

JAN KRYŃSKI

GRAWIMETRIA I MODELOWANIE POLA GRAWITACYJNEGO ZIEMI W INSTYTUCIE GEODEZJI I KARTOGRAFII

1. Wprowadzenie

Początki pomiarów grawimetrycznych datują się na przełom XVIII i XIX wieku, kiedy to przy użyciu aparatu wahadłowego wyznaczono przyspieszenie siły ciężkości z dokładnością na poziomie 10 miligali (mGal), co odpowiada dokładności względnej 10^{-5} . W wyniku licznych udoskonaleń skonstruowany w latach 1920. aparat dwuwahadłowy Sternecka umożliwiał wyznaczenie przyspieszenia siły ciężkości z dziesięciokrotnie lepszą dokładnością, tj. 1 mGal (dokładność względna 10^{-6}). Wykonywaniu pomiarów grawimetrycznych przyświecały od początku cele poznawcze, a następnie cele geologiczno-poszukiwawcze. Momentem przełomowym w grawimetrii było skonstruowanie w latach 1930. pierwszych grawimetrów statycznych przeznaczonych do szybkich względnych pomiarów grawimetrycznych, a następnie w latach 1940. używanych do dziś grawimetrów sprężynowych.

Rosnące wymagania praktyczne stawiane wykonawcom podstawowych prac geodezyjnych towarzyszące rozwojowi cywilizacji technicznej w XIX wieku spowodowały, że do opisu i rozwiązania zadań geodezji, traktowanej dotychczas jako geometria stosowana, niezbędne stało się korzystanie z narzędzi fizyki. Kształt Ziemi zaczęto opisywać za pomocą powierzchni stałego potencjału siły ciężkości zwanej geoidą. Jest to powierzchnia poziomowa pokrywająca się z uśrednioną powierzchnią morza, która stanowi powierzchnię odniesienia do określania wysokości terenu. Z kolei linie pionu, które stanowią podstawowy element orientacji w przestrzeni geodezyjnego instrumentu pomiarowego (teodolit, niwelator), są liniami sił pola siły ciężkości. Stwierdzono, że ani wykorzystywane w niwelacji powierzchnie poziome nie są wzajemnie równoległe, ani linie pionu nie są liniami prostymi. Ich kształt stanowi odbicie niejednorodnego rozkładu mas ziemskich, głównie w najbardziej zewnętrznych warstwach Ziemi. Dokładne opracowanie podstawowych pomiarów geodezyjnych wymaga zatem odpowiednich informacji o polu siły ciężkości, w szczególności znajomości elementów wektora przyspieszenia siły ciężkości, tj. jego kierunku i długości. Informacje takie uzyskiwano, korzystając z matematycznego z modelu tzw. normalnego pola siły ciężkości. Wielkości obliczane z modelu normalnego pola siły ciężkości stosowano w Polsce w okresie międzywojennym przy opracowywaniu osnów podstawowych. Dzięki wykorzystaniu grawimetrów względnych możliwe stało się

uzyskanie dokładniejszego opisu rzeczywistego pola siły ciężkości, a co za tym idzie dokładniejszego opracowania podstawowych pomiarów geodezyjnych.

Wykorzystanie pomiarów grawimetrycznych do celów geodezyjnych wymaga zapewnienia jednolitości grawimetrycznego poziomu odniesienia oraz przedstawienia wyników w jednostkach zgodnych z jednostkami przyspieszenia siły ciężkości. Jednolitość grawimetrycznego poziomu odniesienia zapewnia osnowa grawimetryczna. Początkowo tworzyły ją tzw. punkty wahadłowe, tj. punkty, na których przy użyciu aparatu wahadłowego wyznaczano absolutną wartość przyspieszenia siły ciężkości. Punkty te były powiązane za pośrednictwem względnych pomiarów wahadłowych (były one z natury dokładniejsze niż pomiary absolutne) z punktem centralnym (odniesienia) systemu grawimetrycznego [na mocy rezolucji Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (IAG), w latach 1909–1971 obowiązywał grawimetryczny system poczdamski]. W celu zapewnienia odpowiedniej jednostki grawimetrycznej zakładano oparte na punktach osnowy grawimetryczne bazy kalibracyjne wykorzystywane do kalibrowania (cechowania) grawimetrów względnych.

Już przed I wojną światową na terenie Polski, na obszarze ówczesnych zaborów austriackiego i rosyjskiego, względne pomiary przyspieszenia siły ciężkości wykonywano aparatami wahadłowymi. Z uwagi jednak na niską dokładność pomiarów nie nadawały się one do wykorzystania w opracowaniach do celów geodezyjnych (Bokun, 1958). W okresie międzywojennym grawimetryczne pomiary aparaturą wahadłową wykonywano z inicjatywy Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie oraz Głównego Urzędu Miar. Jedynie pomiary wykonane aparaturą wahadłową przez GUM w latach 1930–1938, w przeważającej części na punktach położonych na wschód od Bugu, charakteryzujące się średnim błędem 1 mGal, nadawały się do wykorzystania i to nie jako punkty osnowy, a jako punkty kontrolne przy pracach grawimetrycznych (Bokun i Sas, 1985). Na potrzeby geologiczne w kilku rejonach kraju wykonano pomiary przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu grawimetrów statycznych. Większość z nich zaginęła i tylko nieliczne mogły po wojnie być wykorzystane na potrzeby zdjęcia grawimetrycznego kraju (Bokun, 1958).

Rozwiązywanie i wykonywanie zadań w zakresie grawimetrii geodezyjnej na potrzeby służby geodezyjnej powierzono po II wojnie światowej Geodezyjnemu Instytutowi Naukowo-Badawczemu (obecny Instytut Geodezji i Kartografii) utworzonemu w 1945 roku jako zaplecze badawczo-rozwojowe Głównego Urzędu Pomiarów Kraju (obecny Główny Urząd Geodezji i Kartografii). Zadania te koncentrowały się na działaniach w kierunku zakładania, a następnie modernizowania osnowy grawimetrycznej kraju i związanych z nimi problemach metodycznych i instrumentalnych, w dalszej zaś kolejności na gromadzeniu i ujednoliceniu istniejącego materiału grawimetrycznego w aspekcie jego wykorzystania do celów geodezyjnych. W szczególności dotyczyły one wyznaczania geoidy grawimetrycznej – powierzchni, której znajomość jest niezbędna do opracowywania klasycznych pomiarów geodezyjnych. W ostatnim dziesięcioleciu XX wieku w Obserwatorium Borowa Góra zainicjowano obserwacje pływów ziemskich.

Od pierwszych lat XXI wieku datuje się w IGiK intensywny rozwój badań w zakresie modelowania pola siły ciężkości Ziemi z wykorzystaniem danych pozyskiwanych nie tylko technikami naziemnymi, ale również technikami lotniczymi i satelitarnymi. Wyniki prac badawczych uzyskanych w IGiK w zakresie grawimetrii geodezyjnej, w szczególności dotyczących tworzenia nowoczesnej osnowy grawimetrycznej przy wykorzystaniu wyznaczeń absolutnych przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem balistycznym A10, oraz prac związanych z wykorzystaniem danych z grawimetrycznych misji satelitarnych do modelowania geoidy stawiają IGiK w czołówce światowej zespołów rozwiązujących najnowsze problemy grawimetrii.

W całej 70-letniej historii Instytutu liczba pracowników, którzy zajmowali się problematyką grawimetrii, nie przekracza 25. Zespoły powołane w Instytucie do prowadzenia prac w zakresie grawimetrii zajmowały różne miejsca w zmieniających się strukturach Instytutu. Po Jerzym Niewiarowskim inicjatywę, a następnie kierowniczą rolę przez ponad 20 lat, do końca przedostatniej dekady XX wieku, przejął Jerzy Bokun. Szybko stał się on niekwestionowanym autorytetem w zakresie grawimetrii w kraju i w obozie państw bloku wschodniego. Współpracował on także blisko jako członek z Międzynarodowym Biurem Grawimetrycznym IAG (Bureau Gravimétrique International). Koncepcje Jerzego Bokuna w zakresie modernizacji osnowy grawimetrycznej kraju były rozwijane i realizowane przez kolejne 10 lat przez zespół, na którego czele stał Andrzej Sas-Uhrynowski. Od 2002 roku tematyka grawimetrii uprawiana jest w Instytucie w Zakładzie Geodezji i Geodynamiki (obecnie Centrum Geodezji i Geodynamiki) kierowanym przez autora niniejszego opracowania.

2. Zakładanie i modernizacja klasycznej osnowy grawimetrycznej kraju

Potrzeby gospodarcze Polski ukształtowanej po II wojnie światowej w nowych granicach określiły strategiczne zadania geodezji związane z koniecznością założenia jednolitych, dokładnych osnów geodezyjnych na terenie kraju. W 1952 roku podjęto ostateczne decyzje o włączeniu do tych zadań prac grawimetrycznych. Do pierwszych prac w zakresie grawimetrii geodezyjnej przystąpiono w 1950 roku w Geodezyjnym Instytucie Naukowo-Badawczym. Dotyczyły one opracowania wykonanych grawimetrem Nörngaarda pomiarów grawimetrycznych na doświadczalnym poligonie w okolicach Warszawy. Prace te stanowiły pierwszy fragment przygotowań do zakrojonych na dużą skalę prac grawimetrycznych na terenie kraju. Instytutowi Geodezji i Kartografii powierzono zadanie zebrania i przeanalizowania istniejących materiałów grawimetrycznych oraz przygotowanie szczegółowych projektów wykonawczych.

W pierwszej kolejności sieć składającą się z 38 punktów wahadłowych założonych na terenie Polski przez Instytut Geodezji w Poczdamie w latach 1936–1943 (rys. 1) uznano za wystarczająco dokładną (średni błąd przyspieszenia siły ciężkości oszacowano na 0.4 mGal), aby stanowiła osnowę grawimetryczną dla prac przygotowawczych kierunku ujednolicenia grawimetrycznego

poziomu odniesienia w Polsce oraz dla nowych pomiarów grawimetrycznych niezbędnych do wykonania na potrzeby tworzonej na terenie kraju sieci niwelacji precyzyjnej I klasy i sieci astronomiczno-geodezyjnej (Bokun, 1958).



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów wahadłowych założonych przez Instytut Geodezyjny w Poznaniu

Po przeprowadzeniu wnikliwej analizy zgromadzonych materiałów grawimetrycznych dokonano wyboru wyników pomiarów grawimetrycznych kwalifikujących się do wykorzystania na potrzeby opracowania sieci triangulacji i niwelacji. Zaprojektowano również, a następnie wykonano pomiary powiązujące istniejące grawimetryczne sieci regionalne.

W 1956 roku została zaprojektowana w IGiK baza grawimetryczna do kalibracji grawimetrów względnych: Gdańsk–Warszawa–Kraków–Zakopane–Kuznice–Kasprowy Wierch (Bokun, 1957) (rys. 2).

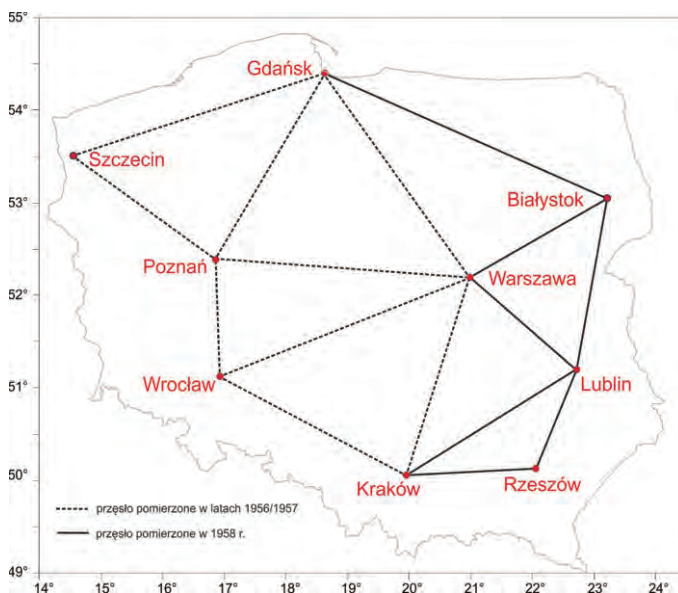
Pomiary przyspieszenia siły ciężkości na punktach kalibracyjnej bazy grawimetrycznej wykonał w 1956 roku w ramach współpracy z IGiK zespół Katedry Geodezji Wyższej Politechniki Warszawskiej aparatem czterowahadłowym firmy Askania zgodnie z opracowaną przez ten zespół strategią pomiarów (Ząbek i Dobaczewska, 1957).

W 1958 roku staraniem IGiK rozbudowano kalibracyjną bazę grawimetryczną. Odcinek Kraków–Kuznice podzielono na 6 przęseł, na których różnice przyspieszenia siły ciężkości wyznaczono z pomiarów grawimetrem Askania Gs-11. W latach 1959–1960 dokonano kolejnej rozbudowy kalibracyjnej bazy grawimetrycznej w północnej części kraju, zakładając pomiędzy punktami Gdańsk i Warszawa nowe punkty bazy: Góra Dylewska, Ostróda, Elbląg i Frombork (Bokun i Sas, 1985).



Rys. 2. Grawimetryczna baza kalibracyjna Gdańsk–Warszawa–Kraków–Zakopane–Kuźnice–Kasprowy Wierch

W celu dalszego ujednolicenia grawimetrycznego poziomu odniesienia w Polsce zaprojektowano w IGiK podstawową sieć punktów wahadłowych, składającą się z 9 punktów równomiernie rozłożonych na terenie kraju (Bokun i Niewiarowski, 1959) (rys. 3).



Rys. 3. Podstawowa sieć wahadłowa Polski

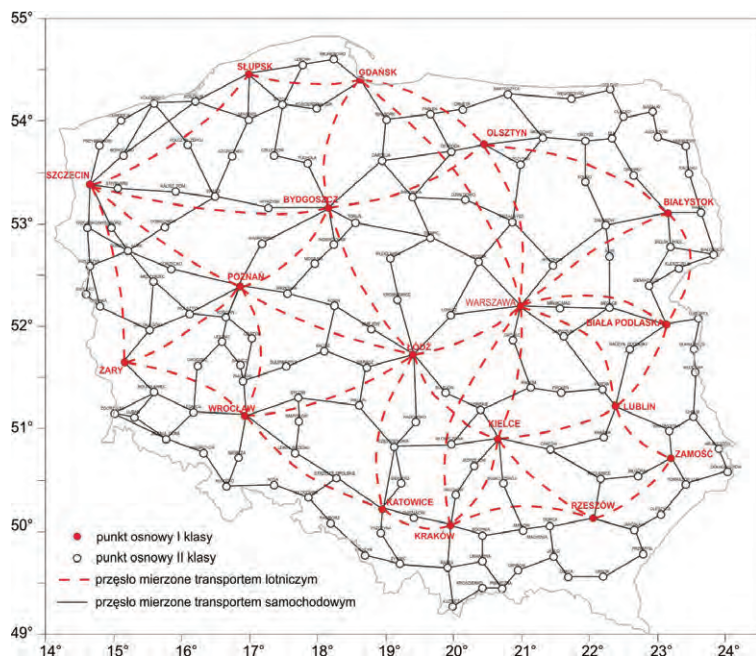
Przy projekcie podstawowej sieci wahadłowej uwzględniono jej korelację z siecią grawimetryczną zakładaną przez Państwowy Instytut Geologiczny (PIG). Pomiary na punktach podstawowej sieci wahadłowej wykonał w ramach współpracy z IGiK zespół Katedry Geodezji Wyższej Politechniki Warszawskiej aparatem czterowahadłowym firmy Askania. Pomiary na punktach zachodniej części sieci wahadłowej wykonano w roku 1957 (Ząbek i Dobaczewska, 1959), zaś na punktach wschodniej części sieci w 1958 roku (Ząbek i Dobaczewska, 1960a). Średni błąd wyznaczenia przęseł w sieci wahadłowej wyniósł 0.15 mGal (Bokun i Bujnowski, 1959).

W 1956 roku dobiegały końca prace nad wykonywanym do celów poszukiwawczych regionalnym zdjęciem grawimetrycznym kraju o zagęszczeniu 1 punkt na 4 km². Zdjęcie to było początkowo dowiązywane do istniejących grawimetrycznych punktów wahadłowych, założonych z inicjatywy IGiK przez zespół Politechniki Warszawskiej i dowiązanych do systemu poczdamskiego. Z uwagi na pilną potrzebę ujednolicenia zdjęć grawimetrycznych PIG przystąpił do prac nad założeniem odpowiednio gęstej osnowy grawimetrycznej kraju. Punkty osnowy I klasy zostały pomierzone przez zespół PIG w latach 1955–1957, zaś osnowy II klasy w latach 1957–1962 przez zespoły PIG, Państwowego Przedsiębiorstwa Poszukiwań Geofizycznych (PPPG) i IGiK.

Osnowa grawimetryczna I klasy składała się z 18 zastabilizowanych punktów (rys. 4). Punkty te zlokalizowano na lotniskach w celu umożliwienia wykonania na nich względnych pomiarów grawimetrycznych przy wykorzystaniu transportu lotniczego, co miało zmniejszyć wpływ efektu nieliniowości dryftu grawimetru na pomierzone różnice przyspieszenia siły ciężkości. Pomiary różnic przyspieszenia siły ciężkości wykonano cechowanym na punktach wahadłowych sieci IGiK grawimetrem Askania Gs-11 z błędem $\sigma_{\Delta g} = \pm 0.11$ mGal. Obserwacje wyrównano w PIG w 1959 roku w systemie poczdamskim. Błędy przyspieszenia siły ciężkości σ_g po wyrównaniu zawierają się w przedziale ± 0.039 – 0.070 mGal (Bokun i Bujnowski, 1959).

Osnowa grawimetryczna II klasy składała się z 144 niezastabilizowanych punktów odległych wzajemnie o 50–60 km (rys. 4). Pomiary różnic przyspieszenia siły ciężkości wykonano cechowanymi na punktach osnowy I klasy grawimetrami Askania Gs-11 z błędem $\sigma_{\Delta g} = \pm 0.04$ mGal, korzystając z transportu samochodowego. Pozycje punktów grawimetrycznych określono w systemie Borowa Góra, zaś ich wysokości w systemie Kronstadt60. Obserwacje wyrównano w IGiK w 1962 roku w systemie poczdamskim, w dwóch wersjach. W pierwszej wersji wyrównania wartości przyspieszenia siły ciężkości na punktach osnowy I klasy przyjęto jako stałe, w drugiej zaś przyspieszenia siły ciężkości na wszystkich punktach osnowy I i II klasy poddano wyrównaniu, przyjmując jako odniesienie punkt międzynarodowej sieci grawimetrycznej Warszawa Okęcie. W ten sposób przeniesiono jednostkę międzynarodowej sieci grawimetrycznej krajów bloku wschodniego „1958” Poczdam–Warszawa–Praga na bazę grawimetryczną i krajową osnowę grawimetryczną. Błędy przyspieszenia siły ciężkości σ_g po wyrównaniu z pierwszej i drugiej wersji opracowania zawierają się odpowiednio

w przedziałach ± 0.015 – 0.0143 mGal i ± 0.016 – 0.062 mGal. Wyniki drugiej wersji wyrównania przyjęto w PIG jako system grawimetryczny dla Polski – system PIG-62. Uzyskane dokładności punktów sieci były wystarczające do prac grawimetrycznych prowadzonych do celów geologiczno-poszukiwawczych przez resort geologii (Kryński, 2007a).

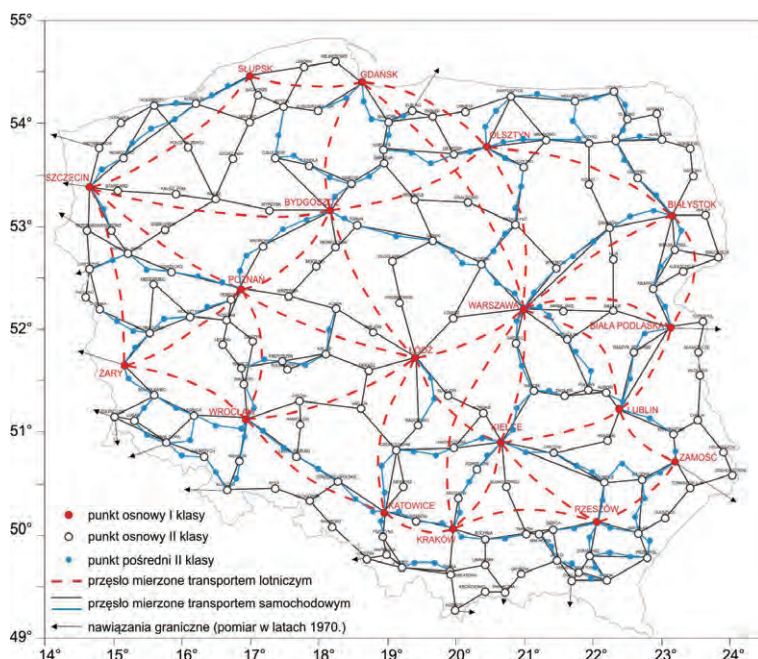


Rys. 4. Osnowa grawimetryczna systemu PIG-62

Założona w latach 1955–1962 przez PIG podstawowa osnowa grawimetryczna nie spełniała standardów określonych przez Międzynarodową Asocjację Geodezji. Do celów grawimetrii geodezyjnej zarówno dokładność, jak i zagęszczenie istniejącej osnowy nie były wystarczające (Bokun i Sas, 1984). Przeprowadzona w IGiK analiza wyników wyrównania oraz wyniki uzyskane z grawimetrycznych pomiarów kontrolnych wykazały na kilku punktach I klasy błędy przekraczające granice tolerancji; również błąd przyjętej wartości jednostki grawimetrycznej przekraczał granice określone standardem (Bokun, 1961a). Nie powiodły się próby uzgodnienia stanowiska i ewentualnych wspólnych działań służb geodezyjnej i geologicznej w kierunku udoskonalenia podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju. Prace nad modernizacją tej osnowy podjęte zostały w IGiK. Liczbę punktów II klasy zwiększono do 164. Dodatkowo zaprojektowano i pomierzono w IGiK w latach 1962–1964 122 punktów pośrednich II klasy (rys. 5).

Do osnowy włączono również wyniki względnych pomiarów grawimetrycznych na przesłach Gdańsk–Warszawa–Kraków (1962 r.) oraz pomiarów względnych aparatem czterowahadłowym (z lat 1956–1959). Dodatkowe pomiary

wykonano grawimetrem Askania Gs-11, kalibrowanym na punktach osnowy I klasy oraz sieci grawimetrycznych punktów wahadłowych IGiK (Bokun, 1973). Opracowanie obserwacji i wyrównanie sieci z uwzględnieniem wag wykonano w IGiK w 1965 roku na maszynie elektronicznej UMC-10 w systemie poczdamskim z wykorzystaniem 4 punktów odniesienia należących do założonej w 1958 roku międzynarodowej sieci grawimetrycznej bloku wschodniego. Błędy przyspieszenia siły ciężkości σ_g po wyrównaniu dla punktów I i II klasy zawierają się odpowiednio w przedziałach ± 0.007 – 0.023 mGal i ± 0.015 – 0.042 mGal. Wyniki wyrównania przyjęto w IGiK jako system grawimetryczny dla Polski – system IGiK-66. Poziom grawimetryczny tej sieci był zatem określony przez międzynarodową sieć krajów bloku wschodniego z 1958 roku.



Rys. 5. Osnowa grawimetryczna systemu IGiK-66

Kolejny system grawimetryczny – system IGiK-68 powstał jako konsekwencja założonego w 1968 roku Międzynarodowego Poligonu Grawimetrycznego (MEGP), składającego się z 19 punktów międzynarodowych (rys. 6). Założenie tego poligonu miało na celu zapewnienie jednorodności standardu i skali sieci grawimetrycznych w byłych państwach socjalistycznych (Bokun, 1973).

Wartości różnic Δg prześel utworzonych przez punkty Gdańsk, Warszawa i Kraków pozwoliły na określenie współczynnika zmiany skali między jednostką sieci w systemie IGiK-66 i jednostką Międzynarodowego Poligonu Grawimetrycznego. Za pomocą tego współczynnika zredukowano wszystkie prześła sieci pomierzone w systemie IGiK-66, doprowadzając je do skali Międzynarodowego

Poligonu Grawimetrycznego. Tak przygotowany materiał posłużył do ponownego wyrównania istniejącej sieci w oparciu o trzy wyżej wymienione punkty. Ponowne wyrównanie istniejącej sieci grawimetrycznej określiło nowy system IGiK-68 (Bokun i Sas, 1985).



Rys. 6. Międzynarodowy Poligon Grawimetryczny

W latach 1968–1971 na bazie punktów MEGP zakładane były narodowe poligony grawimetryczne. Założony przez IGiK Polski Narodowy Poligon Grawimetryczny (NEGP) opierał się na przesłach Gdańsk–Warszawa–Kraków oraz Kraków–Kuźnice i zawierał 13 punktów. Wyniki pomiarów na NEGP opracowano w systemie grawimetrycznym IGiK-68.

Uchwałą XV Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) w Moskwie w 1971 roku na potrzeby geodezji wprowadzono nowy, międzynarodowy system grawimetryczny International Gravity Standardization Net – 1971 (IGSN71), który zastąpił dotychczasowy system poczdamski. Potrzeba przejścia do nowego systemu grawimetrycznego uzasadniona była przede wszystkim wynikami pomiarów absolutnych uzyskanych przy użyciu nowoczesnych grawimetrów balistycznych. Ustalono, że w celu przejścia od systemu poczdamskiego do IGSN71 należy wprowadzić poprawkę -14 mGal do przyspieszenia siły ciężkości.

Konferencja Służb Geodezyjnych krajów bloku wschodniego w Warszawie w kwietniu 1972 roku przyjęła system IGSN71 jako obowiązujący we wszystkich byłych krajach socjalistycznych, w tym także w Polsce. Systemy grawime-

tryczne IGiK-68 i PIG-62 odniesione do systemu poczdamskiego zastąpiono systemami IGiK-68-IGSN71 i PIG-IGSN71 odniesionymi do systemu IGSN71. Jednocześnie, współrzędne punktów przeliczono do obowiązującego wówczas w kraju systemu 1942.

Kierując się potrzebą uzyskania z wysoką dokładnością wyznaczenia przyspieszenia siły ciężkości na punktach osnowy grawimetrycznej I i II klasy w systemie IGSN71, zarówno pod względem jednostki, jak i poziomu odniesienia, w 1973 roku w IGiK ponownie opracowano istniejący materiał grawimetryczny wykorzystany w systemie IGiK-66 (Bokun, 1973). Po wprowadzeniu poprawki z tytułu zmiany jednostki do każdego pomierzonego przęśla (z wyjątkiem przęseł łączących punkty NEGP z punktami osnowy grawimetrycznej I i II klasy) dokonano wyrównania, przyjmując za bezbłędne wartości przyspieszenia siły ciężkości na 15 punktach punkty MEGP i NEGP (Kryński, 2007a). Obliczenia przeprowadzono na maszynie cyfrowej Odra 1204. Wyniki wyrównania określiły osnowę grawimetryczną Polski w systemie 1971, nazwanym IGiK-IGSN71 (Bokun i Sas, 1974).

Integralną częścią prac związanych z zakładaniem osnowy grawimetrycznej kraju do celów geodezyjnych były działania w kierunku zapewnienia stałości jednostki grawimetrycznej osnowy (Bokun, 1961c). Kluczową rolę przypisano zagadnieniu kalibracji grawimetrów względnych, biorąc pod uwagę warunki krajowe (Bokun i Chojnicki, 1961). Szczególną uwagę poświęcono opracowaniu metodyki kalibracji grawimetrów typu Askania Gs-11 wykorzystywanych do bezpośrednich prac przy osnowie grawimetrycznej (Chojnicki, 1962) wspartej licznymi eksperymentalnymi przeprowadzonymi na grawimetrycznych bazach kalibracyjnych (Chojnicki, 1966b). Rozwijano również metody laboratoryjne kalibracji małowzakresowych grawimetrów względnych (Chowańska-Otyś, 1971; Sas, 1973).

Nowe tendencje i osiągnięcia w grawimetrii geodezyjnej na świecie (Bokun i in., 1976), w szczególności w zakresie absolutnych wyznaczeń przyspieszenia siły ciężkości w USA, ZSRR i we Włoszech, wsparte krytyczną oceną istniejącej osnowy grawimetrycznej kraju oraz potrzebami dotyczącymi opracowań grawimetrycznych w produkcji geodezyjnej (Bokun, 1977), zaważyły na decyzji o podjęciu działań w kierunku utworzenia nowej osnowy grawimetrycznej. W 1978 roku opracowano w IGiK szczegółowy projekt nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej obejmującej 345 punktów, dokonano wyboru lokalizacji punktów osnowy, a następnie zastabilizowano wszystkie punkty osnowy (Bokun i Sas, 1984, 1985; Cisak, 1993). W dekadzie poprzedzającej przemiany ustrojowe w Polsce nie znalaziono jednak środków na wykonanie pomiarów grawimetrycznych na punktach nowej osnowy. Jednocześnie nie bez znaczenia dla zahamowania prac nad osnową grawimetryczną był brak dostępu do nowoczesnego sprzętu grawimetrycznego. Nałożone na kraje bloku wschodniego embargo na nowoczesne technologie uniemożliwiały nabycie, bardzo drogiego skądinąd, sprzętu grawimetrycznego. Dodatkowym czynnikiem hamującym rozwój grawimetrii geodezyjnej w Polsce były boleśnie restrykcyjne przepisy tajności, które swoim zasięgiem obok danych geodezyjnych, fotogrametrycznych i kartograficznych

obejmowały dane grawimetryczne. Klauzulą tajności były również objęte nie tylko wyniki wyrównania i opracowania danych grawimetrycznych, ale także szczegóły opisujące rozwiązania systemowe. Opracowania w postaci raportów, zawierające liczne wątki naukowe, były przechowywane w tajnej kancelarii IGIK. W konsekwencji powstał bardzo skromny materiał publikacyjny. Przepisy tajności wyjaśniają również brak udziału innych krajowych geodezyjnych ośrodków naukowo-badawczych w pracach w zakresie grawimetrii geodezyjnej prowadzonych przez IGIK na arenie krajowej.

3. Zakładanie i modernizacja nowoczesnej osnowy grawimetrycznej

Wraz z przemianami ustrojowymi roku 1989 otworzył się nowy rozdział w działalności na polu grawimetrii geodezyjnej w Polsce. Zniesiono klauzulę tajności na wszystkie dane grawimetryczne. Zniesione zostało również embargo na nowoczesne technologie, w tym sprzęt grawimetryczny i komputerowy. Jednocześnie następował rozwój grawimetrów absolutnych umożliwiających przy wykorzystaniu techniki opartej na zasadzie swobodnego spadku wyznaczenie przyspieszenia siły ciężkości z dokładnością wymaganą na potrzeby geodezyjne. Zalecana przez Międzynarodową Komisję Grawimetryczną Międzynarodowej Asocjacji Geodezji koncepcja współczesnej podstawowej osnowy grawimetrycznej zakładała oparcie jej na punktach, na których mają być wykonane absolutne pomiary przyspieszenia siły ciężkości, przy czym jeden punkt absolutny powinien przypadać na 15 000 km², co w przypadku Polski sprowadza się do 20 punktów (Sas-Uhrynowski, 2002).

Zespół ówczesnego Zakładu Geodezji Fizycznej IGIK aktywnie przystosowywał się do nowych warunków i potrzeb służby geodezyjnej. W 1991 roku we współpracy z Instytutem Metrologia w Kijowie na Ukrainie przystąpiono do intensywnych badań nad wykorzystaniem posiadanych przez ten instytut grawimetrów balistycznych GP-4 i GP-5 do pomiarów absolutnych na punktach nowej podstawowej sieci grawimetrycznej kraju (Sas i in., 1993). Na pięciu punktach przyszłej osnowy grawimetrycznej wykonano pomiary przyspieszenia siły ciężkości tymi grawimetrami. Jednocześnie przystąpiono do prac projektowych nad założeniem nowoczesnej osnowy grawimetrycznej kraju. W 1992 roku opracowano projekt sieci punktów absolutnych i przeprowadzono wywiad terenowy na wszystkich 18 punktach sieci (Cisak, 1993). W latach 1994–1995 zakupiono cztery grawimetry sprężynowe LaCoste&Romberg typu G (LCR), w tym jeden zaopatrzony w dodatkowe urządzenie pomiarowe zwane feedbackiem. Przeprowadzono następnie badania instrumentalne nowo nabytego sprzętu (rys. 7) (Cisak, 1998).

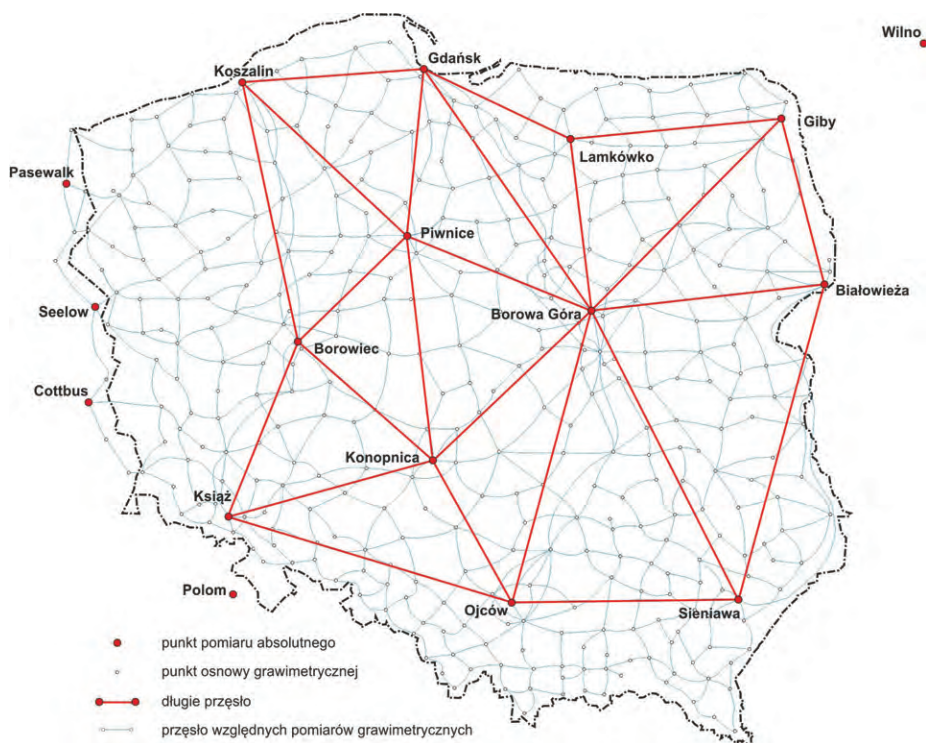
W 1994 roku rozpoczęto realizację nowego projektu osnowy grawimetrycznej Polski. Założona przez IGIK [pomiaru wykonane przez zespoły IGIK, Politechniki Warszawskiej, Zarządu Topograficznego Wojska Polskiego oraz Institute of Applied Geodesy (IfAG), z Frankfurtu nad Menem, Niemcy (obecnie BKG) w latach 1994–1998] nowa, jednolita krajowa osnowa grawimetryczna POGK-98

(rys. 8) została oparta na 12 punktach absolutnych wyznaczeń przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu dwóch grawimetrów balistycznych FG5 [IfAG, Frankfurt nad Menem oraz Defence Mapping Agency (DMA), USA] oraz grawimetru balistycznego JILAg5 (Fińskiego Instytutu Geodezyjnego w Helsinkach) z dokładnością $\sigma_g = \pm 0.002\text{--}0.005$ mGal (Sas-Uhrynowski i in., 1998, 1999; Kryński i in., 2003). Osnowa ta składa się z 363 punktów i zawiera jedynie 18 ocalałych punktów poprzednich osnów grawimetrycznych I i II klasy. Względne pomiary grawimetryczne wykonano kalibrowanymi na grawimetrycznej bazie kalibracyjnej grawimetrami LCR z dokładnością $\sigma_{\Delta g} = \pm 0.010$ mGal. Pozycje punktów osnowy określono z map topograficznych w skali 1:50 000 w systemie 1942 z błędem $\sigma_x = \sigma_y = \pm 50$ m. Niestety, z uwagi na brak środków wysokości punktów osnowy nie zostały wyznaczone niwelacyjnie. Za punkt fundamentalny osnowy przyjęto punkt w Obserwatorium Borowa Góra (Cisak i in., 1998). Obserwacje grawimetryczne wyrównano w IGiK w 1998 roku przyjmując punkt w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym Borowa Góra jako punkt odniesienia. Sieć została wyrównana w 1998 roku w oparciu o 6 punktów absolutnych (Koszalin, Borowiec, Książ, Gdańsk, Borowa Góra, Ojców) przyjętych jako bezbłędne (Sas, 1999). Błąd wyrównanej wartości przyspieszenia siły ciężkości na punkcie osnowy nie przekracza $\sigma_g = \pm 0.010$ mGal (Sas-Uhrynowski i in., 1998, 1999, 2000; Siporski, 1999). Powstałemu w ten sposób nowemu systemowi grawimetrycznemu dla obszaru Polski nadano nazwę POGK98.



Rys. 7. Grawimetr LaCoste&Romberg typu G na słupie w Obserwatorium Borowa Góra

Szczególnie wnikliwej analizie poddano pomiary absolutne wykonane na punktach POGK98 (Sas-Uhrynowski, 1998; Sas-Uhrynowski i Cisak, 2001; Kryński i in., 2003). W celu kontroli wyników wyznaczeń absolutnych przyspieszenia siły ciężkości na punktach osnowy wykonano w IGiK projekt techniczny i opracowano technologię pomiaru długich przęsał łączących punkty absolutne osnowy. Pomiary grawimetryczne na 26 długich przęsałach (z uwzględnieniem punktów zagranicznych: Passewalk, Seelow, Cottbus, Polom i Wilno) wykonał zespół IGiK grawimetrami LaCoste&Romberg. Dokładność wyznaczonych różnic przyspieszenia siły ciężkości oszacowano na $\sigma_{\Delta g} = \pm 0.010$ mGal.



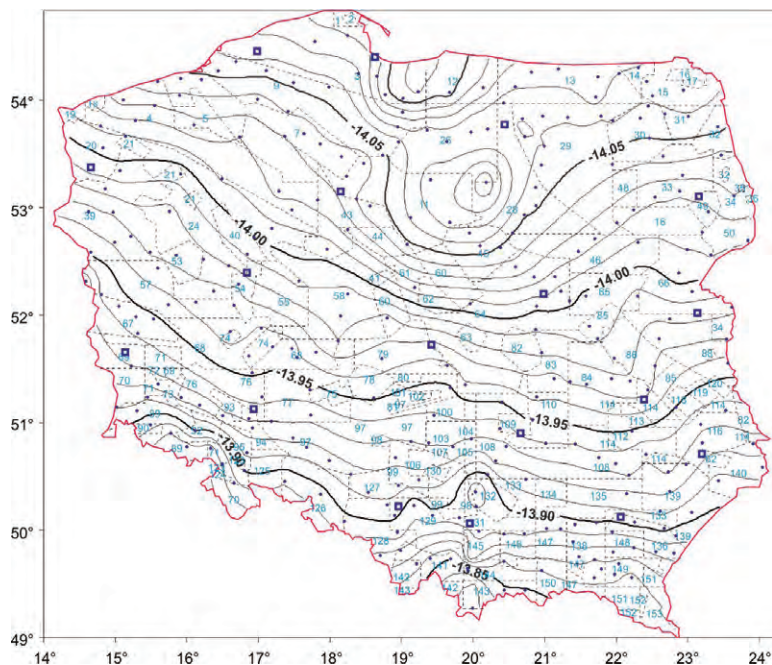
Rys. 8. Osnowa grawimetryczna systemu POGK98

Przeprowadzono ocenę (Siporski i in., 2000) osnowy grawimetrycznej POGK98 oraz analizę porównawczą tej osnowy z poprzednimi osnowami grawimetrycznymi (Sas, 1998, 1999).

Z przerwami kontynuowano rozpoczętą w 1991 roku współpracę z Instytutem Metrologia w Kijowie na Ukrainie w zakresie absolutnych wyznaczeń przyspieszenia siły ciężkości. W ramach projektu badawczego wykonano serię badań nad udoskonaleniem polowego grawimetru balistycznego TBG (Zanimonskiy i in., 1999) oraz jego wykorzystaniem do wyznaczenia standardu podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju (Siporski, 2000), a następnie udoskonaleniem (Sas-Uhrynowski i in., 2001). W szczególności przedmiotem badań były prace nad strategią pomiarową przy użyciu grawimetru balistycznego (Zanimonskiy i in., 2003).

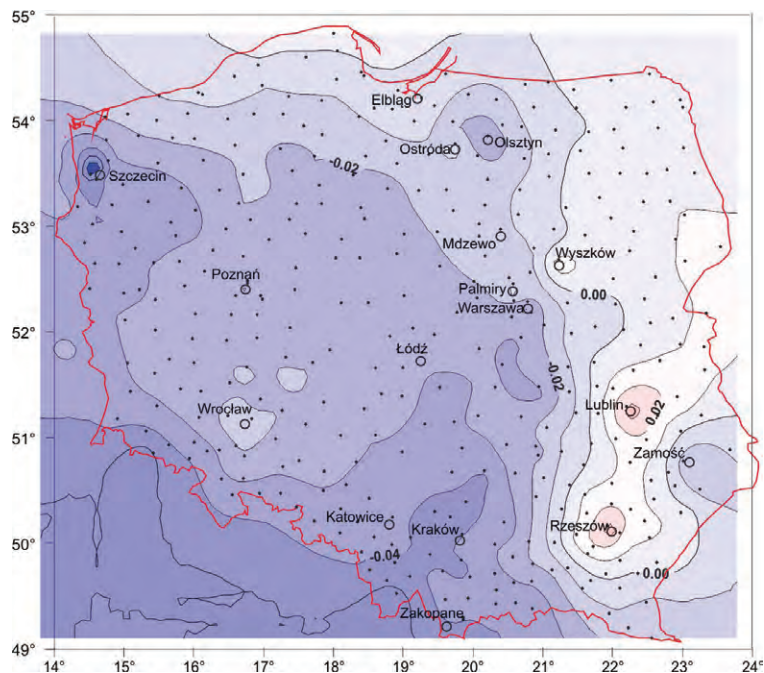
Kolejny system grawimetryczny dla Polski o nazwie POGK04 opracowano w IGiK w 2004 roku, korzystając ze strategii użytej w przypadku POGK98. Dane wykorzystane do utworzenia systemu POGK98 uzupełniono względnymi pomiarami grawimetrycznymi 4 dodatkowych punktów osnowy oraz pomiarem absolutnym przyspieszenia siły ciężkości wykonanym na punkcie w Zakopanem grawimetrem balistycznym FG5 Fińskiego Instytutu Geodezji w Helsinkach (Kryński, 2007a).

W ramach koordynowanego przez IGiK projektu badawczego zamawianego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowanego w latach 2002–2005 wykonano w Instytucie badania dotyczące grawimetrycznych układów odniesienia i ich wzajemnej relacji. Między innymi określono relacje umożliwiające przejście od systemu IGiK-66 do IGiK-68-IGSN71 (rys. 9), od systemu IGiK-68-IGSN71 do POGK98 (rys. 10) oraz od systemu PIG-IGSN71 do POGK98 i POGK04 (rys. 11) (Kryński, 2007a).

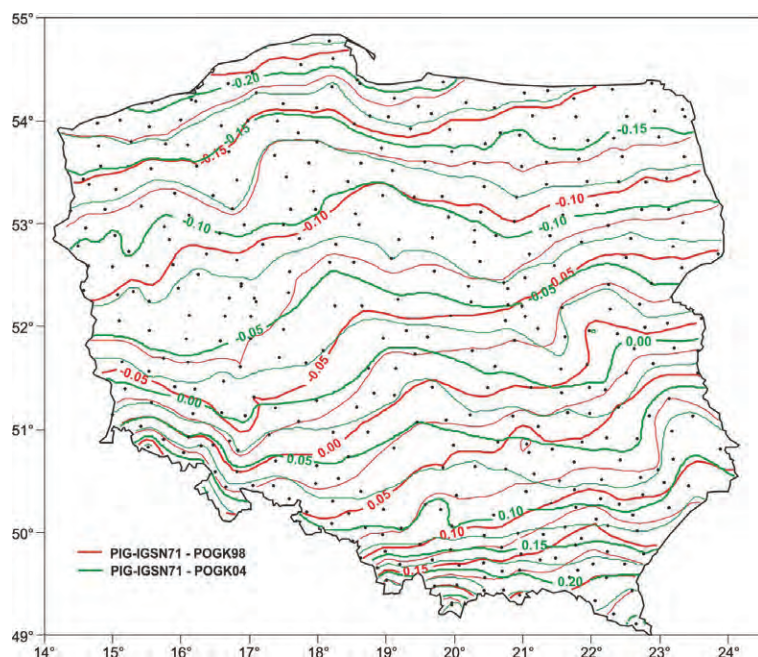


Rys. 9. Różnice wartości przyspieszenia siły ciężkości między systemami IGiK-66 i IGiK-68-IGSN71 [mGal]

Wyniki licznych analiz przeprowadzonych w IGiK wskazały na potrzebę modernizacji osnowy POGK98, ze szczególnym uwzględnieniem grawimetrycznych baz kalibracyjnych. W 2004 roku w ramach współpracy IGiK z Fińskim Instytutem Geodezji w Helsinkach opracowano projekt, a następnie założono dwa absolutne punkty grawimetryczne w Zakopanem i na Kasprowym Wierchu (Kryński i in., 2006). Przedłużono w ten sposób Centralną Grawimetryczną Bazę Kalibracyjną od Ojcowa do Zakopanego oraz utworzono wysokościową grawimetryczną bazę kalibracyjną w Tatrach opartą na punktach absolutnych Zakopane–Kuźnice–Kasprowy Wierch (Cisak i Sas, 2005). Wspólnie z zespołem Katedry Geodezji i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej zespół Instytutu dowiazał grawimetrycznie w 2005 roku zagraniczne punkty absolutne do punktów absolutnych podstawowej osnowy grawimetrycznej (Kryński i in., 2008).

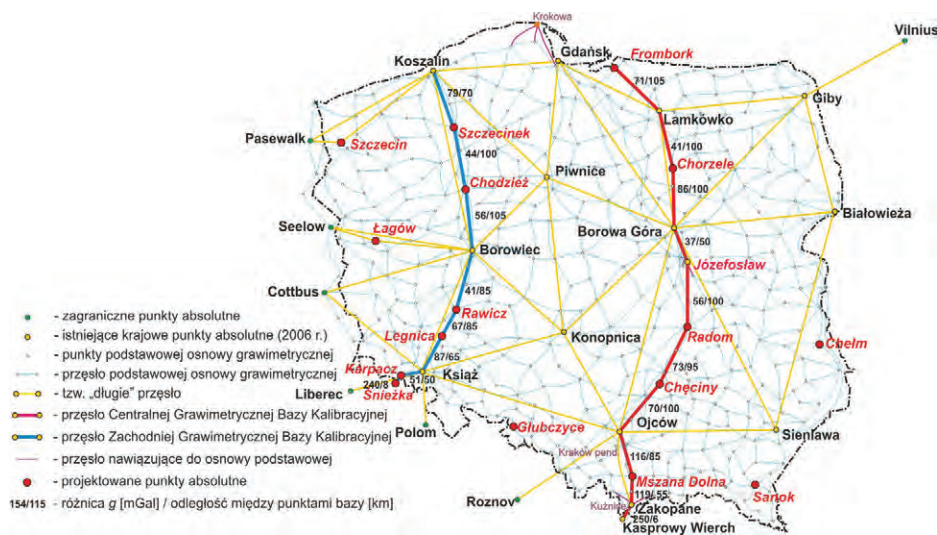


Rys. 10. Różnice wartości przyspieszenia siły ciężkości między systemami IGIK-68-IGSN71 i POGK98 [mGal]



Rys. 11. Różnice między przyspieszeniem siły ciężkości w systemie PIG-IGSN71 oraz w systemach POGK98 i POGK04 [mGal]

W 2006 roku z inicjatywy IGiK przystąpiono do dalszych działań w kierunku modernizacji osnowy grawimetrycznej z wykorzystaniem grawimetru balistycznego FG5, który od 2005 roku znalazł się w posiadaniu Politechniki Warszawskiej, w pierwszej kolejności do dogęszczenia osnowy punktami absolutnymi. Działaniami modernizacyjnymi objęto także grawimetryczne bazy kalibracyjne, traktując je jako integralną część podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju. Obie, Centralną i Zachodnią Grawimetryczną Bazę Kalibracyjną oparto na punktach absolutnych (Kryński i Rogowski, 2009b). Założono drugą wysokościową grawimetryczną bazę kalibracyjną w Sudetach: Janowice Wielkie–Śnieżka (rys. 12) (Kryński i Rogowski, 2009a; Barlik i in., 2010).



Rys. 12. Modernizowana osnowa grawimetryczna Polski (2006 r.)

Od 1999 roku w wyniku założenia nowych punktów osnowy grawimetrycznej oraz wykonania nowych pomiarów grawimetrycznych absolutnych i względnych pojawiła się rosnąca potrzeba ponownego wyrównania zmodernizowanej sieci grawimetrycznej. Dodatkowo w trakcie prac modernizacyjnych stwierdzono zniszczenie około 100 punktów istniejącej osnowy, a także znaczne rozbieżności (do 20 μGal) pomiędzy wynikami pomiarów absolutnych na niektórych stacjach. Jednocześnie, biorąc pod uwagę rozwój technologiczny absolutnych pomiarów grawimetrycznych oraz możliwość wykonywania w terenie pomiarów absolutnych, wskazano na konieczność założenia nowej osnowy grawimetrycznej w Polsce (Kryński, 2009; Kryński i Barlik, 2010).

Punktem przełomowym w pracach grawimetrycznych zespołu IGiK był zakup w 2008 roku polowego grawimetru balistycznego A10-020 (rys. 13) o nominalnej dokładności 10 μGal jako narzędzia do prac związanych z modernizacją podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju. Jednocześnie utworzono mobilne laboratorium grawimetryczne, przystosowując do pomiarów terenowych tym

grawimetrem mikrobus VW transporter (rys. 14). Natychmiast po zainstalowaniu grawimetru A10-020 w Obserwatorium Borowa Góra rozpoczęto badania tego grawimetru w aspekcie oceny jego przydatności do prac geodezyjnych i geodynamicznych (Kryński i Roguski, 2009; Kryński i Sękowski, 2010; Sękowski, 2010; Sękowski i Kryński, 2010).



Rys. 13. Grawimetr balistyczny A10-020 w laboratorium Obserwatorium Borowa Góra



Rys. 14. Mobilne laboratorium grawimetryczne IGiK

W Instytucie przeprowadzono serię badań dotyczących określenia optymalnej strategii precyzyjnego wyznaczania gradientu pionowego przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu grawimetru A10 na punktach terenowych osnowy grawi-

metrycznej (Dykowski, 2012a), a następnie zaprojektowano i wykonano w IGiK składany statyw do takich wyznaczeń (rys. 15). Funkcjonalność przenośnego statywu została sprawdzona na trzech punktach grawimetrycznych mikrosieci w Obserwatorium Borowa Góra. Opracowano również metodę kalibracji grawimetrów względnych z wykorzystaniem grawimetru balistycznego A10 (Dykowski, 2012b).



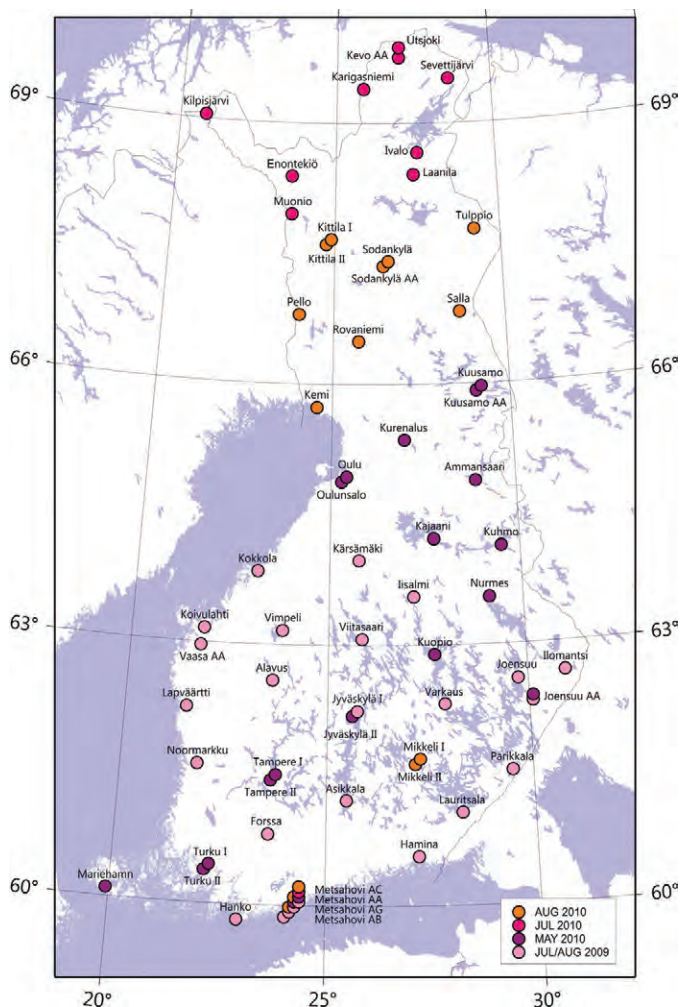
Rys. 15. Statyw do precyzyjnego wyznaczenia gradientu pionowego przyspieszenia siły ciężkości

Doświadczenia zespołu IGiK w precyzyjnych pomiarach przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem A10 spotkały się bardzo szybko z uznaniem międzynarodowym. W latach 2009–2010 zespół IGiK przeprowadził w czterech kampaniach pomiary grawimetrem A10-020 na 60 punktach fińskiej osnowy grawimetrycznej w ramach programu pełnej modernizacji tej osnowy (rys. 16) (Kryński i Rogowski, 2010, 2011; Mäkinen i in., 2010a, 2010c).

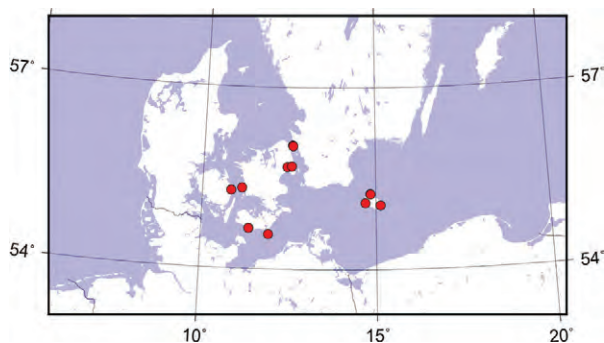
Wyniki pomiarów przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem A10-020 wraz z wynikami pomiarów archiwalnych na punktach fińskiej osnowy grawimetrycznej wykorzystano w badaniach geodynamicznych dotyczących modelu wznoszenia polodowcowego obszaru Fennoskandii (Mäkinen i in., 2010b, 2011, 2013).

W kolejnych latach Instytut uczestniczył w pracach związanych z modernizacją osnów grawimetrycznych krajów skandynawskich oraz wprowadzonych w tych krajach pomiarów grawimetrycznych do celów geodynamicznych (Kryński, 2015). W 2011 roku przy użyciu grawimetru A10-020 dokonano pomiaru przyspieszenia siły ciężkości na 17 punktach osnowy grawimetrycznej Danii (rys. 17) oraz 27 punktach osnowy grawimetrycznej Norwegii (rys. 18) (Kryński i Rogowski, 2012).

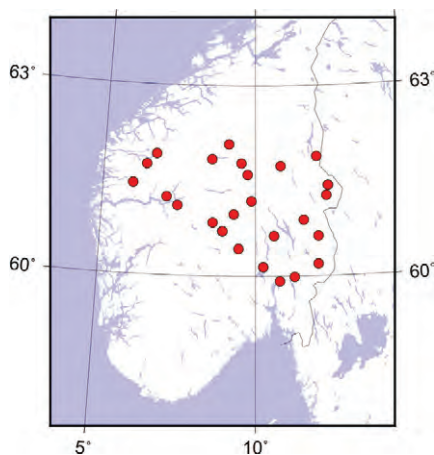
W latach 2011–2013 dokonano pomiaru przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem A10-020 na 88 punktach osnowy grawimetrycznej Szwecji (rys. 19) (Kryński i Rogowski, 2012, 2013, 2014).



Rys. 16. Punkty fińskiej osnowy grawimetrycznej pomierzone grawimetrem A10-020



Rys. 17. Punkty duńskiej osnowy grawimetrycznej pomierzone grawimetrem A10-020

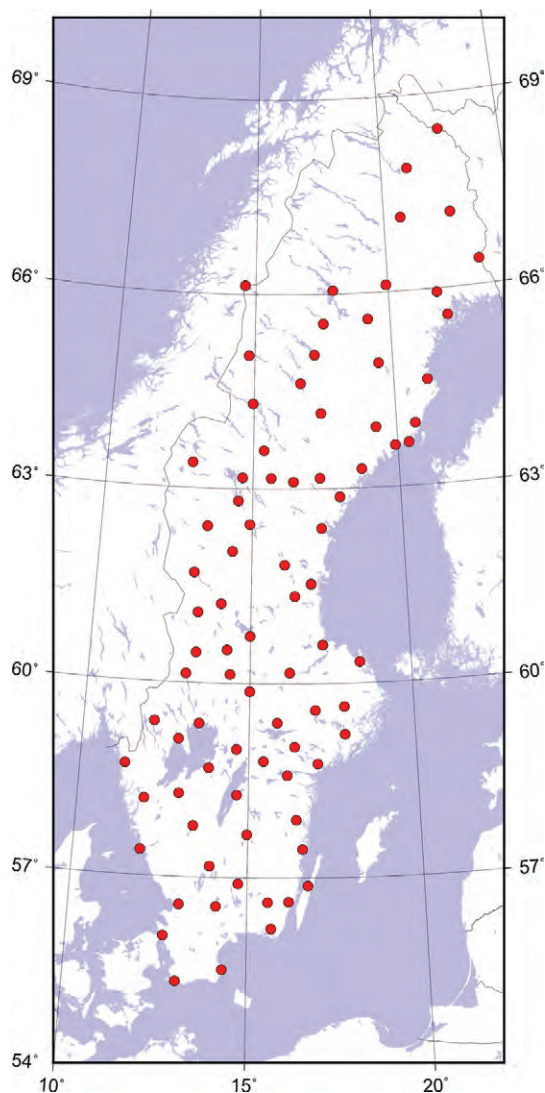


Rys. 18. Punkty norweskiej osnowy grawimetrycznej pomierzone grawimetrem A10-020

Równoległe do prac grawimetrycznych prowadzonych w krajach skandynawskich wykonano w IGiK szereg prac studialnych związanych z zakładaniem współczesnej podstawowej osnowy grawimetrycznej (Kryński, 2012; Kryński i Barlik, 2012a). Koncentrowały się one wokół oceny wyznaczeń przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem A10 w warunkach laboratoryjnych i terenowych (Dykowski i in., 2012b) i badania stabilności parametrów metrologicznych tego grawimetru (Dykowski i in., 2012a; Sękowski i in., 2012).

Prace te wykorzystano przy opracowywaniu projektu technicznego modernizacji i pomiaru podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju. Projekt zawierający koncepcję osnowy, lokalizacje punktów oraz założenia techniczne został opracowany w 2011 roku przez zespół IGiK wspólnie z zespołem Politechniki Warszawskiej dla Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii (Kryński i in., 2012a; Kryński i Barlik, 2012b). Zgodnie z projektem osnowa składa się wyłącznie z punktów, na których dokonano absolutnego wyznaczenia przyspieszenia siły ciężkości: 28 punktów fundamentalnych (1 na 15 000 km² i dodatkowych 7 na grawimetrycznej bazie kalibracyjnej), na których pomiar wykonano grawimetrem FG5 i 169 punktów bazowych (1 na 2000 km²), na których pomiar wykonano grawimetrem A10 (rys. 20) (Kryński i in., 2013).

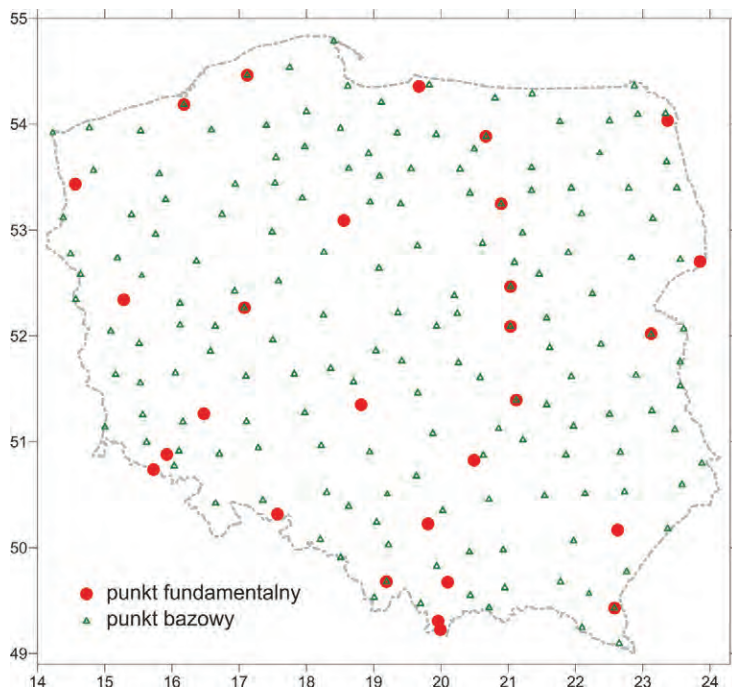
Przewidziano, że wszystkie punkty nowej osnowy grawimetrycznej w Polsce będą miały położenie i wysokość określoną w państwowym układzie odniesienia, natomiast punkty bazowe posiadające precyzyjnie wyznaczone współrzędne przy użyciu odpowiedniej metody statycznej GNSS (poziom klasy B wg EUREF) zostaną włączone do krajowej zintegrowanej osnowy geodezyjnej. Wśród istniejących punktów jako punkty bazowe wskazano w projekcie 87 punktów sieci POGK98, 9 punktów sieci POLREF, 5 punktów sieci EUVN i 63 ekscentry punktów sieci ASG-EUPOS. Poziom niepewności wyznaczenia przyspieszenia siły ciężkości określono jako <0.004 mGal – na punktach fundamentalnych i <0.010 mGal – na punktach bazowych (Kryński i Barlik, 2012b).



Rys. 19. Punkty szwedzkiej osnowy grawimetrycznej pomierzone grawimetrem A10-020

Pomiary przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu grawimetru A10-020 oraz wyznaczenia gradientu pionowego na 169 punktach bazowych podstawowej osnowy grawimetrycznej wykonał zespół Instytutu w latach 2012 i 2013 (Kryński i Dykowski, 2014). W ramach przeliczenia obserwacji w 2014 roku dokonano weryfikacji wprowadzonych do pomiarów poprawek pływowych, uwzględniono wyniki kalibracji grawimetrów względnych, parametry kalibracji metrologicznych grawimetru absolutnego A10-020, wyniki kampanii porównawczych grawimetrów absolutnych oraz wprowadzono poprawki przenoszące otrzymane wartości przyspieszenia siły ciężkości do systemu płynu zerowego. Realizacji

podstawowej bazowej osnowy grawimetrycznej nadano nazwę PBOG14. Spośród punktów PBOG14 78 jest wspólnych z osnową POGK98 (Kryński i Barlik, 2014). Na podstawie punktów wspólnych opracowano mapę różnic między PBOG14 a POGK98 (rys. 21) (Kryński i Rogowski, 2015; Bosy i Kryński, 2015). Dokonano również wstępnej oceny jakości osnowy PBOG14 (Dykowski i Kryński, 2014).

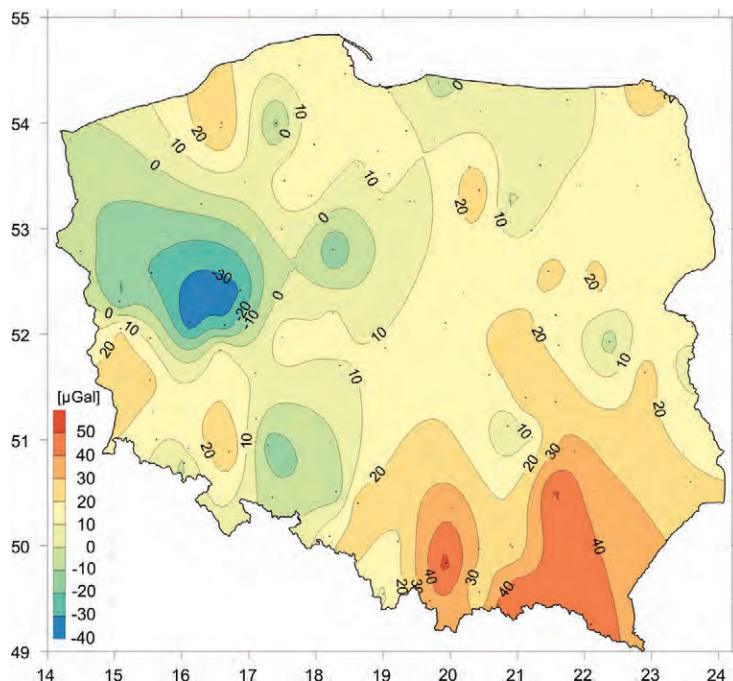


Rys. 20. Rozmieszczenie punktów nowej osnowy grawimetrycznej kraju według projektu z 2011 roku

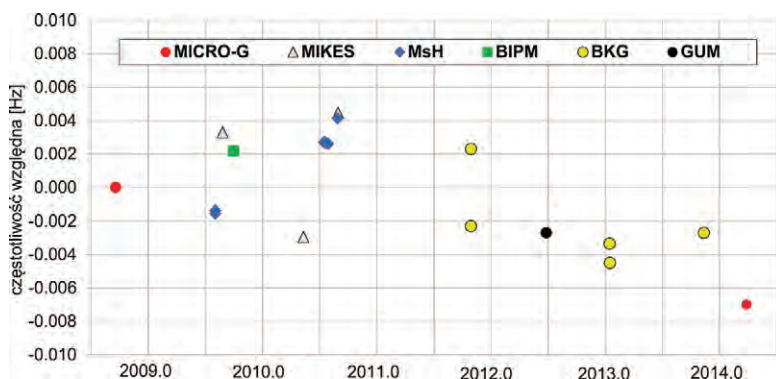
Założona podstawowa grawimetryczna osnowa bazowa należy do najnowocześniejszych na świecie.

Równoległe do prac związanych z zakładaniem nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju kontynuowane są w Instytucie badania powtarzalności wyznaczeń przyspieszenia siły ciężkości grawimetrem A10 (Kryński i in., 2014a) i stabilności parametrów metrologicznych tego grawimetru (Dykowski i in., 2013a, 2013b). Przeprowadzono wnikliwą analizę wpływu na jakość zakładanej osnowy grawimetrycznej zależnych od czasu poprawek do wyznaczeń absolutnych przyspieszenia siły ciężkości (Dykowski i Kryński, 2015). Uczestnictwo w międzynarodowych kampaniach porównawczych grawimetrów absolutnych ICAG2009 (Jiang i in., 2012) w Paryżu, ECAG2011 (Francis i in., 2012, 2013) w Walferdange, ICAG2013 (Francis i in., 2015) w Walferdange oraz bezpośrednie porównania z wynikami uzyskiwanymi przez inne grawimetry w obserwatoriach grawimetrycznych Wettzell, Józefosław i Borowa Góra umożliwiły śledzenie stabilności

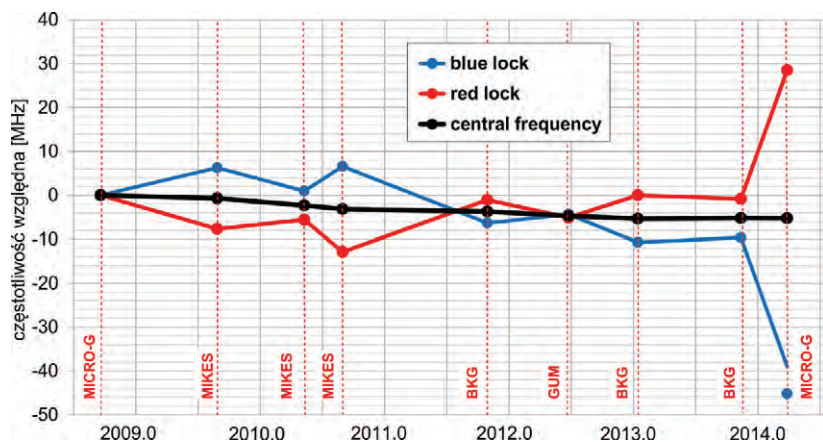
grawimetru A10-020 oraz jego offsetu względem międzynarodowego poziomu grawimetrycznego, który plasuje się na poziomie kilku mikrogali. Wartości kalibracyjne parametrów metrologicznych wzorca częstotliwości (rys. 22) i lasera (rys. 23) grawimetru A10-020 są regularnie wyznaczone w laboratoriach metrologicznych: producenta, tj. Micro-g w USA, MIKES w Helsinkach, Metsahovi w Finlandii, BIPM w Paryżu, BKG we Frankfurcie nad Menem, Uniwersytetu w Luksemburgu, GUM w Warszawie.



Rys. 21. Mapa różnic przyspieszenia siły ciężkości między systemem PBOG14 a POGK98



Rys. 22. Kalibracje wzorca częstotliwości grawimetru absolutnego A10-020



Rys. 23. Kalibracja lasera grawimetru absolutnego A10-020

4. Modelowanie pola grawitacyjnego Ziemi

W połowie XX wieku problematyka modelowania pola grawitacyjnego Ziemi ograniczała się do zagadnień wyznaczania przebiegu geoidy w skali lokalnej. Ograniczone pokrycie kraju danymi grawimetrycznymi (Bokun, 1958), a w dodatku brak jednolitego systemu grawimetrycznego uniemożliwiały wyznaczenie grawimetrycznej geoidy niezbędnej na potrzeby polskiej sieci astronomiczno-geodezyjnej i sieci niwelacji precyzyjnej I klasy. Wstępne prace w tym zakresie wykonane w IGiK koncentrowały się na wykorzystaniu wyznaczonych astronomicznie odchyleń pionu do opracowania metodą niwelacji astronomicznej modelu geoidy astronomiczno-geodezyjnej. Bardzo niewielką liczbę archiwalnych obserwacji odchyleń pionu zwiększano sukcesywnie w latach 1952–1975, osiągając ostatecznie liczbę 166. Jednocześnie analizowano i przystosowywano do wykorzystania do modelowania geoidy istniejący materiał grawimetryczny (Bokun, 1961b) oraz prowadzono badania nad metodyką sporządzania map grawimetrycznych. W szczególności opracowano hipsograficzną metodę sporządzania mapy grawimetrycznej anomalii Faye'a (w obecnej nomenklaturze to anomalie wolno-powietrzne) na terenach górzystych (Chojnicki, 1960). Badano także efekty i konsekwencje przyjęcia stałej gęstości przy opracowaniu map anomalii Bouguera (Jędrzejewska, 1966). Przedmiotem badań były również możliwości pomiarów grawimetrycznych grawimetrem Askania Gs-11 na zamrożonym morzu. Pomiaru takie wykonano w 1963 roku w czasie tzw. zimy stulecia (Chojnicki, 1966a).

Pierwszym istniejącym regionalnym modelem grawimetrycznej geoidy obejmującym obszar Polski był model opracowany przez Tanniego w 1949 roku dla Europy Centralnej przy wykorzystaniu średnich anomalii izostatycznych $5^\circ \times 5^\circ$ i $1^\circ \times 1^\circ$. Dokładność modelu, według jego autora, wynosiła 6–12 m. Podjęte w Instytucie Geodezji i Kartografii prace nad zgromadzeniem danych grawimetrycznych i astronomicznych z obszaru Polski zaowocowały opracowaniem w 1961 roku regionalnego modelu geoidy astronomiczno-grawimetrycznej dla

Polski (Bokun, 1961b). Do jego sporządzenia wykorzystano 134 astronomiczno-geodezyjne odchylenia pionu i anomalie grawimetryczne odczytane z map grawimetrycznych. Dokładność modelu szacuje się na około 60 cm. Dalsze prace badawcze nad doskonaleniem modelu geoidy dotyczyły głównie rozkładu względnych odchyleń pionu w Polsce (Bokun i in., 1968), metodologii opracowania średnich wartości anomalii siły ciężkości (Bokun i in., 1970; Jędrzejewska, 1970). Na miarę możliwości technicznych rozwiązano problem automatyzacji sporządzania katalogów i map grawimetrycznych (Dworakowska, 1973). Począwszy od 1970 roku, staraniem IGIK, wspólnie z Instytutem Fizyki Ziemi Akademii Nauk ZSRR oraz Instytutem Magnetyzmu Ziemskiego i Propagacji Fal w Leningradzie zorganizowano cztery grawimetryczne ekspedycje badawcze na Morzu Bałtyckim, których celem było zbadanie pola siły ciężkości w południowej części Bałtyku oraz opracowanie metodyki prowadzenia zdjęcia powierzchniowego na morzu przy użyciu grawimetrów morskich GAL-M i TGG-1, i określonego systemu nawigacji. Do przeprowadzenia tych badań wykorzystano radziecki statek badawczy Zaria, na którym prowadzono równocześnie pomiary grawimetryczne i magnetyczne. Podczas ostatniej ekspedycji pomiary grawimetryczne przeznaczone do półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego na obszarze położonym na północny wschód od Łeby wykonano aparaturą zainstalowaną na polskim statku szkolnym Jan Turlejski. Wykonano także szereg prac badawczo-metodycznych związanych ze zdjęciem grawimetrycznym w południowej części Morza Bałtyckiego (Chowańska-Otyś, 1977), zaś zgromadzone dane grawimetryczne wykorzystano do opracowania struktury wglębnej budowy geologicznej podłoża badanej części Bałtyku (Chowańska-Otyś i Dąbrowski, 1977).

Model geoidy był dwukrotnie doskonalony w IGIK w latach 1970 (Bokun, 1970) oraz 1978 (Bokun, 1978) poprzez zastosowanie danych grawimetrycznych z bardziej szczegółowych map grawimetrycznych oraz wykorzystanie nowych obserwacji astronomicznych. Dokładność udoskonalonego modelu geoidy na przeważającym obszarze Polski oszacowano na około 30 cm (Kryński, 2007a).

Stosunkowo niska dokładność obliczanych regionalnych modeli geoidy, mimo dysponowania materiałem grawimetrycznym o odpowiedniej jakości z badanego rejonu, wynikała z braku jednolitego pokrycia kuli ziemskiej danymi grawimetrycznymi, a jednocześnie ograniczonego dostępu do istniejących danych grawimetrycznych. Istotną przeszkodą w tworzeniu dokładnych regionalnych modeli geoidy była również bardzo ograniczona znajomość globalnego opisu geopotencjału. Wraz tworzeniem i udostępnianiem kolejnych globalnych modeli geopotencjału, wyznaczanych z rosnącą rozdzielczością i dokładnością przy wykorzystaniu danych satelitarnych oraz naziemnych danych grawimetrycznych, pojawiła się możliwość udoskonalenia regionalnego modelowania grawimetrycznej geoidy i podniesienia dokładności obliczanych modeli. Opracowana metoda *remove-compute-restore* w wyniku usunięcia z obserwowanych anomalii grawimetrycznych efektu globalnego przy użyciu globalnego modelu geopotencjału pozostawia w nich efekty regionalne i lokalne. Obszar, z którego należy wykorzystywać do modelowania geoidy anomalie grawimetryczne

zredukowane o efekty globalne (długofalowa część widma), ulega znacznemu zmniejszeniu, przy jednoczesnym zachowaniu poziomu dokładności wynikowego modelu. Na końcowym etapie modelowania do wysokości geoidy obliczonych ze zredukowanych anomalii grawimetrycznych dodawana jest wysokość geoidy obliczona z globalnego modelu geopotencjału. Skutecznym hamulcem w rozwoju prac badawczych nad modelowaniem regionalnego pola siły ciężkości, a w szczególności doskonalenia regionalnych modeli quasigeoidy, nie tylko w Polsce, ale we wszystkich krajach tzw. bloku wschodniego była klauzula tajności, jaką w latach po II wojnie światowej zostały obłożone wszelkie dane grawimetryczne.

W latach 1980. zespół Przedsiębiorstwa Badań Geofizycznych (PBG) na zlecenie IGiK sukcesywnie opracowywał dla obszaru Polski zbiór średnich anomalii wolnopowietrznych w siatce $1' \times 1'$, z wykorzystaniem punktowych danych grawimetrycznych (przyspieszenia siły ciężkości oraz wysokości punktów grawimetrycznych pomierzone przy użyciu niwelacji technicznej) z półszczegółowych zdjęć grawimetrycznych Polski. Anomalie te były w miarę ich udostępniania wykorzystywane do opracowania anomalii grawimetrycznych Faye'a i Bouguera na potrzeby wojskowych map w skali 1:200 000 (Kryński, 2007a).

Do dalszego postępu w modelowaniu regionalnej geoidy na obszarze Polski przyczyniło się zdjęcie po 1989 roku klauzuli tajności z danych geodezyjnych i grawimetrycznych w Polsce, a następnie, od początku lat 1990., sukcesywne udostępnianie krajowych danych grawimetrycznych. Istotną rolę w ożywieniu działalności w zakresie modelowania geoidy odegrał również szeroki dostęp do zaawansowanych technik obliczeniowych.

Opracowany przez PBG zbiór średnich anomalii wolnopowietrznych w siatce $1' \times 1'$ dla obszaru Polski, zwolniony z klauzuli tajności, za zgodą Ministerstwa Obrony Narodowej został udostępniony w roku 1992 przez IGiK wydziałowi GETECH (Geophysical Exploration Technology) Uniwersytetu w Leeds, w Wielkiej Brytanii – koordynatorowi projektu międzynarodowego West-East Europe Gravity Project (WEEGP), w którego realizacji IGiK miał status członka stowarzyszonego. W ramach tego projektu zgromadzono dane grawimetryczne oraz numeryczne modele terenu, a także dane altimetryczne z obszaru całej Europy od Islandii po Ural ($30^\circ\text{N} \leq \varphi \leq 85^\circ\text{N}$; $-25^\circ\text{W} \leq \lambda \leq 60^\circ\text{E}$), a następnie wygenerowano anomalie wolnopowietrzne i anomalie Bouguera w siatce $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$. W drugiej połowie lat 1990., wykorzystując zgromadzone w ramach projektu WEEGP dane wysokościowe, opracowano w GETECH numeryczny model terenu dla Europy w siatce $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, w odwzorowaniu stożkowym Lamberta. Model ten został udostępniony Instytutowi Geodezji i Kartografii w Warszawie.

W roku 1993 zbiór średnich anomalii wolnopowietrznych w siatce $1' \times 1'$ dla obszaru Polski został wykorzystany do obliczenia modelu grawimetrycznej geoidy dla obszaru Polski – quasi93 (Sas-Uhrynowski i Łyszkowicz, 1973), a następnie udostępniony przez IGiK Instytutowi Geodezji (IfE) Uniwersytetu Technicznego w Hanowerze w celu wykorzystania go do poprawienia modelu geoidy dla Europy w realizowanym pod patronatem Międzynarodowej Asocjacji Geodezji projekcie European Geoid Project. W rezultacie działań w ramach projektu opra-

cowany został w Hanowerze model quasigeoidy europejskiej EGG97, wygenerowany w siatce $1.0' \times 1.5'$ dla obszaru $25^\circ\text{N} \leq \varphi \leq 77^\circ\text{N}$; $35^\circ\text{W} \leq \lambda \leq 67.4^\circ\text{E}$. Model ten jest udostępniony do dystrybucji Biuru Sekretarza Generalnego Międzynarodowej Asocjacji Geodezji.

Tematyka badawcza dotycząca modelowania pola grawitacyjnego Ziemi odrodziła się w IGiK po niemal 10-letniej przerwie. Zarys jej rozwoju został naszkicowany z okazji jubileuszu 55-lecia Instytutu (Kryński i Sas-Uhrynowski, 2000). Dostęp do punktowych grawimetrycznych danych obserwacyjnych z grawimetrycznej bazy danych Państwowego Instytutu Geologicznego (PIG), numerycznych modeli terenu o wysokiej rozdzielczości oraz pokrycie Polski w latach 1990. gęstą siecią satelitarno-niwelacyjną punktów o precyzyjnie wyznaczonych wysokościach elipsoidalnych i normalnych (sieci POLREF, EUVN, WSSG), a także przeprowadzenie czwartej kampanii niwelacyjnej (pomiar krajowej osnowy wysokościowej I klasy w latach 1999–2002) były czynnikami mobilizującymi do podjęcia kompleksowych badań nad utworzeniem modelu centymetrowej geoidy na obszarze Polski. Kompleksowe badania nad modelowaniem centymetrowej geoidy zostały zainicjowane przez IGiK (Kryński, 2001). Prace badawcze nad precyzyjnym wyznaczeniem modelu geoidy z wykorzystaniem danych geodezyjnych, grawimetrycznych, astronomicznych, geologicznych i satelitarnych zostały wykonane w latach 2002–2005 przez zespół specjalistów reprezentujących różne dyscypliny nauk o Ziemi, koordynowany przez Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie, w ramach projektu badawczego zamówionego przez Komitet Badań Naukowych. W realizacji zadań projektu obok zespołu Zakładu Geodezji i Geodynamiki IGiK uczestniczyły grupy badawcze z Państwowego Instytutu Geologicznego w Warszawie, Politechniki Warszawskiej i Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie oraz pojedynczy specjaliści z Politechniki Wrocławskiej, Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, Politechniki Słowackiej w Bratysławie, a także Narodowego Duńskiego Centrum Badań Kosmicznych w Kopenhadze (Kryński, 2007b).

Badania prowadzone w IGiK w ramach wspomnianego projektu przebiegały bardzo szerokim frontem (Kryński i in., 2004) i są kontynuowane. Niezwykle istotne było zgromadzenie, ujednolicenie oraz sprowadzenie do obowiązujących systemów wszystkich danych grawimetrycznych (Kryński i in., 2005). Szczególnym problemem w tym zakresie wymagającym rozwiązania było opracowanie metody transformacji współrzędnych punktów z układu Borowa Góra do układu 1942 (Cisak i Sas, 2004a), a następnie ocena dokładności przeliczeń współrzędnych punktów zawartych w bazie danych grawimetrycznych z układu Borowa Góra na układ 1942 (Cisak i Sas, 2004b).

Przeprowadzono również bardzo wnikliwe badania związane z wyznaczaniem poprawek terenowych do obserwacji grawimetrycznych na obszarze Polski. W pierwszej kolejności dokonano oceny jakości danych wysokościowych i numerycznych modeli terenu w aspekcie ich wykorzystania do modelowania centymetrowej geoidy (Kryński i in., 2005; Kloch i Kryński, 2008a; Szlachowska i Kryński, 2009) oraz zbadano wpływ topografii na poprawki terenowe

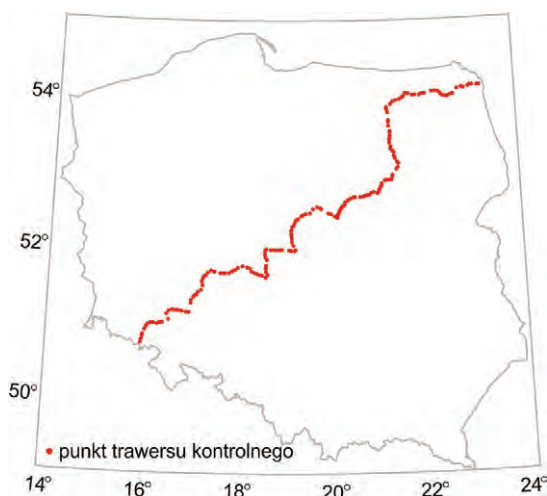
(Grzyb i in., 2006). Ocenie jakości poddano poprawki terenowe „1992” opracowane dla części obserwacji znajdujących się w grawimetrycznej bazie danych oraz dokonano analizy ich przydatności do obliczenia poprawek terenowych na obszarze Polski spełniających wymagania centymetrowej geoidy (Kloch i Kryński, 2007). Opracowano optymalną metodę wyznaczania poprawek terenowych w oparciu o zasadę równoległościannów (Kloch i Kryński, 2008b; Kryński i Rogowski, 2008) oraz przeprowadzono badania nad wykorzystaniem modelu sferycznego do wyznaczania poprawek terenowych (Kloch i Kryński, 2010). Podsumowaniem przeprowadzonych badań były dwie rozprawy doktorskie pracowników IGiK – Grażyny Kloch i Małgorzaty Szelachowskiej.

Metoda *remove-compute-restore* wymaga dokładnego rozdzielenia składowych widmowych sygnałów funkcjonalów potencjału zakłócającego. W tym celu przeprowadzono badania nad implementacją długo-, średnio- i krótkofalowych składowych tych sygnałów w procesie modelowania geoidy (Kloch i Kryński, 2008c). Istotną rolę w precyzyjnym modelowaniu geoidy odgrywa dobór globalnych modeli geopotencjału (Kryński i Łyszkowicz, 2005a), które są wykorzystywane do modelowania efektów długofalowych w obserwowanych anomaliach grawimetrycznych oraz w anomaliach wysokości lub wysokościach geoidy. Badano wpływ najnowszych modeli geopotencjału na jakość modelu geoidy (Kryński i Łyszkowicz, 2005c; Kryński i in., 2006). Dokonano oceny wysoko-rozdzielczego globalnego modelu geopotencjału EGM2008, wykorzystując dane grawimetryczne i satelitarno-niwelacyjne z obszaru Polski (Kloch i Kryński, 2009). Wykazano, że dokładność geoidy obliczonej z tego modelu na obszarze Polski kształtuje się na poziomie 3 cm.

Unikalnym przedsięwzięciem podjętym przez zespół IGiK w ramach realizacji projektu było założenie w latach 2003–2004 trawersu kontrolnego o łącznej długości 868 km, przebiegającego wzdłuż istniejących linii niwelacji I i II klasy precyzyjnej osnowy wysokościowej kraju z południowego zachodu Polski do północno-wschodnich granic kraju (Kryński i in., 2008). Trawers złożony jest z 184 stacji o dokładnie wyznaczonych wysokościach, na których wykonano precyzyjne obserwacje GPS (rys. 24) (Kryński, 2007a, 2007b). Anomalie wysokości gęstego zbioru stacji trawersu kontrolnego zostały wykorzystane do oceny jakości wygenerowanych w ramach projektu modeli quasigeoidy: grawimetrycznej, astronomiczno-grawimetrycznej, satelitarno-niwelacyjnej, zintegrowanej oraz quasigeoidy dopasowanej do wysokości punktów sieci POLREF. Trawers ten do dziś stanowi najdokładniejszy zbiór punktów kontrolnych do oceny jakości modeli geoidy na obszarze Polski.

W ramach projektu badawczego wykonano w IGiK szereg prac przygotowawczych do precyzyjnego modelowania geoidy na obszarze Polski. Wyniki pośrednie tych prac prezentowano na licznych konferencjach krajowych i międzynarodowych oraz w publikacjach (Kryński i Łyszkowicz, 2004; Kryński, 2005; Kryński i Łyszkowicz, 2005b). Podsumowujące wyniki zawierające ocenę jakości opracowanych grawimetrycznych modeli geoidy dla obszaru Polski przedstawiono w kilku publikacjach (Kryński i Łyszkowicz, 2006a, 2006b, 2007a;

Kryński, 2007b). Szczególną uwagę poświęcono zagadnieniu wpasowania modelu grawimetrycznej geoidy w anomalie wysokości na punktach sieci satelitarno-niwelacyjnych (Kryński i Łyszkowicz, 2007b). Dokładność najlepszego modelu grawimetrycznej quasigeoidy oceniono na poziomie 2 cm. Jednocześnie wykazano, że dokładność anomalii wysokości na punktach sieci POLREF i EUVN jest znacznie niższa od dotychczas szacowanej.



Rys. 24. Satelitarno-niwelacyjny trawers kontrolny

Kolejne modele geoidy opracowano przy użyciu metody kolokacji z jednoczesnym wykorzystaniem danych grawimetrycznych i odchyleń pionu (Kryński i Łyszkowicz, 2008; Łyszkowicz i Kryński, 2008; Kryński i Rogowski, 2008, 2009a). Model quasigeoidy grawimetrycznej GDQ08 (Kryński i Kloch, 2009) opracowany w 2008 roku przez kilka lat był najdokładniejszym modelem dla obszaru Polski.

Nowe możliwości w modelowaniu geoidy powstały wraz z udostępnianiem wyników satelitarnej misji GOCE. Dzięki sukcesywnie powiększającemu się zbiorowi danych gradiometrycznych następowała znacząca poprawa w składowej długofalowej globalnych modeli geopotencjału. Seria badań przeprowadzonych w IGIK dotyczyła oceny tych modeli, korzystając z danych satelitarno-niwelacyjnych z obszaru Polski, łącznie z danymi z trawersu kontrolnego oraz z modelu EGM2008 (Godah i Kryński, 2011), a następnie z uwzględnieniem danych grawimetrycznych (Godah i Kryński, 2013a). W badaniach tych zapewniono pełną spójność widmową porównywanych wielkości. Podobnego porównania globalnych modeli geopotencjału uzyskanych z misji GOCE z danymi naziemnymi dokonano dla obszaru Sudanu (Godah i Kryński, 2013b). Po stwierdzeniu istotnych rozbieżności pomiędzy modelami geopotencjału i danymi grawimetrycznymi oraz satelitarno-niwelacyjnymi na obszarze Sudanu dokonano oceny dokładności modeli z misji GOCE, korzystając z istnienia na obszarze Polski

naziemnych danych o wysokiej rozdzielczości i sprawdzonej wysokiej dokładności (Godah i in., 2014; Godah i Kryński, 2015; Godah i in., 2015). Badania wykazały przydatność modeli geopotencjału z misji GOCE do modelowania geoidy, w szczególności na obszarach o słabym pokryciu danymi naziemnymi. Następnie opracowano nowy model geoidy dla Sudanu, który umożliwił dokonanie wiarygodnej oceny danych grawimetrycznych z tego obszaru i jednocześnie wskazanie niespójności systemu odniesienia wysokościowego w tym kraju (Godah i Kryński, 2014). Podsumowaniem badań była rozprawa doktorska Walyeldeena Godah.

Poprawki terenowe obliczone w IGiK według opracowanej strategii, w oparciu o całkowanie topografii terenu w promieniu 200 km, cechowały się spójnością w sensie widmowym z globalnymi modelami geopotencjału o znacznie mniejszej rozdzielczości niż model EGM2008. Obliczono zatem nowy zbiór poprawek ograniczając promień całkowania do 10 km a następnie wygenerowano nowy zbiór anomalii Faye'a dla obszaru Polski z uwzględnieniem nowych danych grawimetrycznych z południa Polski. Dane te posłużyły do obliczenia modelu quasigeoidy grawimetrycznej GDQM-PL13, który jako najlepszy (dokładność 1.5 cm) zastąpił model GDQ08 (Szelachowska i Kryński, 2014). Dokonano również krytycznego przeglądu istniejących modeli geoidy/quasigeoidy na terenie Polski (Kryński, 2014).

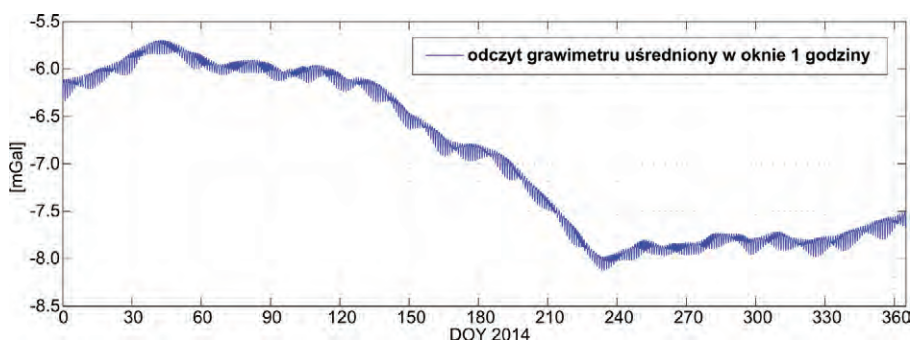
5. Badanie zmian pola grawitacyjnego Ziemi

Ciągła rejestracja przyspieszenia siły ciężkości stanowi źródło informacji o zmianach pola grawitacyjnego Ziemi. Rejestrowane grawimetrem zmiany przyspieszenia siły ciężkości są sumą efektu pływowego o złożonej strukturze okresowej oraz niepływowych zmian pola grawitacyjnego.

Pierwsze pomiary pływów skorupy ziemskiej w Borowej Górze wykonano w latach 1995–1997 przy użyciu grawimetru pływowego Askania Gs11 udostępnionego przez Centrum Badań Kosmicznych PAN. Stacji pływowej w Borowej Górze nadano numer 0908 i włączono ją do międzynarodowej sieci punktów zrzeszonych w centrum Pływów Ziemskich (IAG Center of Earth Tides). Kilkumiesięczne ciągi obserwacji pływowych na stanowisku grawimetrycznym w Borowej Górze zgromadzono następnie w latach 2000–2002, wykorzystując w przerwach pomiędzy grawimetrycznymi pracami polowymi grawimetr LaCoste&Romberg (LCR) G z odpowiednim rejestratorem. Na podstawie analizy krótkich szeregów obserwacyjnych badano regularne zmiany przyspieszenia siły ciężkości (Kryński i Zanimonskiy, 2000; Zanimonskiy i in., 2000). Dane te wykorzystano do badania korelacji pomiędzy zmianami przyspieszenia siły ciężkości, obserwowanymi z rozwiązań GPS zmianami współrzędnych stacji oraz zmianami parametrów meteorologicznych (Kryński i Zanimonskiy, 2001; Sidorenko i in., 2004). W szczególności koncentrowano się na efektach okresowych o okresach dobowym i półdobowym (Zanimonskiy i Kryński, 2001; Kryński i Zanimonskiy, 2002). Podsumowaniem przeprowadzonych badań była rozprawa doktorska

Y. Zanimonskiy’ego oraz obszerna monografia poświęcona analizie zmienności w ciągach rozwiązań GPS i ciągach obserwacji grawimetrycznych (Kryński i Zanimonskiy, 2003).

W 2009 roku, wraz z przeglądem technicznym posiadanych przez Instytut grawimetrów LCR G trzy z tych grawimetrów zaopatrzone w nowoczesne feedbacki, znakomicie przystosowując je w ten sposób do rejestracji pływów skorupy ziemskiej. Rejestrację pływów prowadzono pierwotnie przy użyciu grawimetru G-1036 z transmisją danych poprzez *bluetooth* na ręczny rejestrator PDA z częstotliwością zapisu 1 minuty. Od 2012 roku rejestracja wskazań grawimetru G-1036 prowadzona jest w sposób automatyczny za pomocą komputera wyposażonego w moduł *bluetooth*. Użycie komputera pozwala na rejestrowanie danych z pełną częstotliwością, z jaką dostarcza je grawimetr, tj. około 2 Hz. Rejestracja danych kontrolowana jest na bieżąco za pośrednictwem internetu. Od początku 2014 roku pływy grawimetryczne są rejestrowane nie tylko przy użyciu grawimetru G-1036 (rys. 25), ale również za pomocą dwóch innych grawimetrów (G-1012 i G-1084) będących własnością Instytutu. Ich wykorzystanie do rejestracji pływów ma charakter uzupełniający i służy testom pomiarowym i działaniom związanym z doskonaleniem odbioru danych.

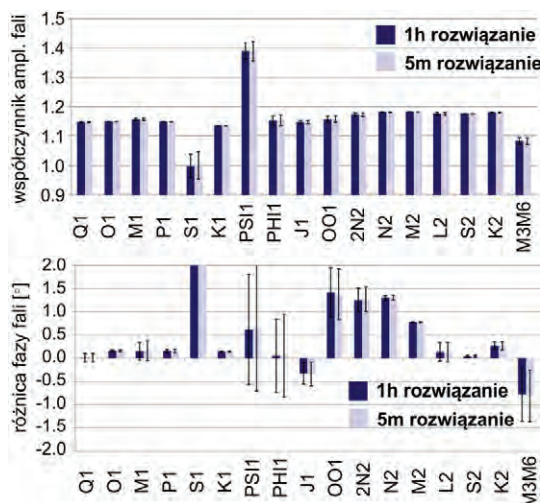


Rys. 25. Rejestracja pływowa grawimetrem LCR G-1036 w 2014 roku

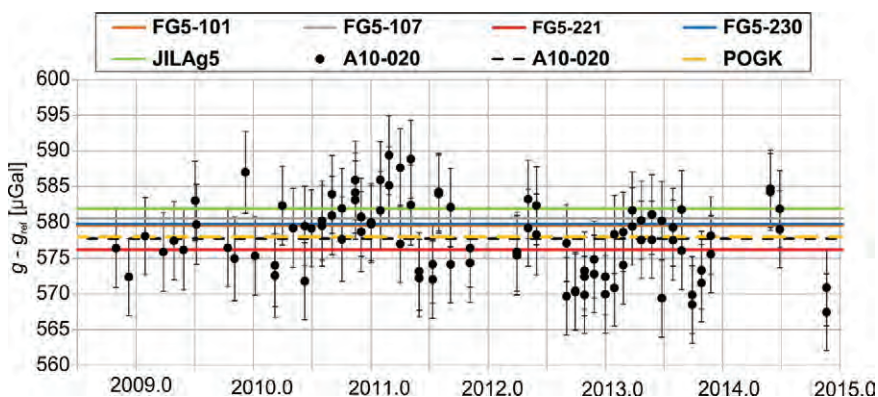
Dane zarejestrowane grawimetrem LCR G-1036 w latach 2012–2014 posłużyły do opracowania lokalnego modelu pływowego (Dykowski i Sękowski, 2014). Wyznaczone współczynniki fal pływowych przedstawiono na rysunku 26.

Począwszy od 2008 roku, regularnie wykonywane są absolutne wyznaczenia przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu grawimetru A10-020 na trzech punktach grawimetrycznej sieci testowej w Obserwatorium Borowa Góra. Są to dwa punkty laboratoryjne A-BG i BG-G2 zlokalizowane w pomieszczeniach piwnicznych Obserwatorium oraz punkt terenowy osnowy grawimetrycznej POGK98 o numerze 156. Wyniki pomiarów od 2008 roku na punkcie A-BG opracowane z uwzględnieniem zarówno aktualnego wyznaczenia gradientu pionowego przyspieszenia siły ciężkości, jak i kalibracji parametrów metrologicznych przedstawiono odpowiednio na rysunku 27, w zestawieniu z wartościami katalogowymi POGK98 (pomarańczowa przerywana linia) oraz wynikami uzyskanymi przy

użyciu grawimetrów typu FG5 i JILAg5 lub z przeniesienia tych wyników pomiarem względnym (LCR) (Kryński i Rogowski, 2015). Słupki błędów pomiarów A10-020 reprezentują eksperymentalny budżet niepewności pomiaru (Dykowski i Kryński, 2014).



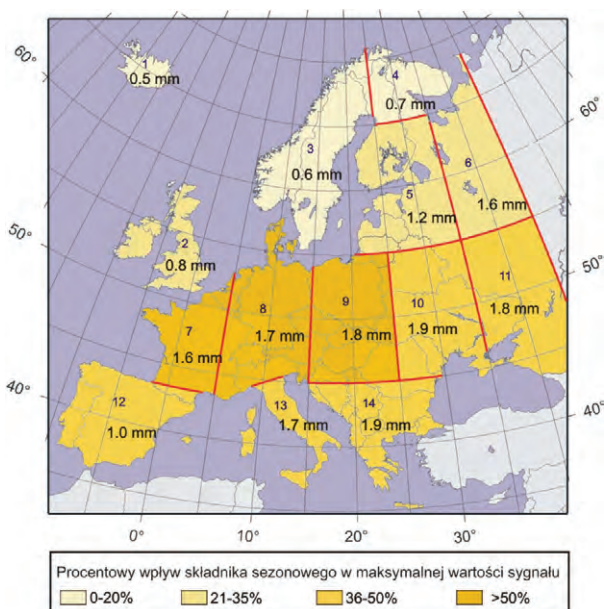
Rys. 26. Wyznaczone współczynniki fal pływowych lokalnego modelu pływowego



Rys. 27. Wyniki pomiarów absolutnych na punkcie A-BG w odniesieniu do wyników uzyskanych przy użyciu laboratoryjnych grawimetrów balistycznych FG5 i JILAg5 oraz wyniku uzyskanego z wyrównania POGK98 ($g_{ref} = 981250000 \mu\text{Gal}$)

Prowadzone w Obserwatorium Borowa Góra badania zmian pola grawitacyjnego Ziemi wspierane są danymi z rejestracji zmian temperatury i wilgotności gleby oraz poziomu wód gruntowych w Obserwatorium, zmian poziomu opadów atmosferycznych oraz podstawowych parametrów meteorologicznych. Rejestracja tych danych jest na bieżąco kontrolowana za pośrednictwem internetu.

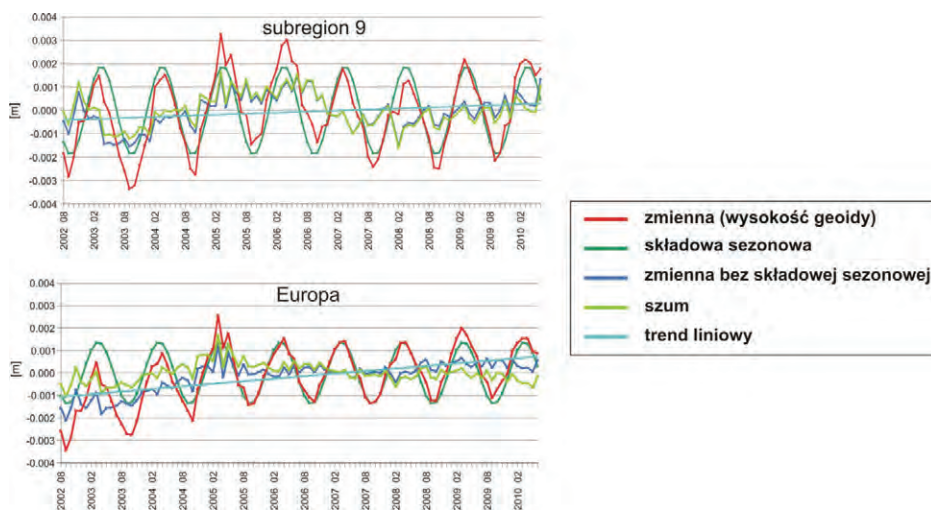
W 2008 roku zapoczątkowano w IGiK prace nad wykorzystaniem danych z misji satelitarnych poświęconych modelowaniu pola grawitacyjnego Ziemi. Wyniki uzyskane z analizy szeregów czasowych globalnych modeli geopotencjału opracowanych przy użyciu danych z misji GRACE można przedstawić z niespotykaną dotychczas rozdzielczością czasową w postaci zmian wysokości geoidy lub zmian rozmieszczenia mas. Badanie zmian pola siły ciężkości Ziemi na obszarze Europy wykonano wykorzystując miesięczne rozwiązania Release04 modeli geopotencjału oraz modelu hydrologicznego GLDAS (Kryński i in., 2014b). Zmiany stanu hydrologii oraz zmiany wysokości geoidy na obszarze całej Europy (zmiany o charakterze regionalnym) i w 14 podobszarach kontynentu (zmiany o charakterze lokalnym) w okresie od sierpnia 2002 roku do czerwca 2010 roku zostały wyznaczone z rozdzielczością przestrzenną $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Wyniki uzyskane dla obszaru całej Europy wskazują na występowanie zarówno składnika sezonowego, jak i stosunkowo silnego trendu liniowego. Natomiast analiza przeprowadzona na skalę lokalną pozwala podzielić obszar Europy na rejony, w których dominującym czynnikiem jest trend liniowy oraz na regiony, w których dominującym czynnikiem jest składnik sezonowy (rys. 28).



Rys. 28. Sezonowe pulsacje odstępu geoidy od elipsoidy w badanych podobszarach Europy

Wyniki czasowych zmian w rozkładzie mas uzyskane przy wykorzystaniu danych z misji GRACE pozwalają na otrzymanie wyników porównywalnych z wynikami uzyskanymi w oparciu o modele hydrologiczne GLDAS. Mogą one stanowić cenne źródło informacji w badaniach i modelowaniu zmian w gospodarce wodnej Ziemi.

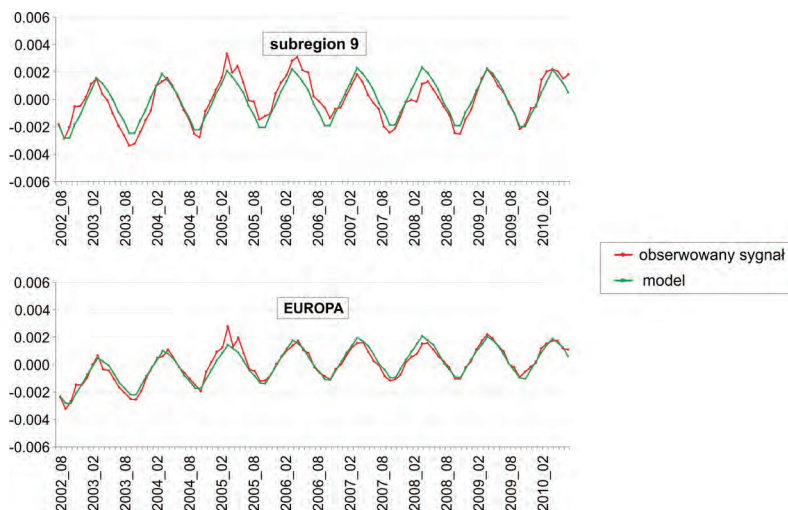
Zmiany wysokości geoidy dla całej Europy i w podobzszarze 9 obejmującym Polskę z podziałem sygnału na składowe przedstawia rysunek 29 (Kloch-Główka i in., 2012).



Rys. 29. Zmiany wysokości geoidy ze wskazaniem składowej sezonowej, trendu i szumu

Przeprowadzone analizy dotyczące możliwości utworzenia modelu czasowych zmian odstępów geoidy od elipsoidy pozwalają na sformułowanie wniosku, że za optymalny model do opisywania czasowych zmian wysokości geoidy należy uznać model złożony ze składnika sezonowego o okresie 12-miesięcznym i trendu opisywanego wielomianem drugiego stopnia (rys. 30). Wykazano również, że na podstawie danych z misji GRACE można przynajmniej na kilka miesięcy naprzód prognozować zmiany wysokości geoidy. Dokonana ocena jakości uzyskanych modeli odstępów geoidy od elipsoidy wskazuje na wielkie możliwości, jakie niesie ze sobą wykorzystanie danych z misji GRACE do utworzenia kinematycznych systemów wysokościowych. System taki dla obszaru Europy powinien być oparty na określonych na daną epokę kinematycznych modelach geoidy w skali regionalnej lub nawet lokalnej krajowej (Kryński i in., 2012b).

Obecnie, gdy prace nad utworzeniem subcentymetrowego modelu geoidy są przedmiotem rozległych badań zarówno na skalę globalną, jak i regionalną, możliwość modelowania czasowych zmian odstępów geoidy od elipsoidy przy wykorzystaniu danych z misji GRACE z milimetrową dokładnością stwarza realne szanse na zastąpienie w przyszłości klasycznego systemu wysokościowego odniesionego do średniego poziomu morza systemem wysokościowym opartym na kinematycznym modelu geoidy.



Rys. 30. Obserwowany sygnał i model zmian wysokości geoidy

6. Badawczo-wzorujące laboratorium grawimetryczne

Doświadczenia IGiK w zakresie grawimetrii geodezyjnej oraz planowane zamierzenia rozwoju badań grawimetrycznych w połączeniu z faktem zakupu przez Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej laboratoryjnego grawimetru balistycznego FG5-230 zaowocowały koncepcją utworzenia wspólnego laboratorium grawimetrycznego w Obserwatorium Borowa Góra i Obserwatorium w Józefosławiu, przeznaczonego do przeprowadzania regionalnych kampanii porównawczych grawimetrów absolutnych. Projekt takiego laboratorium został przedstawiony Grupie Roboczej ds. Grawimetrii przy Międzynarodowym Biurze Wag i Miar w Paryżu (Kryński, 2006) i przyjęty przez tę grupę.

Z uwagi na konieczność kontroli działania grawimetru balistycznego A10-020 oraz parametrów metrologicznych tego grawimetru, a następnie utrzymania w stanie operacyjnym grawimetrów LCR rejestrujących w sposób ciągły przyspieszenie siły ciężkości zaistniała nagła potrzeba utworzenia laboratorium grawimetrycznego w Obserwatorium Borowa Góra. Jednocześnie z inicjatywy IGiK rozpoczęto wspólnie z Wydziałem Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej starania w Głównym Urzędzie Miar w kierunku utworzenia państwowego wzorca przyspieszenia siły ciężkości. Wzorec dwustanowiskowy składałby się z grawimetru laboratoryjnego FG5-230 umieszczonego w Obserwatorium w Józefosławiu i grawimetru A10-020 – w Obserwatorium Borowa Góra.

W 2013 roku powołano badawczo-wzorujące laboratorium grawimetryczne zlokalizowane w Obserwatorium Borowa Góra. Obok działalności badawczej w zakresie grawimetrii geodezyjnej i metrologii grawimetrycznej do zadań laboratorium należy opracowywanie i archiwizowanie pływowych i absolutnych obserwacji grawimetrycznych oraz przygotowywanie i przekazywanie znajdujących się w zasobie IGiK danych z absolutnych pomiarów grawimetrycznych na terenie

Polski do Bundesamt für Kartographie und Geodäsie we Frankfurcie nad Menem, który wspólnie z Międzynarodowym Biurem Grawimetrycznym Międzynarodowej Asocjacji Geodezji prowadzi światową bazę danych absolutnych pomiarów grawimetrycznych. Wkład do wspomnianej bazy danych umożliwia Instytutowi pełne korzystanie z zasobów tej bazy do celów badawczych.

Bibliografia

- Barlik M., Kryński J., Olszak T., Sas A., Pachuta A., Cisak M., Próchniewicz D., Walo J., Szpunar R., (2010): *Modernization of Absolute Gravity Zero Order Network in Poland*, IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010), 22–25 June 2010, Saint Petersburg, Russia, pp. 112–115.
- Bokun J., (1957): *Baza grawimetryczna Gdańsk – Kasprowy Wierch*, Prace IGiK, T. V, z. 2(11), pp. 119–132.
- Bokun J., (1958): *Przygotowanie i opracowanie materiałów grawimetrycznych dla potrzeb polskiej sieci astronomiczno-geodezyjnej i sieci niwelacji precyzyjnej I klasy*, Prace IGiK, T. VI, z. 1(13), pp. 3–76.
- Bokun J., (1961a): *Analiza i wnioski wynikające z wykorzystania materiałów grawimetrycznych przy opracowaniu geodezyjnych pomiarów podstawowych w Polsce*, Prace IGiK, T. VIII, z. 1(17), pp. 24–101.
- Bokun J., (1961b): *Zagadnienie wyznaczenia odstępów geoidy w Polsce od elipsoidy Krasowskiego biorąc pod uwagę posiadane materiały astronomiczno-geodezyjne i grawimetryczne*, Prace IGiK, T. VIII, z. 1(17), pp. 113–140.
- Bokun J., (1961c): *Cechowanie sieci grawimetrycznej w skali krajowej w Polsce*, Prace IGiK, T. VIII, z. 2(18), pp. 28–49.
- Bokun J., (1970): *Mapa geoidy w Polsce, odstępów geoidy od elipsoidy Krasowskiego, skala 1:1 000 000*, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Bokun J., (1973): *Podstawowa sieć grawimetryczna Polski w „Systemie 1971”*, sprawozdanie naukowo-badawcze, Instytut Geodezji i Kartografii.
- Bokun J., (1977): *Zastosowanie opracowań grawimetrycznych w produkcji geodezyjnej*, Biul. Inf. BOINTE, Nr 6, pp. 44–49.
- Bokun J., (1978): *Mapa geoidy w Polsce, odstępów geoidy od elipsoidy Krasowskiego, skala 1:1 000 000*, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Bokun J., Bujnowski W., (1959): *Nouveau réseau gravimétrique fondamental de la Pologne (Communiqué présenté à la Commission Gravimétrique Internationale – Paris 1959)*, Varsovie 1959.
- Bokun J., Chojnicki T., (1961): *Zagadnienie cechowania grawimetrów w Polsce*, Prace IGiK, T. VIII, z. 2(18), pp. 3–27.
- Bokun J., Niewiarowski J., (1959): *Projekt podstawowej sieci wahadłowej w Polsce*, Prace IGiK 1959, T. VI, z. 2(14), pp. 255–261.
- Bokun J., Chowańska-Otyś D., Jędrzejewska M., Majewska M., (1968): *Zagadnienie rozkładu względnych odchyłeń pionu w Polsce*, Prace IGiK, T. XV, z. 2(35), pp. 3–22.

- Bokun J., Chowańska-Otyś D., Jędrzejewska M., Majewska M., (1970): *Nowa metoda opracowania średnich wartości anomalii siły ciężkości na dużym obszarze i jej praktyczne zastosowanie*, Prace IGiK, T. XVII, z. 1(40), pp. 23–38.
- Bokun J., Jędrzejewska M., Majewska M., (1976): *Nowe tendencje i osiągnięcia w grawimetrii geodezyjnej na świecie oraz aktualne prace IGiK w tym zakresie*, Prz. Geod. - Biul. IGiK 1976 nr 11, pp. 465–466.
- Bokun J., Sas A., 1984, *Monografia podstawowej osnowy grawimetrycznej w Polsce*, wydanie specjalne IGiK, Warszawa.
- Bokun J., Sas A., (1985): *Rys historyczny prac nad utworzeniem podstawowej osnowy grawimetrycznej*, Prz. Geod., R. LVII, Nr 1, pp. 27–33.
- Bosy J., Kryński J., (2015): *Reference frames and reference networks*, Geodesy and Cartography, Warsaw, Vol. 64, Special issue, pp. 5–29.
- Chojnicki T., (1960): *Hipsograficzna metoda sporządzania mapy grawimetrycznej anomalii Faye'a w terenach górzystych*, Prace IGiK, T. VII, z. 2(16), pp. 103–126.
- Chojnicki T., (1962): *Cechowanie grawimetru Askania Gs-II w oparciu o dwie bazy grawimetryczne*, Prace IGiK, T. IX, z. 2(20), pp. 64–91.
- Chojnicki T., (1966a): *Eksperymentalna metoda pomiarów grawimetrem Askania Gs-II na zamrożonym morzu*, Prace IGiK, T. XIII, z. 1(28), pp. 127–141.
- Chojnicki T., (1966b): *Metody cechowania grawimetrów typu Askania Gs-II*, Prace IGiK, T. XIII, z. 2(29), pp. 3–84.
- Chowańska-Otyś D., (1971): *Cechowanie laboratoryjne małowzakresowych grawimetrów typu Sharpe metodą nachylania*, Prace IGiK, T. XVIII, z. 2(43), pp. 107–133.
- Chowańska-Otyś D., (1977): *Grawimetryczne prace badawczo-metodyczne, przeprowadzone w południowej części Morza Bałtyckiego*, Prace IGiK, z. 1(55), pp. 3–22.
- Chowańska-Otyś D., Dąbrowski A., (1977): *Wglębna budowa geologiczna podłoża południowego Bałtyku w świetle wyników zdjęcia grawimetrycznego, wykonanego przez Instytut Geodezji i Kartografii w okresie 1970–1972*, Kwartalnik Geologiczny, t. 21, nr 2, pp. 335–344.
- Cisak M., (1993): *Rys historyczny, stan obecny i nowe zamierzenia w grawimetrii geodezyjnej w Polsce oraz prace prowadzone przez IGiK w tym zakresie*, Biul. Inf. BOINTE Geod. i Kartogr., 3, pp. 5–9.
- Cisak M., (1998): *Modelowanie dryftu grawimetrów LaCoste and Romberg typ G przy pomiarach podstawowej osnowy grawimetrycznej w Polsce*, Prace IGiK, z. 96, 45, pp. 109–123.
- Cisak M., Sas A., Siporski L., (1998): *Fundamentalny punkt podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju w Borowej Górze*, Prace IGiK, z. 96, 45, pp. 19–28.
- Cisak M., Sas A., (2004a): *Transformacja współrzędnych punktów z układu „Borowa Góra” do układu „1942”*, Prace IGiK, T. L, z. 108, pp. 5–25.
- Cisak M., Sas A., (2004b): *Analiza dokładności przeliczeń współrzędnych punktów zawartych w bazie danych grawimetrycznych z układu „Borowa Góra”*

- na układ „1942”*, Prace IGIK, z. 108, vol. 50, pp. 27–42. http://bc.igik.edu.pl/Content/148/PI_108_2004_3.pdf
- Cisak M., Sas A., (2005): *Tatrzańska grawimetryczna baza kalibracyjna*, Geodeta – magazyn geoinformacyjny nr 1 styczeń 2005, pp. 12–15.
- Dworakowska J., (1973): *Prace badawcze w zakresie automatyzacji sporządzania katalogów i map grawimetrycznych*, Prace IGIK, T. XX, z. 2(47), pp. 57–70.
- Dykowski P., (2012a): *Vertical gravity gradient determination for the needs of contemporary absolute gravity measurements – first results*, Reports on Geodesy, Vol. 92, No 1, Warsaw University of Technology, pp. 23–36.
- Dykowski P., (2012b): *Calibration of Relative Spring Gravimeters with the Use of the A10 Absolute Gravimeter*, Symposium Gravity, Geoid and Height Systems GGHS2012, Venice, Italy, 9–12 October 2012.
- Dykowski P., Kryński J., Sękowski M., (2012): *Stability of metrological parameters and performance of the A10 free-fall gravimeter*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-4449, EGU General Assembly 2012, 22–27 April, Vienna, Austria.
- Dykowski P., Kryński J., (2014): *Quality assessment of the new gravity control in Poland – first estimate*, The 3rd International Gravity Field Service (IGFS) General Assembly, Shanghai, China, 30 June – 6 July 2014; IAG Symposia Vol. 145, (ed.) P. Willis (submitted).
- Dykowski P., Kryński J., (2015): *Time dependent corrections to absolute gravity determinations in the establishment of modern gravity control*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-817, EGU General Assembly 2015, 12–17 April, Vienna, Austria.
- Dykowski P., Kryński J., Sękowski M., (2012a): *Stability of metrological parameters and performance of the A10 free-fall gravimeter*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-4449, EGU General Assembly 2012, 22–27 April, Vienna, Austria.
- Dykowski P., Sękowski M., Kryński J., (2012b): *Testing the suitability of the A10-020 absolute gravimeter for the establishment of new gravity control in Poland*, IAG Symposia, Vol. 141, (ed.) U. Marti, Symposium Gravity, Geoid and Height Systems GGHS2012, Venice, Italy, 9–12 October 2012, pp. 11–17.
- Dykowski P., Kryński J., Sękowski M., (2013a): *Gravimetric investigations at Borowa Góra Geodetic – Geophysical Observatory*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-8315, EGU General Assembly 2013, 7–12 April, Vienna, Austria.
- Dykowski P., Kryński J., Sękowski M., (2013b): *Approach to the A10 gravimeter total uncertainty budget estimation*, IAG Scientific Assembly 2013, 1–6 September, Potsdam, Germany, IAG Symposia Vol. 143, (ed.) P. Willis, IAG Scientific Assembly 2013, Potsdam, Germany, 1–6 September 2013 (in print).
- Dykowski P., Sękowski M., (2014): *Tidal investigations at Borowa Góra Geodetic-Geophysical Observatory*, Geophysical Research Abstracts Vol. 16,

- EGU2014-14072, EGU General Assembly 2014, 27 April – 2 May, Vienna, Austria.
- Francis O., Klein G., Baumann H., Dando N., Tracey R., Ullrich C., Castelein S., Hua H., Kang W., Chongyang S., Songbo X., Hongbo T., Zhengyuan L., Pálincás V., Kostecký J., Mäkinen J., Näränen J., Merlet S., Farah T., Guerlin C., Pereira Dos Santos F., Le Moigne N., Champollion C., Deville S., Timmen L., Falk R., Wilmes H., Iacovone D., Baccaro F., Germak A., Biolcati E., Kryński J., Sękowski M., Olszak T., Pachuta A., Agren J., Engfeldt A., Reudink R., Inacio P., McLaughlin D., Shannon G., Eckl M., Wilkins T., van Westrum D., Billson R., (2012): *Final report of the regional key comparison EURAMET.M.G-K1: European Comparison of Absolute Gravimeters ECAG-2011*, Metrologia, Vol. 49, Issue 1A, pp. 007–014, doi:10.1088/0026-1394/49/1A/07014
- Francis O., Baumann H., Volarik T., Rothleitner Ch., Klein G., Seil M., Dando N., Tracey R., Ullrich C., Castelein S., Hua H., Kang W., Chongyang S., Songbo X., Hongbo T., Zhengyuan L., Pálincás V., Kostecký J., Mäkinen J., Näränen J., Merlet S., Farah T., Guerlin C., Pereira Dos Santos F., Le Moigne N., Champollion C., Deville S., Timmen L., Falk R., Wilmes H., Iacovone D., Baccaro F., Germak A., Biolcati E., Kryński J., Sękowski M., Olszak T., Pachuta A., Agren J., Engfeldt A., Reudink R., Inacio P., McLaughlin D., Shannon G., Eckl M., Wilkins T., van Westrum D., Billson R., (2013): *The European Comparison of Absolute Gravimeters 2011 (ECAG-2011) in Walferdange, Luxembourg: results and recommendations*, Metrologia, Vol. 50, pp. 257–268, doi:10.1088/0026-1394/50/3/257.
- Francis O., Baumann H., Ullrich Ch., Castelein S., Van Camp M., de Sousa M. A., Melhorato R.L., Li Ch., Xu J., Su D., Wu S., Hu H., Wu K., Li G., Li Z., Hsieh W-C., Pálincás V., Kostecký J., Mäkinen J., Näränen J., Merlet S., Dos Santos F.P., Gillot P., Hinderer J., Bernard J-D., Le Moigne N., Fores B., Gitlein O., Schilling M., Falk R., Wilmes H., Germak A., Biolcati E., Origlia C., Iacovone D., Baccaro F.o, Mizushima S., De Plaen R., Klein G., Seil M., Radinovic R., Sekowski M., Dykowski P., Choi I-M., Kim M-S., Borreguero A., Sainz-Maza S., Calvo M.a, Engfeldt A., Agren J., Reudink R., Eckl M., van Westrum D., Billson R., Ellis B., (2015): *CCM.G-K2 key comparison*, Metrologia, Vol. 52 07009 doi:10.1088/0026-1394/52/1A/07009
- Godah W., Kryński J., (2011): *Validation of GOCE geopotential models over Poland using the EGM2008 and GPS/levelling data*, Geoinformation Issues, Vol. 3, No 1, Warsaw, pp. 5–17.
- Godah W., Kryński J., (2013a): *Evaluation of recent GOCE global geopotential models over the area of Poland*, 13th Czech-Polish Workshop on Recent Geodynamics of the Sudety Mts. and Adjustent Areas, 22–24 November 2012, Wroclaw, Poland, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 10, No 3(171), pp. 257–268, doi:10.1088/0026-1394/50/3/257.
- Godah W., Kryński J., (2013b): *Comparison of GGMs based on one year GOCE observations with the EGM08 and terrestrial data over the area of Sudan*,

- Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, JAG797, doi: 10.1016/j.jag.2013.11.003
- Godah W., Kryński J., (2014): *A new gravimetric geoid model for the area of Sudan using the least squares collocation and a GOCE-based GGM*, The 3rd International Gravity Field Service (IGFS) General Assembly, Shanghai, China, 30 June – 6 July 2014; IAG Symposia Vol. 145, (ed.) P. Willis (in print).
- Godah W., Kryński J., (2015): *Comparison of GGMs based on one year GOCE observations with the EGM08 and terrestrial data over the area of Sudan*, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 35, pp. 128–135. DOI:10.1016/j.jag.2013.11.003
- Godah W., Szelachowska M., Kryński J., (2014): *Accuracy assessment of GOCE-based geopotential models and their use for modelling the gravimetric quasigeoid – A case study for Poland*, Geodesy and Cartography, Warsaw, Vol. 63, No 1, pp. 3–24.
- Godah W., Kryński J., Szelachowska M., (2015): *On the accuracy assessment of the consecutive releases of GOCE-based GGMs over the area of Poland*, Newton's bulletin (in print).
- Grzyb M., Kryński J., Mańk M., (2006): *The effect of topography and quality of a digital terrain model on the accuracy of terrain corrections for centimetre quasigeoid modelling*, Geodezja i Kartografia, Vol. 55, No 1, pp. 23–46.
- Jędrzejewska M., (1966): *Zagadnienie przyjęcia stałej gęstości przy opracowaniu map anomalii Bouguera*, Prace IGIK, T. XIII, z. 2(29), pp. 151–167.
- Jędrzejewska M., (1970): *Analiza dokładności opracowania średnich wartości anomalii siły ciężkości*, Prace IGIK, T. XVII, z. 1(40), pp. 39–64.
- Jiang Z., Pálinkáš V., Arias F.E., Liard J., Merlet S., Wilmes H., Vitushkin L., Robertsson L., Tisserand L., Pereira Dos Santos F., Bodart Q., Falk R., Baumann H., Mizushima S., Mäkinen J., Bilker-Koivula M., Lee C., Choi I.M., Karaboce B., Ji W., Wu Q., Ruess D., Ullrich C., Kostelecký J., Schmerge D., Eckl M., Timmen L., Le Moigne N., Bayer R., Olszak T., Ågren J., Del Negro C., Greco F., Diamant M., Deroussi S., Bonvalot S., Kryński J., Sękowski M., Hu H., Wang L.J., Svitlov S., Germak A., Francis O., Becker M., Inglis D., Robinson I., (2012): *The 8th International Comparison of Absolute Gravimeters 2009: the first Key Comparison (CCM.G-K1) in the field of absolute gravimetry*, Metrologia, Vol. 49, No 6, pp. 666–684, doi: 10.1088/0026-1394/49/6/666.
- Kloch G., Kryński J., (2007): *Ocena jakości poprawek terenowych „1992” oraz analiza ich przydatności do obliczenia poprawek terenowych na obszarze Polski spełniających wymagania centymetrowej geoidy*, Prace IGIK, t. LIII, z. 111, Warszawa, pp. 64–89.
- Kloch G., Kryński J., (2008a): *Methodology of quality assessment of height data, used for precise geoid modelling*, The 7th International Conference on “Environmental Engineering”, 22–23 May 2008, Vilnius, Lithuania, pp. 1339–1344.
- Kloch G., Kryński J., (2008b): *Towards optimisation of the determination of terrain corrections with the use of prism method*, The 7th International Con-

- ference on “Environmental Engineering”, 22–23 May 2008, Vilnius, Lithuania, pp. 1345–1353.
- Kloch G., Kryński J., (2008c): *Implementacja długo-, średnio- i krótkofalowych składowych sygnałów funkcjonalów potencjału zakłócającego w procesie modelowania geoidy*, Prace IGiK, t. LIV, z. 112, Warszawa, pp. 1–25.
- Kloch G., Kryński J., (2010): *On the determination of the terrain correction using the spherical approach*, IAG Symposia Vol. 135, (ed.) S.P. Mertikas, Gravity, Geoid and Earth Observation, IAG Commission2: Gravity Field, Chania, Crete, Greece, 23–27 June 2008, pp. 389–395.
- Kloch-Główka G., Kryński J., Szelachowska M., (2012): *Time variations of the gravity field over Europe obtained from GRACE data*, Reports on Geodesy, Vol. 92, No 1, Warsaw University of Technology, pp. 175–190.
- Kryński J., Sas-Uhrynowski A., (2000): *Geodezja w XXI wieku w Instytucie Geodezji Kartografii*, Prace IGiK, Wydanie Jubileuszowe, 55-lecie Instytutu Geodezji Kartografii 1945–2000, Warszawa, pp. 47–58.
- Kryński J., Zanimonskiy Y., (2000): *Regularne zmiany przyspieszenia siły ciężkości na podstawie analizy krótkich szeregów obserwacyjnych*, Zesz. Nauk. AR Wrocław Geod. i Urz. Rolne, 394, 2000, 17, pp. 253–264.
- Kryński J., Zanimonskiy Y., (2001): *Common Features of Time Series of Superfluous Gravity*, GPS Derived Positions and Meteo Data within Diurnal Interval, Proceedings of the IAG 2001 Scientific Assembly, Vistas for Geodesy in the New Millennium, 2–7 September 2001, Budapest, Hungary, C_4_PO5 (CD).
- Kryński J., Zanimonskiy Y., (2002): *Diurnal variations in gravity data and GPS solutions. Facts and artefacts* (in Russian), Proceedings of the International Conference on Modern Progresses of Geodetic Sciences and Industry, 28–30 March, Lvov, Ukraine.
- Kryński J., Zanimonskiy Y., (2003): *Analiza zmienności w ciągach rozwiązań GPS i ciągach obserwacji grawimetrycznych*, Seria Monograficzna, Nr 8 / Warszawa, IGiK, (111 pp) http://bc.igik.edu.pl/Content/26/SM_8_15411_8391621677.pdf
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2004): *New Results in Precise Geoid Modelling in Poland*, Proceedings of the IAG Symposium „Gravity, Geoid and Space Missions – GGSM2004”, 30 August – 3 September 2004, Porto, Portugal (CD).
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2005a): *Study on choice of global geopotential model for quasigeoid determination in Poland*, Geodezja i Kartografia, Vol. 54, No 1, pp. 17–36.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2005b): *Towards the precise geoid in Poland*, The 6th International Conference on “Environmental Engineering”, 26–27 May 2005, Vilnius, Lithuania, pp. 913–918.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2006a): *Regional quasi-geoid determination in the area of Poland*, 5th FIG regional Conference for Africa, Accra, Ghana, 8–11 March 2006 (CD).
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2006b): *The overview of precise quasigeoid modelling in Poland*, Contributions to Geophysics and Geodesy, Special issue,

- WIGFR 2006, Geophysical Institute of Slovak Academy of Sciences, pp. 113–149.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2006c): *Did the new geopotential models improve the fit of gravimetric quasigeoid in Poland to GPS/levelling data?*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Vienna, Austria, 1–4 June 2005, EUREF Publication No 15, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 38, Frankfurt am Main, pp. 374–378.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2007a): *Centimetre quasigeoid modelling in Poland using heterogeneous data*, IAG Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS) “Gravity Field of the Earth”, 28 August – 1 September 2006, Istanbul, Turkey, pp. 37–42.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2007b): *Fitting gravimetric quasigeoid model to GPS/levelling data in Poland*, IAG Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS) “Gravity Field of the Earth”, 28 August – 1 September 2006, Istanbul, Turkey, pp. 96–101.
- Kryński J., Łyszkowicz A., (2008): *Centimetre level of accuracy of the new quasigeoid in Poland*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Riga, Latvia, 14–17 June 2006, EUREF Publication No 16, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 40, Frankfurt am Main, pp. 307–314.
- Kryński J., Sas-Uhrynowski A., Siporski L., (2003): *Verification of the Absolute Gravity Measurements in Poland*, Proceedings of the Workshop on Instrumentation and Metrology in Gravimetry, 28–30 October 2002, “Institut de Europe”, Castle of Münsbach, Luxembourg, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 22, pp. 129–136.
- Kryński J., (2001): *Polish Geoid Project*, NKG Working Group Meeting on Geoid, Satellite Geodesy and Geodynamics, 8–10 October 2001, Honefoss, Norway.
- Kryński J., (2005): *Ku centymetrowej geoidzie w Polsce*, Geodeta – magazyn geoinformacyjny nr 12 (127) grudzień 2005, pp. 58.
- Kryński J., (2006): *Geodetic-Geophysical Observatory Borowa Gora and Astro-Geodetic Observatory at Jozefoslaw as a laboratory for the regional absolute gravimeters comparison campaigns in Poland*, 2nd Joint CCM WGG and IAG SGCAG meeting, Berne, Switzerland, 7–8 June 2006 <http://www.bipm.org/wg/CCM/CCM-WGG/Restricted/welcome.jsp> CCM-WGG/06-41.
- Kryński J., (2007a): *Precyzyjne modelowanie quasigeoidy na obszarze Polski – wyniki i ocena dokładności*, Seria Monograficzna, Nr 13. Warszawa, IGIK, (266 pp) http://bc.igik.edu.pl/Content/12/SM_13_16020_9788360024119.pdf
- Kryński J., (2007b): *Centymetrowa geoida na obszarze Polski - realia i perspektywy*, Prace IGIK, z. 111, vol. 53, pp. 5–46, <http://bc.igik.edu.pl/Content/76/002.pdf>
- Kryński J., (2009): *Koncepcja osnovy grawimetrycznej na tle rozwoju technologicznego w pomiarach siły ciężkości*, Seminarium „Wybrane problemy

- dynamiki Ziemi” Sekcji Dynamiki Ziemi i Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN, 3–4 grudnia 2009, Warszawa-Józefosław, Poland (CD).
- Kryński J., (2012): *Gravimetry for geodesy and geodynamics – brief historical review*, Reports on Geodesy, Vol. 92, No 1, Warsaw University of Technology, pp. Vol. 92, No 1, pp. 69–86.
- Kryński J., (2014): *Istniejące modele geoidy/quasigeoidy na terenie Polski*, Seminarium „Realizacja Osnów Geodezyjnych a Problemy Geodynamiki” Komitetu Geodezji PAN, 25–27 września 2014, Grybów.
- Kryński J., (2015): *Gravity field modelling and gravimetry in Poland in 2011–2014*, Geodesy and Cartography, Warsaw, Vol. 64, Special issue, pp. 31–50.
- Kryński J., Kloch G., (2009): *Evaluation of the performance of the new EGM08 global geopotential model over Poland*, Geoinformation Issues, Vol. 1, No 1, Warsaw, pp. 7–17.
- Kryński J., Roguski P., (2009): *A-10 absolute gravimeter for geodesy and geodynamics*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Florence, Italy, 27–29 May 2009, <http://www.euref.eu/symposia/2009Florence/P05-02-p-Krynski.pdf>
- Kryński J., Barlik M., (2010): *Współczesne osnovy grawimetryczne i rola w nich najnowszych technologii pomiarów absolutnych*, Seminarium „Współczesne problemy osnov podstawowych” Sekcji Dynamiki Ziemi i Sekcji Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN, 14–15 października 2010, Grybów, Poland (CD)
- Kryński J., Barlik M., (2012a): *On a lasting role of geodynamics in modern vertical and gravity reference systems*, Reports on Geodesy, Vol. 92, No 1, Warsaw University of Technology, pp. 61–68.
- Kryński J., Barlik M., (2012b): *Modernizacja krajowej podstawowej osnovy grawimetrycznej*, Seminarium „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych a problemy definiowania krajowych układów odniesienia” Komitetu Geodezji PAN, 18–19 października 2012, Grybów.
- Kryński J., Barlik M., (2014): *Realizacja projektu modernizacji podstawowej osnovy grawimetrycznej kraju*, Seminarium „Realizacja Osnów Geodezyjnych a Problemy Geodynamiki” Komitetu Geodezji PAN, 25–27 września 2014, Grybów.
- Kryński J., Dykowski P., (2014): *Establishment of new gravity control in Poland – first results*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 16, EGU2014-14048, EGU General Assembly 2014, 27 April – 2 May, Vienna, Austria.
- Kryński J., Sękowski M., (2010): *Surveying with the A10-20 Absolute Gravimeter for Geodesy and Geodynamics – first results*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-8167; EGU General Assembly 2010, 2–7 May 2010, Vienna, Austria; Reports on Geodesy, No 1(88), Warsaw University of Technology, pp. 27–35.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2008): *National Report of Poland to EUREF 2008*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Brussels,

- Belgium, 18–20 June 2008, <http://www.euref.eu/symposia/2008Brussels/06-19-p-PL-Report%20EUREF2008%20JK-JBR.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2009a): *National Report of Poland to EUREF 2007*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in London, UK, 6–9 June 2007, EUREF Publication No 17, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 42, Frankfurt am Main, pp. 251–257.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2009b): *National Report of Poland to EUREF 2009*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Florence, Italy, 27–29 May 2009, <http://www.euref.eu/symposia/2009Florence/07-19-p-poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2010): *National Report of Poland to EUREF 2010*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Gävle, Sweden, 2–5 June 2010, <http://www.euref-ia.net/symposia/2010Gavle/07-22-p-Poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2011): *National Report of Poland to EUREF 2011*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Chisinau, Moldova, 25–28 June 2011, <http://www.euref-ia.net/symposia/2011Chisinau/07-22-p-Poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2012): *National Report of Poland to EUREF 2012*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Paris, France, 6–8 June 2012, <http://www.euref-ia.net/symposia/2012Paris/06-22-p-Poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2013): *National Report of Poland to EUREF 2013*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Budapest, Hungary, 29–31 May 2013, <http://www.euref-ia.net/symposia/2013Budapest/06-22-p-Poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2014): *National Report of Poland to EUREF 2014*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Vilnius, Lithuania, 4–6 June 2014, <http://www.euref-ia.net/symposia/2014Vilnius/05-20-p-Poland.pdf>.
- Kryński J., Rogowski J.B., (2015): *National Report of Poland to EUREF 2015*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Leipzig, Germany, 3–5 June 2015.
- Kryński J., Rogowski J.B., Zieliński J.B., (2004): *National Report of Poland to EUREF 2003*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF) held in Toledo, Spain, 4–7 June 2003, EUREF Publication No 13, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 33, Frankfurt am Main, pp. 264–268.
- Kryński J., Mańk M., Grzyb M., (2005): *Evaluation of digital terrain models in Poland in view of a cm geoid modelling*, Geodezja i Kartografia, Vol. 54, No 4, pp. 155–175.
- Kryński J., Rogowski J.B., Zieliński J.B., (2005): *National Report of Poland to EUREF 2004*, Symposium of the IAG Subcommittee for Europe (EUREF)

- held in Bratislava, Slovak Republic, 2–5 June 2004, EUREF Publication No 14, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Band 35, pp. 258–262.
- Kryński J., Rogowski J.B., Zieliński J.B., (2006): *National Report of Poland to EUREF 2005*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Vienna, Austria, 1–4 June 2005, EUREF Publication No 15, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 38, Frankfurt am Main, pp. 269–274.
- Kryński J., Rogowski J.B., Zieliński J.B., (2008): *National Report of Poland to EUREF 2006*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Riga, Latvia, 14–17 June 2006, EUREF Publication No 16, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 40, Frankfurt am Main, pp. 255–263.
- Kryński J., Barlik M., Olszak T., Dykowski P., (2012a): *Towards the establishment of new gravity control in Poland*, IAG Symposia Vol. 141, (ed.) U. Marti, Symposium Gravity, Geoid and Height Systems GGHS2012, Venice, Italy, 9–12 October 2012, pp. 3–9.
- Kryński J., Kloch-Główka G., Szelachowska M., (2012b): *On variability of geoid in Europe*, Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF) held in Paris, France, 6–8 June 2012, <http://www.euref-iaig.net/symposia/2012Paris/05-01-Krynski.pdf>.
- Kryński J., Olszak T., Barlik M., Dykowski P., (2013): *New gravity control in Poland – needs, the concept and the design*, Geodesy and Cartography, Warsaw, Vol. 62, No 1, pp. 3–21. DOI 10.2478/geocart-2013-0001
- Kryński J., Dykowski P., Sękowski M., Mäkinen J., (2014a): *On the estimate of accuracy and reliability of the A10 absolute gravimeter*, IAG Symposia Vol. 139, C. Rizos and P. Willis (eds.), Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet, XXV IUGG General Assembly, Melbourne, Australia, 28 June – 7 July 2011, pp. 297–302, DOI 10.1007/978-3-642-37222-3_39.
- Kryński J., Kloch-Główka G., Szelachowska M., (2014b): *Analysis of time variations of the gravity field over Europe obtained from GRACE data in terms of geoid height and mass variation*, IAG Symposia Vol. 139, C. Rizos and P. Willis (eds.), Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet, XXV IUGG General Assembly, Melbourne, Australia, 28 June – 7 July 2011, pp. 365–370, DOI 10.1007/978-3-642-37222-3_48.
- Łyszczowicz A., Kryński J., (2008): *Improved astro-gravimetric geoid in Poland*, The 7th International Conference on “Environmental Engineering”, 22–23 May 2008, Vilnius, Lithuania, pp. 1391–1400.
- Makowska A., (2003): *Problemy interpretacji powtarzanych okresowo pomiarów niwelacyjnych i grawimetrycznych*, w Dynamika Tatr wyznaczana metodami geodezyjnymi, Seria Monograficzna, Nr 6, A. Makowska (red.), Warszawa, IGiK, pp. 109–128. http://bc.igik.edu.pl/Content/27/SM_6_15320_839162160X.pdf

- Mäkinen J., Sękowski M., Kryński J., (2010a): *The use of the A10-020 gravimeter for the modernization of the Finnish First Order Gravity Network*, Geoinformation Issues, Vol. 2, No 1, pp. 5–17.
- Mäkinen J., Sękowski M., Kryński J., Ruotsalainen H., (2010b): *Gravity change in Finland from comparison of new measurements using the outdoor absolute gravimeter A10 with legacy relative measurements – first results*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 12, EGU2010-12932, EGU General Assembly 2010, 2–7 May, Vienna, Austria.
- Mäkinen J., Sękowski M., Kryński J., Ruotsalainen H., (2010c): *Updating the Finnish first order gravity network using the outdoor absolute gravimeter A10*, IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010), 22–25 June 2010, Saint Petersburg, Russia, pp. 178.
- Mäkinen J., Sękowski M., Kryński J., Näränen J., Raja-Halli., Ruotsalainen H., Virtanen H., (2011): *Gravity change in Finland 1962–2010 from the comparison of legacy relative measurements with new measurements made with the outdoor absolute gravimeter A10*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-12587, EGU General Assembly 2011, 3–8 April, Vienna, Austria.
- Mäkinen J., Sękowski M., Kryński J., Kuokkanen J., Näränen J., Raja -Halli A., Ruotsalainen H., Virtanen H., (2013): *Gravity change in Finland 1962–2010 from the comparison of new measurements using the outdoor absolute gravimeter A10-020 with legacy relative measurements*, Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013 -11644, EGU General Assembly 2013, 7–12 April, Vienna, Austria.
- Sas A., (1973): *Badania laboratoryjne grawimetrów małowzakresowych typu Sharpe i GAK 7T*, Informator BOINTE, T. 18, Nr 5, pp. 19–30.
- Sas A., (1992): *Badania zmian kierunku linii pionu pod wpływem wydobywania kopalin*, Prace IGiK, T. XXXIX, z. 1(87), pp. 85–99.
- Sas A., (1998): *Analiza porównawcza nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju (POGK 97) z osnową z lat 60.*, VI Sympozjum „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych” 3-4.09.1998, pp. 143–147.
- Sas A., (1999): *Analiza porównawcza nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju (POGK 97)*, Prace IGiK, z. 98, pp. 51–58.
- Sas A., Siporski L., Sas-Uhrynowski A., Barlik M., Szurublik W., (1993): *Pomiary absolutne grawimetrami balistycznymi Instytutu „Metrologia” na punktach nowej podstawowej sieci grawimetrycznej kraju*, V symposium „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych” 28-29.10.1993, pp. 118–123.
- Sas-Uhrynowski A., Łyszkowicz A., (1993): *Zastosowanie metody FFT do obliczenia grawimetrycznej geoidy dla obszaru Polski przy wykorzystaniu średnich anomalii grawimetrycznych w blokach 2x2 km.*, V symposium „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych” 28–29.10.1993, pp. 124–129

- Sas-Uhrynowski A., (1998): *Pomiary absolutne na podstawowej osnowie grawimetrycznej kraju*, VI Sympozjum „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych” 3–4.09.1998, pp. 153–160.
- Sas-Uhrynowski A., Cisak M., Sas A., Siporski L., (1998): *Zmodernizowana podstawowa osnowa grawimetryczna kraju (POGK 97)*, VI Sympozjum „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych” 3–4.09.1998, pp. 137–141.
- Sas-Uhrynowski A., Cisak M., Sas A., Siporski L., (1999): *Zmodernizowana podstawowa osnowa grawimetryczna kraju (POGK 97)*, Prace IGiK, z. 98, pp. 41–49.
- Sas-Uhrynowski A., Cisak M., Sas A., Siporski L., Kryński J., (2000): *A new gravimetric control network for Poland, XXV General Assembly of European Geophysical Society, Millenium Conference on Earth, Planetary and Solar System Sciences, Nice, France, 25–29 April 2000*, Geophysical Research Abstracts, G2.06, Vol. 2 (CD).
- Sas-Uhrynowski A., Cisak M., (2001): *Absolutne pomiary grawimetryczne w Polsce*, Prace IGiK, z. 103, 48, pp. 193–216.
- Sas-Uhrynowski A., Zanimonskiy Y., Kostin A., (2001): *Badanie i udoskonalenie polowego grawimetru balistycznego TBG*, Prace IGiK, z. 103, 48, pp. 83–114.
- Sas-Uhrynowski A., (2002): *Absolute gravity measurements in Poland*, Seria Monograficzna, Nr 3, / Warszawa, IGiK, (65 pp).
- Sękowski M., (2010): *Pierwszy taki grawimetr. Mówi dr Marcin Sękowski z Zakładu Geodezji i Geodynamiki IGiK*, Geodeta – magazyn geoinformacyjny, nr 8, pp. 11.
- Sękowski M., Kryński J., (2010): *Gravity survey with the A10-20 absolute gravimeter – first results*, IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2010), 22–25 June 2010, Saint Petersburg, Russia, pp. 78–83.
- Sękowski M., Kryński J., Dykowski P., Mäkinen J., (2012): *Effect of laser and clock stability and meteorological conditions on gravity surveyed with the A10 free-fall gravimeter – first results*, Reports on Geodesy, Vol. 92, No 1, Warsaw University of Technology, pp. 47–59.
- Sidorenko G., Miroshnichenko O., Omelchenko A., Zanimonskiy Y.M., Kryński J., (2004): *Sovmestnyi analiz vremennykh riadov gravimetricheskikh daniy, atmosfernogo dovlennia i urovnia moria*, Geoforum’2004 Symposium, Lviv-Javoriv, Ukraine, 1–3 April 2004, Suchasni dosiagnennia geodezychnoi nauky ta vyrobnytstva”, Zbirnyk naukovykh prac Zahidnogo Geodezychnogo Tovarystva, Lviv, Liga-Pres, 2004, pp. 144–148.
- Siporski L., (1999): *Wyrównanie wyników pomiarów nowej podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju (POGK 97)*, Prace IGiK, z. 98, pp. 59–64.
- Siporski L., (2000): *Sprawozdanie z wykonania projektu badawczego nr 9T12E01612 finansowanego przez KBN pt.: Badanie i udoskonalenie polowych grawimetrów balistycznych TBG oraz wykorzystanie ich do wyznaczenia standardu podstawowej osnowy grawimetrycznej kraju*, Warszawa, IGiK, 2000, pp. 68.

- Siporski L., Mroczek S., Sas A., Sas-Uhrynowski A., (2000): *Krajowy wzorzec grawimetryczny*, 99, Zesz. Nauk. AR Wrocław, Geod. i Urz. Rol., 394, 17, pp. 359–369.
- Szelachowska M., Kryński J., (2009): *Evaluation of the effect of uncertainty of height data on the accuracy of terrain corrections*, Geodesy and Cartography, Vol. 58, No 2, pp. 71–88.
- Szelachowska M., Kryński J., (2014): *GDQM-PL13 – the new gravimetric quasigeoid model for Poland*, Geoinformation Issues, Vol. 6, No 1, Warsaw, pp. 5–19.
- Zanimonskiy Y., Kryński J., Sas-Uhrynowski A., Cisak J., (1999): *Estimation of Calibration Accuracy of the Portable Ballistic Gravimeter* (in Russian), Proceedings of the 2nd International Scientific-Technical Conference “Metrology – 99”, Kharkov Institute of Metrology, Kharkov, Ukraine, 5–7 September 1999, pp. 217–222.
- Zanimonskiy Y., Kryński J., Sas-Uhrynowski A., Cisak J., (2000): *First Results of Regular Gravity Measurements on Sub-Monthly Intervals at Borowa Góra Geodetic-Geophysical Observatory*, Proceedings of the Workshop on High Precision Gravity Measurements with Application to Geodynamics and Second Global Geodynamic Project Workshop, 24–26 March 1999, Luxembourg, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 17, pp. 239–246.
- Zanimonskiy Y., Kryński J., (2001): *Diurnal and Half-Diurnal Periodic Terms in Variations of Superfluous Gravity* (in Russian), Proceedings of the International Conference on Study of Geodynamic Processes with Methods of Astronomy, Geodesy and Geophysics at 75 Anniversary of Gravimetric Observatory at Poltava, Poltava, Ukraine, October 2001.
- Zanimonskiy Y. M., Kryński J., Nagornyi V. D., Sas-Uhrynowski A., (2003): *On the Optimal Measuring Strategy for Ballistic Gravimeter*, Proceedings of the Workshop on Instrumentation and Metrology in Gravimetry, 28–30 October 2002, “Institut de Europe”, Castle of Münsbach, Luxembourg. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 22, pp. 29–35.
- Ząbek Z., Dobaczewska W., (1957): *Pomiary aparatem czterowahadłowym na punktach bazy grawimetrycznej*, Prace IGiK, T. V, z. 2(11), pp. 133–213.
- Ząbek Z., Dobaczewska W., (1959): *Pomiary aparatem czterowahadłowym na punktach zachodniej części sieci wahadłowej w Polsce*, Prace IGiK, T. VI, z. 2(14), pp. 262–307.
- Ząbek Z., Dobaczewska W., (1960a): *Pomiary aparatem czterowahadłowym na punktach wschodniej części sieci wahadłowej w Polsce*, Prace IGiK, T. VII, z. 1(15), pp. 63–103.
- Ząbek Z., Dobaczewska W., (1960b): *Nawiązanie aparatem czterowahadłowym punktu w Jeleniej Górze do podstawowej sieci wahadłowej*, Prace IGiK, T. VII, z. 2(16), pp. 85–102.