniu do punktów referencyjnych poza obszarem intensywnej działalności górniczej.

Równocześnie z obserwacjami satelitarnymi wykonano pomiary przyrostów przyspieszenia siły ciężkości, w odniesieniu do stanowisk wyniesionych poza obszar wydobywania, a mianowicie do punktów grawimetrycznych w Żorach, Goczałkowicach i Raciborzu. Stabilność grawitacji była w tych miejscach kontrolowana poprzez bezpośrednie powiązanie z punktami wyznaczeń absolutnych w Józefosławiu, gdzie wykonuje się okresowe pomiary bezwzględne polskim aparatem balistycznym i na Świętym Krzyżu, gdzie wartość ciężkości określiła grupa pomiarowa z Instytutu „Metrologia” z Charkowa na Ukrainie. Dokładność wyznaczeń grawimetrycznych charakteryzuje błąd średni Δg między punktami referencyjnymi i badawczymi nie większy niż $0,1 \mu\text{ms}^{-2} = 0,01 \text{ mGL}$. Wariacje grawitacji w okresie badań sięgały $-0,18 \text{ mGL}$. Podobną do zmian ciężkości tendencję wykazywały zmiany anomalii Bourgera, które sięgały do $-0,15 \text{ mGL}$. Anomalie te wyznaczono na powierzchni odniesienia o wysokości $H = 200 \text{ npm.}$, by nie zniekształcić wyników ze względu na wpływ zmian gęstości pod powierzchnią terenu. Wysokości znaków zawierały się w granicach od 218 do 287 m. Zarys izolinii tych anomalii pokrywa się oczywiście z zarysem zasięgów eksploatacji. Obliczono następnie współczynnik korelacji zmian anomalii i zmian wysokości elipsoidalnych. Jego wartość wyniosła 0,78, a więc jak na zjawiska przyrodnicze, była wysoka. Ujemne wartości anomalii wolnopowietrznych pojawiają się nad najrozmaitszymi wyrobiskami górniczymi. A zatem te dwa rodzaje anomalii, Bourgera i wolnopowietrznych, najlepiej dokumentują defekty mas podpowierzchniowych już zaistniałe.

4. UWAGI O ŚLEDZENIU ZMIAN GEOMETRII POLA SIŁY CIĘŻKOŚCI

Układ znaków geodezyjnych na obiekcie SATGRAVMINE tworzy dwa profile o kierunkach południkowych i cztery profile w przybliżeniu równoleżnikowe. Przecinają one granice zasięgów eksploatacji kopalń prawie prostopadle. Odległości między markami zawierają się w granicach od 0,6 do 1 km. Stwarza to okazję do zastosowania zaprezentowanej metody badania anomalii krzywizny średniej i pełnej dla powierzchni ekwipotencjalnych przechodzących przez stanowiska pomiarowe. Obliczono przeto gradienty anomalii Poincarego–Preya na obszarze badań. Zgodnie z przewidywaniami, ich kierunki są prostopadłe do zasięgu granic wydobywania. Zmiany znaków wartości gradientów anomalii Poincarego–Preya zawierają się w granicach od $-31,8$ do $50,1$ etweszy, a więc przewyższają prawie dwukrotnie wartości bezwzględne pola nie anomalnego. Przedstawione powyżej wyniki upoważniają do sformułowania wniosku, że metoda proponowana w poprzednich rozdziałach przetestowana została z wynikiem pozytywnym na opisanym polu doświadczalnym. Izarytmy anomalii parametrów krzywiznowych ΔK i ΔJ stanowią bowiem obwiednię obszarów „podejrzanych” o istnienie naprężeń prowadzących do późniejszych deformacji, które zauważono po każdym następnym cyklu pomiarów techniką GPS.

LITERATURA

1. Barlik M., Rogowski J., Pachuta A., Piraszewski M.: Variation of the point positions and gravity field in the area of intensive mining. Paper presented at the 7th Int. Symp. „Geodesy and Physics of the Earth”, Potsdam, Oct. 1992.
2. Bursza M., K opriedielieniju krivizny povierchnosti predstavljajuszczej figuru Ziemi po astromo–giedieziczekim dannym. *Studia Geoph. et Geod.* 59/19610, s. 95–107.
3. Heitz S., *Koordinaten auf der geodatischen Bezugflachen*, Dummler Verlag, Bonn 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stanisław Piechuta

Abstract

The results of periodic satellite GPS and gravimetrical measurements accomplished in area of intensive coal mining near Jastrzębie, Żory and Wodzisław Śląski (Katowice District — Upper Silesia) are reported in the paper. Changes of gravity Bouguer anomalies and displacements of surface points are shown as complement of the mining exploitation data. The paper presents and discusses also issues related to the anomalies of curvature of the surface which represents the Earth's figure in the surroundings of points for gravimetric and satelite determinations. Both these geodetical methods complement each other in these investigations.

Account has been taken of the mean curvature anomaly (see formula (8)) and the total curvature anomaly (formula (9)). All changes in the location of masses inside the Earth's crust are first reflected by a change of equipotential surface and then (possibly) by a deformation of the topographic surface. The thesis results from the research performed by the author in the area of heavy and intensive coal mining.