

Wprowadzenie do grawimetrii geodezyjnej, cz. I – artykuł recenzowany

# POMIARY

Napływ nowoczesnej aparatury grawimetrycznej i nowe konstrukcje rodzime zmuszają do ciągłego dokształcania się inżynierów, którzy w swej praktyce produkcyjnej nie mieli okazji do zetknięcia się z takimi instrumentami czy nawet zagadnieniami geodezji fizycznej w ogóle.

MARCIN BARLIK

## ● W ZIEMSKIM POLU SIŁY CIĘŻKOŚCI

Obszernym działem geodezji wyższej jest geodezja fizyczna, zwana też geodezją dynamiczną. Zajmuje się ona między innymi wpływem ziemskiego pola siły ciężkości na wyniki pomiarów geodezyjnych (kąty, odległości, różnice wysokości, współrzędne astronomiczne, azymuty itd.). Zdajemy sobie bowiem sprawę, że każda geodezyjna działalność pomiarowa „zanurzona” jest w tym polu fizycznym Ziemi, podobnie jak i w polu magnetycznym, elektrycznym czy promieniowania jądrowego. Grawimetria geodezyjna kojarzy w sobie zarówno niektóre problemy nauk o Ziemi, jak i nauk technicznych. Zajmuje się ilościowym badaniem jednego z tych pól fizycznych naszego globu, co jest także przedmiotem zainteresowania przyrodników. Stosuje do tego celu coraz subtelniejsze narzędzia i metody pomiarowe, a to jest związane z problemami technicznymi budowy, obsługi aparatury i właściwego opracowania wyników obserwacji.

Od kilku dziesięcioleci szybko rozwija się także grawimetria satelitarna. Jest to dział geodezji i geofizyki satelitarnej traktujący o wykorzystaniu obserwacji perturbacji ruchu sztucznych satelitów do śledzenia anomalii grawimetrycznych wywołanych przez zaburzenia jednorodnego rozkładu mas, szczególnie w skorupie ziemskiej. Metody grawimetrii satelitarnej (zwane też grawimetrią dynamiczną) pozwalają obecnie na coraz subtelniejsze zdalne badania pola siły ciężkości, na coraz mniejszych elementach powierzchni Ziemi.

Przedmiotem niniejszego opracowania są wybrane zagadnienia z zakresu wykonywania, opracowania i wykorzystania pomiarów grawimetrycznych w geodezji. Dodajmy przy tej okazji, że dział grawimetrii geodezyjnej w zastosowaniu do badania kształtu Ziemi ujmowany jest w wykładach geodezji wyższej i geodezji fizycznej dla studentów wyższych semestrów na Politechnice Warszawskiej, na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie, w Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, na akademiach rolniczych, i to zarówno na studiach stacjonarnych, jak i niestacjonarnych, na kursach pierwszego i drugiego stopnia oraz na studiach podyplomowych. Kurs grawimetrii w zasto-

sowaniu do poszukiwań kopalin użytecznych wykładany jest geologom, a także na specjalnościach geofizycznych wydziałów uniwersyteckich. Pomiary grawimetryczne interesują również szerokie grono osób zajmujących się badaniami geodynamicznymi. Wspomnieć przy tym należy, że metody grawimetryczne są niedestruktywnym sposobem poznawania struktury wnętrza Ziemi, nie ingerują czynnie w układ mas podpowierzchniowych.

W pracy niniejszej stosuje się układ jednostek SI (z franc. *Système International d'Unité*), co oznacza wyrażanie natężenia (przyspieszenia) ziemskiej siły ciężkości jako liniowego w  $m \cdot s^{-2}$  i jego podwielokrotnościach lub jako siłowego w  $N \cdot kg^{-1}$ . Składowe gradientu (pierwszych pochodnych) siły ciężkości podawane są w  $s^{-2}$ . W literaturze światowej i w praktyce stosuje się jeszcze powszechnie jednostki przyspieszenia zwane Galami ku czci Galileo Galilei (1564-1642), przy czym  $1 Gal = 1 cm \cdot s^{-2}$ . W opracowaniach geodezyjnych i geofizycznych najczęściej używa się jednostki 1000 razy mniejszej, czyli *miliGala*, przy czym  $1 mGal = 10 \mu m \cdot s^{-2}$ . W pomiarach pierwszych pochodnych ciężkości (czyli drugich pochodnych potencjału siły ciężkości) stosuje się jednostki zwane Etweszami ( $1 E = 10^{-9} s^{-2}$ ) od nazwiska Loranda Eötvösa (1848-1919), geofizyka węgierskiego.

## ● SYSTEMATYKA GRAWIMETRII GEODEZYJNEJ

Podstawowym zadaniem grawimetrii geodezyjnej jest określenie charakterystyk pola siły ciężkości Ziemi i innych ciał niebieskich, jako funkcji miejsca i momentu obserwacji. Jest to możliwe poprzez pomiary natężenia tego pola  $g_{observ}$  i jego gradientów, wykonane na powierzchni bryły naszego globu lub w jego sąsiedztwie. Tok postępowania w zastosowaniu rezultatów pomiarów grawimetrycznych w geodezji fizycznej obejmuje następnie przeciwstawienie poprawionych i odpowiednio zredukowanych wartości zaobserwowanego natężenia tego pola fizycznego (przy użyciu redukcji grawimetrycznej  $R_{grav}$  i wyższych pochodnych jego potencjału) charakterystykom tzw. normalnego pola siły ciężkości, przede wszystkim normalnego przyspieszenia  $\gamma_{norm}$ . Jest to potencjalne pole modelowe wytwarzane przez jednorodną bryłę o regularnych kształtach – elipsoidę ziemską [Barlik, 1991]. Jej parametry, czyli długość większej półosi równikowej, spłaszczenie geo-



Autor artykułu wraz ze studentami wykonuje pomiary grawimetrem Worden w ramach badań Pienińskiego Poligonu Geodynamicznego

metryczne, prędkość wirowania wokół osi, główne momenty bezwładności określa się współcześnie poprzez wyznaczenia satelitarne. Zatem anomalia grawimetryczna  $A_g$  będzie zdefiniowana przez równanie:

$$A_g = g_{\text{observ}} + R_{\text{grav}} - \gamma_{\text{norm}}$$

W pomiarach wartości siły ciężenia, czyli wartości sumy wektorów grawitacji i siły odśrodkowej, wykorzystuje się wiele zjawisk, takich jak: swobodny spadek ciała w polu siły ciężkości, podrzut i spadek ciała (balistykę), ruch wahadła fizycznego, precesję giroskopu, drgania obciążonej struny, lewitację nadprzewodnika w polu magnetycznym, zakrzywienie powierzchni wirującej cieczy, deformację ciał sprężystych pod działaniem stałej masy, ruch przewodnika lub naładowanych elektrycznie cząsteczek w polu magnesu stałego czy wznoszenie się cieczy w kapilarze. Obecnie – przy współczesnym, szybkim rozwoju techniki i wysokich wymaganiach co do dokładności pomiaru natężenia siły ciężkości – stosuje się obserwacje tylko niektórych z wymienionych zjawisk fizycznych.

Ze względu na sposób pomiaru i konstrukcję elementu czujnikowego grawimetru (*gravis* – z łac. ciężki oraz *metreo* – z greck. mierzyć) dzieli się metody pomiarów przyspieszenia siły ciężkości na dwie grupy: pomiary **dynamiczne** (obserwacje ruchu ciała w polu siły ciężkości) i pomiary **statyczne** (obserwacje stanu równowagi masy czujnika grawitacyjnego, na którą działa zarówno siła ciężkości, jak i siła ją kompensująca, wzorcowa, dokładnie określana mechanicznie lub elektronicznie). Do dynamicznych metod pomiarów grawimetrycznych zalicza się:

- **Pomiary wahadłowe** – wykorzystujące obserwacje zależności okresu swobodnego ruchu wahadła od przyspieszenia siły ciężkości w miejscu pomiaru. W aparacie notuje się interwał czasu między kolejnymi przejściami przez położenie równowagi lub od jednego skrajnego położenia do drugiego.

- **Pomiary balistyczne** – wykorzystujące realizację równania drogi przebytej w polu siły ciężkości ruchem jednostajnie przyspieszonym (spadek próbника) lub/i jednostajnie opóźnionym (podrzut i spadek próbника w próżni).

- **Obserwacje częstotliwości drgań własnych** obciążonej metalowej struny, związanej funkcyjnie z wartością przyspieszenia siły ciężkości.

Metody statyczne pomiarów grawimetrycznych polegają na doprowadzaniu masy próbnej  $M$  umieszczonej w systemie pomiarowym do stanu równowagi za pomocą wzorcowanej siły kompensującej  $F$ . Równanie równowagi spełnione w tym momencie w grawimetrze statycznym przez jego system ma postać znaną z mechaniki:

$$Mg + F = 0.$$

Siła kompensująca może być wytwarzana przez deformację skręcanej nici, wydłużanie (skracanie) sprężyny, a także przez siłę elektromotoryczną, działającą na przewodnik pod napięciem elektrycznym w polu magnetycznym.

Inny sposób podziału obserwacji grawimetrycznych to wyróżnienie pomiarów **absolutnych** (bezwzględnych) i **względnych** (różnicowych). Powiemy na wstępie, że bezpośrednie pomiary wartości drugich pochodnych potencjału siły ciężkości są wyznaczeniami bezwzględnymi. Natomiast pomiary absolutne natężenia siły ciężkości służą do określania pełnej wartości wektora przyspieszenia siły ciężkości  $g$ . Ponieważ wymiar przyspieszenia liniowego zawiera w sobie zarówno długość, jak i czas, dlatego określenie natężenia tej siły wymaga pomiaru wartości tych dwóch wielkości. Wymogowi temu odpowiadają tylko metody dynamiczne. Aparatura pomiarowa musi zatem posiadać wzorzec długości (dalmierz, interferometr) i czasu (zegar). Ze względu na ograniczenie rozmiarów aparatury zarówno koniecznością transportu, jak i możliwościami zapew-

nienia dużej stabilności warunków zewnętrznych (ciśnienie, wilgotność i temperatura powietrza, izolacja od mikrosejsm), odcinek obserwacji ruchu próbnika w aparacie balistycznym nie przekracza 1 m, a interwał czasu – 1 s.

Grawimetryczne pomiary względne służą do określania różnic (przyrostów) natężenia siły ciężkości  $\Delta g$  między stanowiskami obserwacyjnymi. Wyznacza się przy tym zmiany wskazań tego samego przyrządu (grawimetru) na punkcie wyjściowym ciągu (bazowym, oporowym) i na punkcie pomiarowym, na którym określa się wartość przyspieszenia. Rejestruje się za pomocą odpowiedniego systemu odczytowego **grawimetru statycznego** zmiany długości lub skręcenia nici (czyli deformację sprężyny pomiarowej) lub kąta nachylenia systemu pomiarowego. Natomiast obsługa **grawimetru względnego dynamicznego** może polegać na rejestracji czasu (okresu) drgań wahadła lub częstotliwości drgań struny.

Do lat 30. ubiegłego wieku pomiary względne wykonywane były głównie aparatami wahadłowymi. Po II wojnie światowej do powszechnego użycia weszły grawimetry statyczne, sprężynowe, bardziej portatywne, wygodniejsze i łatwiejsze w użyciu. Grawimetry statyczne mogą być szerokozakresowe (wielkozakresowe) bądź małowzakresowe (wąskozakresowe, geofizyczne). Instrumenty szerokozakresowe służą do pomiarów w grawimetrycznych sieciach światowych, krajowych i regionalnych oraz w sieciach punktów oporowych dla zdjęć poszukiwawczych. Grawimetry wąskozakresowe służą do szczegółowego rozpoznania anomalii grawimetrycznych na ograniczonym obszarze poszukiwawczego zdjęcia geofizycznego, niekiedy w otworach wiertniczych (karotaż grawimetryczny). Instaluje się także precyzyjne grawimetry stacjonarne, które służą do badań pływowych (wywoływanych przez zmiany położenia Słońca i Księżycy w stosunku do obserwatorium i sprężystość skorupy ziemskiej) i niepływowych zmian ciężkości. Są to obecnie grawimetry nadprzewodnikowe, rzadziej już precyzyjne sprężynowe o małym zakresie i zwiększonej czułości. Do pomiarów na obszarach morskich konstruuje się grawimetry denne, zdalnie sterowane, opuszczane w batyskafach w płytkie wody szelfowe. Grawimetry wykorzystywane do pomiarów na pokładach statków, w łodziach podwodnych i w samolotach są specjalnie stabilizowane przy użyciu giroskopów. Do pomiarów na powierzchni innych planet i Księżycy stosuje się przede wszystkim dynamiczne grawimetry strunowe.

Do pomiarów wartości drugich pochodnych potencjału siły ciężkości służą przyrządy dynamiczne i statyczne o odmiennej budowie niż grawimetry. Są to **wariometry** i **gradientometry grawitacyjne**. Variometry statyczne posiadają budowę opartą na zasadzie wagi skręceń skonstruowanej przez Eötvösa. Wykorzystywane są do pomiarów na lądzie, do szczegółowego rozpoznania budowy geologicznej małego obszaru wokół stanowiska, rzadziej w geodezji do badania krzywizny powierzchni ekwipotencjalnych i zakrzywienia linii sił (linii pionu) w rozważanym ziemskim polu potencjalnym. Gradient pionowy przyspieszenia ziemskiego jest najczęściej obliczany na podstawie pomiarów grawimetrem statycznym wzdłuż pionowego odcinka bazy o znanej różnicy wysokości [Barlik, 2001b].

## ● PODSTAWOWE OSNOWY GRAWIMETRYCZNE

Najdłuższą tradycję bezwzględnych pomiarów grawimetrycznych mają stanowiska w Poczdamie pod Berlinem i w Wiedniu. Wartość przyspieszenia siły ciężkości, która była podstawą do konstrukcji tzw. systemu poczdamskiego i prawa rozkładu przy-

spieszenia normalnego przez Friedricha R. Helmerta (1843-1917), otrzymana została w latach 1898-1904 przez F. Kühnena i K. Furtwänglera ze 192 serii obserwacji wahadłami, zbudowanymi według pomysłu Repsolda. Tzw. system poczdamski odniesienia wartości ciężkości na Ziemi przyjęty został w 1909 r. w Londynie przez Międzynarodową Asocjację Geodezyjną jako podstawa do wszystkich wyznaczeń grawimetrycznych. Prawo wyznaczające przyspieszenie normalne w myśl tego wzorca (po pewnych modyfikacjach) jeszcze obecnie obowiązuje w Polsce.

Najnowsze bezwzględne pomiary wahadłowe w b. Związku Radzieckim (Leningrad, Instytut Metrologii, 1954-56) oraz w Poczdamie (wahadła kwarcowe, rewersyjne, 1968-70) wykazały, że wartość przyspieszenia w punkcie Helmerta wynosi  $g = (981\,260,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Różnica tej wartości i wartości  $g$  z pomiarów w 1904 r. jest równa  $-139 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2} = -13,9 \text{ mGal}$ . Pozostaje to w wysokiej zgodności z wyznaczeniami bezwzględnymi wykonanymi metodą balistyczną w latach późniejszych [Barlik, 2001a], [Torge, 1989].

Dodajmy, że polska sieć grawimetryczna wykorzystywana w praktyce geodezyjnej do lat 80. XX wieku składała się z 18 stabilizowanych punktów I klasy (założonych przez Instytut Geologiczny), 164 stanowisk II klasy oraz 136 tzw. punktów pośrednich II klasy. Punkty II klasy nie były stabilizowane. Łącznie sieć składała się z 318 punktów pomiarowych. Pomiary różnic przyspieszenia na przesłach sieci były wykonywane grawimetrem Askania Gs-11. Wyrównanie sieci przeprowadzono w Instytucie Geodezji i Kartografii w latach 1964-65 nawiązując ją do punktów pomiarów międzynarodowych z 1958 roku – Warszawa, Praga, Poczdam. Tak opracowana sieć stanowiła system grawimetryczny zwany „systemem 1966”. Średni błąd przyspieszenia w stosunku do punktu w Poczdamie oceniono na  $0,2 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

W 1971 r. przyjęto w Polsce system grawimetryczny **Poczdam 1971**. Ponownie opracowano istniejącą osnowę podstawową i wartości bazowe w nowym systemie. Skala sieci została doprowadzona do nowej wartości poprzez mnożnik:

$$K_{1971} = 0,99962 \cdot K_{1966}$$

Podstawową krajową sieć grawimetryczną w systemie Poczdam 1971 wyrównano w 1974 r., przyjmując za wyjściowe wartości ciężkości na pięciu punktach Międzynarodowego Poligonu Grawimetrycznego (Gdańsk, Warszawa, Kraków, Poczdam, Praga) i dziesięciu stanowiskach bazy krajowej. Jako charakterystykę podano błąd średni wartości przyspieszenia po wyrównaniu równy  $0,14 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Na XV Zgromadzeniu Generalnym Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki w 1971 r. zarekomendowano nowy system grawimetryczny zwany **IGSN-71** (International Gravity Standardization Net – 1971), oparty na wyznaczeniach balistycznych w ośmiu miejscach na globie [Morelli, 1974]. W Europie utworzono w latach 90. poprzedniego stulecia system grawimetryczny **UEGN** (Unified European Gravity Network). Jest on systematycznie uzupełniany i rozszerzany. Coraz lepszą konserwację i monitoring wartości przyspieszenia ziemskiego zapewnia obecnie (od lat 70. XX w.) światowa sieć punktów wyznaczeń absolutnych **IAGBN** (International Absolute Gravity Basestation Network).

W latach 1970 i 1974 na posiedzeniach Międzynarodowej Komisji Grawimetrycznej, agencji Międzynarodowej Asocjacji Geodezyjnej, rozpatrywano projekt założenia sieci precyzyjnych wyznaczeń grawimetrycznych wokół globu ziemskiego,



w pasie między równoleżnikami 30°, w celu badania wiekowych zmian ciężkości. Podczas Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (Canberra, 1979 r.) zdecydowano o realizacji tego projektu na równoleżniku 50° szerokości północnej. Sieć ma zawierać wiele profili geodynamicznych i pomiarów bezwzględnych w obserwatoriach grawimetrycznych. Zamierzenie to jest realizowane w zachodniej części Europy [Torge, 1989].

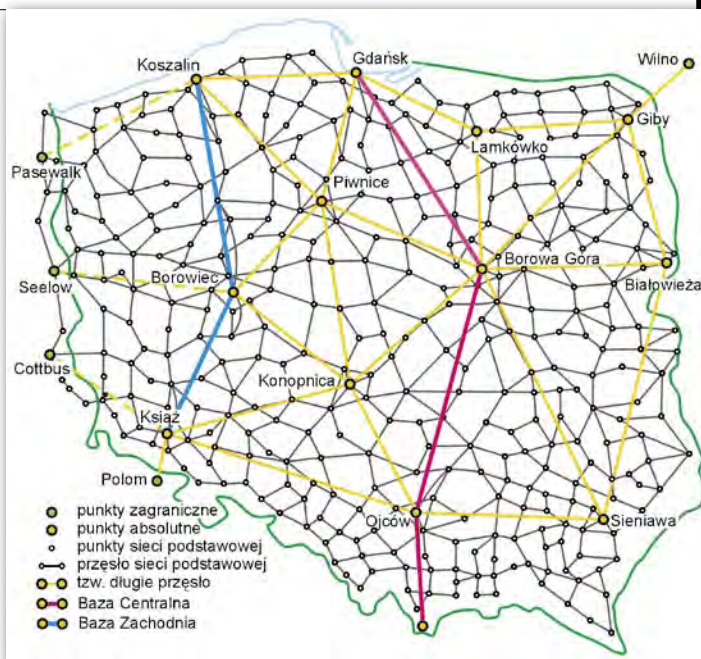
W drugiej połowie lat 90. w krajach środkowej i wschodniej Europy w ramach Inicjatywy Środkowo-Europejskiej (CEI, Central European Initiative), również w Polsce, utworzono grawimetryczną bezwzględną sieć wzorcową UNIGRACE (Unification of Gravity Systems in Central and Eastern Europe). W dwunastu uczestniczących krajach wytypowano 17 stacji, w których różnymi zestawami sprzętu balistycznego wykonano wyznaczenia wartości przyspieszenia ziemskiego. Na terytorium Polski są to dwa stanowiska, a mianowicie: w Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnym Politechniki Warszawskiej w Józefosławiu pod Warszawą i w Krokowej, w podziemiach zamku niedaleko Władysławowa na Pomorzu.

## • TWORZENIE I KONSERWACJA PODSTAWOWEJ OSNOWY GRAWIMETRYCZNEJ KRAJU

Na terytorium państwa powinna być ona założona w taki sposób, by pomiary mogły zostać wykonane w większości metodą względną. Dlatego przeszła sieci między punktami osnowy są nie dłuższe niż 200 km (transport lotniczy) lub 60 km (transport samochodowy) i jednolicie pokrywają obszar kraju. Pomiary odniesione są do tzw. punktów oporowych, na których określa się przyspieszenie siły ciężkości względem punktu w Poczdamie lub innego punktu oporowej sieci światowej (np. IGSN-71). Jest to już teraz jednak klasyczny układ hierarchii osnowy podstawowej. Dlatego na niektórych punktach sieci krajowej stabilizuje się stanowiska w budynkach, by wykonać tam pomiary aparatami absolutnymi, balistycznymi. Zalecenia Międzynarodowej Asocjacji Geodezyjnej przewidują umieszczenie co najmniej jednego stanowiska pomiarów bezwzględnych na powierzchni 15 000 km<sup>2</sup> obszaru kraju. Obecnie do podstawowej sieci grawimetrycznej Polski włączono 12 stanowisk, na których określono natężenie siły ciężkości różnymi typami instrumentów absolutnych [Uhrzynowski, 2002]. Każde stanowisko posiada dwa grawimetryczne punkty ekscentryczne, służące do kontroli stałości  $g$  na punkcie sieci.

W odniesieniu do wartości bezwzględnego przyspieszenia wyznacza się skalę przyrostów siły ciężkości na przesłach obserwacji grawimetrami statycznymi. Krajowa sieć grawimetryczna tworzy układ zamkniętych poligonów. Są to trójkąty, czworoboki i pięcioboki. Na każdym przesłach obserwacje wykonuje się jednocześnie kilkoma instrumentami. Pozwala to na ewentualną eliminację „skoków” wskazań któregoś z przyrządów.

W celu osłabienia wpływu warunków zewnętrznych obserwacje prowadzi się w kilku niezależnych rejsach. Pozwala to na dobrą eliminację dryftu grawimetrów (zmian położenia początku skali licznika z upływem czasu – skutek „starzenia się” systemu pomiarowego), wpływu temperatury, wstrząsów itp. W pomiarach polskiej sieci podstawowej zastosowano kolejność pomiarów grawimetrami statycznymi:  $A - B - B' - A' - A'' - B''$  (tzw. podwójna pętla z przerwami). Obserwacje w sieci poddaje się wyrównaniu ścisłemu. Wagi przyjmuje się najczęściej proporcjonalnie do liczby instrumentów użytych do pomiarów  $\Delta g$  przesła lub odwrotnie proporcjonalnie do kwadratów błędów średnich przesła lub średniego czasu przejazdu



Podstawowa osnowa grawimetryczna kraju

po przesłach. Wyrównanie sieci grawimetrycznej jest podobne do wyrównania podstawowej sieci niwelacyjnej.

W latach 80. i 90. poprzedniego stulecia zmodernizowano podstawową osnowę grawimetryczną Polski [Sas-Uhrzynowski i inni, 1999]. W skład nowej osnowy wchodzi 12 punktów absolutnych: Białowieża, Borowa Góra, Borowiec (pod Poznaniem), Gdańsk, Giby, Koszalin, Konopnica (pod Łodzią), Lamkówko (pod Olsztynem), Książ (pod Wałbrzychem), Ojców, Piwnice (pod Toruniem), Sieniawa. Obserwacje absolutne wykonano aparatami GABL, FG-5, JILAg-5 i polskim ZZG. Między punktami wyznaczeń absolutnych wykonano bezpośrednio, względne pomiary grupą grawimetrów LaCoste & Romberg.

Nowa osnowa składa się z 674 przesła, łączących 357 punktów, jednolicie rozłożonych na obszarze kraju. Przesła sieci tworzą wieloboki o długościach linii od 20 do 60 km. Do pomiarów używano instrumentów LaCoste & Romberg (modele G i D) i Scintrex CG-3M Autograv. W skład sieci wchodzi też dwie bazy grawimetryczne. Baza w zachodniej części kraju łączy punkty absolutne w Koszalinie, Borowcu i w Książu. Druga baza kalibracyjna przebiega od Gdańska przez Pasłęk, Olsztynek, Borową Górę, Warszawę, Radom, Ojców do Zakopanego. Na tej bazie istnieje od 2004 r. także odcinek wysokościowy z Zakopanego przez Kuźnice i Myślenickie Turnie do Obserwatorium Meteorologicznego na Kasprowym Wierchu. Po wyrównaniu polskiej osnowy podstawowej, dowiązanej do stanowisk absolutnych, dla 90% punktów sieci błąd średni określenia wartości  $g$  nie przekracza  $0,10 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  [Siporski, 1999].

Warto dodać, że polscy geodeci opracowali także projekt panafrykańskiej podstawowej sieci grawimetrycznej. Zyskał on uznanie Afrykańskiej Asocjacji Kartograficznej (Nairobi, 1971 r. i Dakkar, 1983 r.) i przyjęty został do realizacji. Polacy wykonali obserwacje podstawowej sieci grawimetrycznej Libii. Sieć tę stanowią oporowe przesła wahadłowe (zaobserwowane aparatem skonstruowanym w Politechnice Warszawskiej), i przesła zagęszczające (pomierzone grupą grawimetrów Worden-Master).

## • SZCZEGÓŁOWE POMIARY GRAWIMETRYCZNE

Na osnowie światowej i podstawowej sieci kraju rozwija się zdjęcie zagęszczające. Wyróżnia się przy tym zdjęcia regionalne,

poszukiwawcze i mikrograwimetryczne. Podział taki jest związany z powierzchnią obszaru objętego zdjęciem i ma charakter umowny. Zadaniem **zdjęcia regionalnego** jest określenie własności pola siły ciężkości przed interpretacją geofizyczną i geologiczną na obszarze o powierzchni rzędu kilku tysięcy kilometrów kwadratowych. Na podstawie takiego zdjęcia rozwija się następnie dalsze zagęszczenie punktów badania szczegółowego anomalii grawimetrycznych w wyróżnionych regionach. W wyniku zdjęcia regionalnego sporządza się mapy grawimetryczne w małych skalach, czyli 1:1 000 000 i 1:500 000. Cięcie (skok) izolinii jest dość duże na takich mapach, bo 50 lub 100  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Jeden punkt grawimetryczny przypada tam na 5 do 10  $\text{km}^2$ .

**Zdjęcia poszukiwawcze** (dzielone często jeszcze na **półszczełowe** i **szczegółowe**) prowadzi się w celu wykrycia lokalnych struktur geologicznych. Gęstość nasycenia punktami grawimetrycznymi wynosi od 2 do 100 i więcej na 1  $\text{km}^2$  obszaru. Mapy sporządza się w skalach 1:100 000, 1:200 000 z cięciem od 10 do 20  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Celem **zdzjęć poszukiwawczych szczegółowych** i **mikrograwimetrycznych** jest wyznaczenie z wysoką dokładnością parametrów zalegających złóż rud, ropy, gazu, soli itp. Sporządza się mapy w skalach od 1:5000, z cięciem od 0,5  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$  do 5  $\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ . Zagęszczenie punktów w mikrograwimetrii wynosi niekiedy jedno stanowisko na 1  $\text{m}^2$ .

Zdjęcia grawimetryczne, ze względu na sposób rozmieszczenia stanowisk instrumentów, dzieli się na **profilowe** i **powierzchniowe**. Pomiar na profilu wykonywany jest przy badaniu wydłużonych struktur geologicznych, wywołujących anomalie grawimetryczne. Zdjęcia sposobem profilowym wykonuje się podczas pomiarów na morzu, w powietrzu, a także w rejonach polarnych i trudno dostępnych. Zdjęcia profilowe towarzyszą też ciągom niwelacji precyzyjnej. Zdjęcia o charakterze powierzchniowym składają się z pomiarów na oddzielnych liniach. Odległości między liniami są zazwyczaj około trzykrotnie większe niż odległości punktów na linii. Zdjęcia grawimetryczne równomierne polegają na rozmieszczeniu stanowisk grawimetru w regularnej siatce (prostokątnej, kołowej, promieniowej).

W celu zapewnienia jednolitej skali zdjęcia, a także dla kontroli dryftu grawimetru i sprowadzenia wyników do właściwego „poziomu” odniesienia, buduje się najpierw na rozpatrywanym obszarze sieć oporową, nawiązaną do krajowej sieci podstawowej. Następną fazą to sieć zagęszczająca, czyli zdjęcia grawimetryczne. Zdjęcie zagęszczające przeprowadzono przed „erą satelitarnej geodezji” także wokół punktów Laplace’a, punktów astronomicznych i punktów niwelacji astronomiczno-grawimetrycznej. Takie pomiary wykonuje się w otoczeniu stanowisk geodynamicznej światowej sieci satelitarnej IGS (International GPS Geodynamic Service), stacji europejskich punktów odniesienia EUREF (European Reference Frame), także na punktach jej rozwinięcia na terytorium Polski (EUREF-POL) oraz na punktach satelitarnej sieci krajowej POLREF (Polish Reference Frame). Ma to umożliwić powiązanie geodezyjne sieci klasycznej i satelitarnej.

Dokładność wyznaczenia przyrostów  $\Delta g$  i wartości  $g$  w sieci oporowej powinna być ok. 1,5-2 razy wyższa niż sieci zagęszczającej. Warunek ten spełniony zostaje przez użycie dokładniejszych grawimetrów bądź innej metodyki obserwacji i lepszych środków transportu. Obserwacje między punktami sieci oporowej wykonywane są według schematu obserwacji  $A-B-A-B-C-B-C$  itd., czyli tzw. sposobem łańcuchowym. Przesła sieci oporowej tworzą sieć zamkniętych poligonów. Niekiedy figury tworzą „układy centralne” lub wielo-

węzłowe, zależnie od rozległości terenu. W terenach trudno dostępnych, o słabej sieci komunikacyjnej, sieć oporowa może tworzyć układ dwurzędowy. Stanowiska sieci oporowej wybierane są na trwałych znakach triangulacyjnych, na reperach niwelacyjnych, punktach poligonowych itp. Sieci oporowe powinny zostać następnie włączone do sieci krajowej o klasie niższej niż sieć podstawowa.

Ocenę dokładności pomiarów grawimetrycznych w sieci zagęszczającej przeprowadza się za pomocą obserwacji kontrolnych. Są to powtarzalne obserwacje, wykonywane w oddzielnych rejsach, na tych samych punktach zdjęcia grawimetrycznego. Liczba powtórzeń w sieci objąć powinna ok. 10-15% stanowisk. Na podstawie rozbieżności  $\Delta\delta = g_{i+1} - g_i$  między obserwacjami na punktach powtórzonych oblicza się błąd średni pojedynczego wyznaczenia wartości przyspieszenia w myśl wzoru:

$$m_0 = \sqrt{\frac{[\delta\delta]}{n-k}},$$

przy czym  $n$  to liczba powtórzeń obserwacji,  $k$  to liczba punktów kontrolnych.

Dla każdego punktu sieci szczegółowej określa się współrzędne geograficzne i wysokość nad poziomem odniesienia. Przy poszukiwaniach małych struktur, a więc przy precyzyjnych zdjęciach grawimetrycznych, niezbędne jest określenie wysokości stanowiska z błędem nie większym niż 5 cm. Przy wykonywanych zdjęciach regionalnych i rekonesansowych wysokości i współrzędne można określać z mapy topograficznej w skali 1:25 000 i większych. Coraz powszechniejsze staje się używanie do wyznaczeń pozycji stanowisk grawimetru techniki satelitarnej GPS.

W wyniku pomiarów sieci oporowej i szczegółowej tworzy się katalog punktów grawimetrycznych. Sposób numeracji stanowisk przewidziany jest standardami technicznymi i zależy od usytuowania w odniesieniu do stron świata i od układu arkuszy mapy topograficznej w podziale międzynarodowym (godło mapy) lub w układzie lokalnym. W katalogu umieszcza się datę pomiaru, wartość ciężkości, wysokość i współrzędne geograficzne punktu grawimetrycznego. Integralną częścią katalogu jest zbiór opisów topograficznych stanowisk sieci podstawowej i stabilizowanych trwale stanowisk sieci oporowej.

PROF. MARCIN BARLIK

jest pracownikiem Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej

Recenzent: DR ANDRZEJ SAS

jest pracownikiem Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie

#### Literatura

- Barlik M., 1991: Normalna ciężkość dla obszaru Polski w globalnych systemach odniesienia, „Przegląd Geodezyjny”, t. LXIII, nr 9;
- Barlik M., 2001a: Pomiary grawimetryczne w geodezji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa;
- Barlik M., 2001b: Wykorzystanie pionowego gradientu ziemskiej siły ciężkości w niektórych zagadnieniach geodezyjnych, GEODETA 5/2001 (cz. I) i 6/2001 (cz. II);
- Barlik M., Chruślińska M., 1999: O systemach niwelacji geometrycznej, GEODETA 4/1999;
- Morelli C. i inni, 1974: The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN'71), Bureau Central International Association of Geodesy, Paris;
- Sas-Uhrynowski, 2002: Absolute gravity measurements in Poland, Institute of Geodesy and Cartography, Monographic Series, No. 3, Warszawa;
- Sas-Uhrynowski A., Cisak M., Sas A., Siporski L, 1999: Zmodernizowana podstawowa osnowa grawimetryczna kraju (POGK'97), „Prace IGiK”, t. XLVI, z. 98, Warszawa;
- Siporski L, 1999: Wyrównanie wyników pomiarów nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju (POGK'97), „Prace IGiK”, t. XIV, z. 98, Warszawa;
- Torge W., 1989: Gravimetry. W. de Gruyter, Berlin - N. York;
- Ząbek Z., 1996: The transportable ballistic gravimeter ZZG, „Reports on Geodesy”, No. 3(21), Warsaw University of Technology, Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy, Warsaw.