

JAN KRYŃSKI

## MISJA SATELITARNA CHAMP – PIERWSZE WYNIKI I PERSPEKTYWY BADAWCZE

*ZARYS TREŚCI: Misja CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload), trwająca od 15 lipca 2000 roku, jest pierwszą w historii misją satelitarną przeznaczoną do kompleksowego badania Ziemi jako systemu złożonego z elementów stałych, ciekłych i gazowych, wykazujących zmienność w czasie i przestrzeni oraz wzajemnie na siebie oddziałujących w różnych skalach czasowych, za pomocą aparatury pomiarowej umieszczonej na niskim satelicie. Tematyka badawcza misji CHAMP koncentruje się wokół badania pola grawitacyjnego i pola magnetycznego Ziemi z uwzględnieniem ich zmienności w czasie oraz badania stanu i dynamiki neutralnej atmosfery i jonosfery. Stan zaawansowania programów badawczych oraz dyskusja wyników uzyskanych z pierwszych 18 miesięcy trwania misji były przedmiotem konferencji naukowej zorganizowanej w styczniu 2002 roku w Poczdamie. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd zadań badawczych związanych z realizacją misji CHAMP, problemów naukowych i technicznych dyskutowanych na konferencji, a także wyników uzyskanych i spodziewanych do otrzymania w dalszej fazie trwania misji.*

### 1. WPROWADZENIE

Umieszczenie pierwszych sztucznych satelitów na orbitach okołozemskich stworzyło możliwość globalnego modelowania pola grawitacyjnego Ziemi. Obserwacje i analiza ruchu orbitalnego sztucznych satelitów Ziemi stanowią podstawę do wyznaczenia globalnych parametrów pola grawitacyjnego Ziemi, to jest parametrów długofalowych składowych widma tego pola. Precyzyjnie śledzone były dotychczas głównie satelity wysokie, czyli orbitujące na wysokościach powyżej 1000 km nad Ziemią. Na ruch orbitalny tych satelitów znikomy wpływ mają harmoniki wyższych rzędów. Z uwagi na konfiguracje orbit dotychczas obserwowanych satelitów oraz stosowane techniki śledzenia ruchu satelitów tylko współczynniki

harmonik do około 20. stopnia i rzędu w modelu pola grawitacyjnego Ziemi w formie funkcji kulistych były wyznaczone z dokładnością, którą można było uznać za zadowalającą. Przestrzenna rozdzielczość satelitarnego modelu pola grawitacyjnego Ziemi wynosi zatem około 1200 km, zaś dokładność wyznaczanego kształtu Ziemi, to znaczy geoidy, kształtuje się na poziomie 1 m (Schwintzer P. et al. 1997). Poprawienie rozdzielczości modeli pola grawitacyjnego uzyskuje się poprzez łączne opracowanie satelitarnych danych orbitalnych z danymi reprezentującymi znacznie wyższy stopień szczegółowości informacji o polu grawitacyjnym, czyli danymi altimetrycznymi oraz danymi z naziemnych, morskich i lotniczych pomiarów grawimetrycznych. Przykładem takiego modelu jest EGM96 o rozdzielczości 60 km. Takie zwiększenie rozdzielczości modelu nie idzie w parze ze zwiększeniem jego dokładności. Błędy parametrów długofalowych pochodzące z opracowania danych orbitalnych przenoszą się w całości na modele o zwiększonej rozdzielczości. W dodatku parametry pola grawitacyjnego Ziemi podlegają zmienności w czasie (np. Reigber Ch. et al. 1999b). Co więcej, modele takie obciążone są luką spektralną spowodowaną brakiem obserwacji funkcjonałów pola grawitacyjnego o pośrednim stopniu rozdzielczości. Moc sygnału pochodzącego od harmonik wyższych stopni wzrasta wraz z obniżaniem się wysokości orbity. Wyznaczenie tych harmonik łączy się z potrzebą obserwowania niskich satelitów, to znaczy satelitów na wysokości 200–500 km, nazwanych w latach 80. satelitami LEO (Low Earth Orbiter).

Zapewnienie precyzyjnych obserwacji satelitów LEO wymagało stworzenia aktywnego, zautomatyzowanego systemu obserwacyjnego. Postępujący rozwój technologiczny stwarzał realne warunki do wprowadzenia nowych geodezyjnych satelitarnych technik pomiarowych. Koncepcja modelowania pola grawitacyjnego Ziemi na podstawie aktywnych pomiarów satelitarnych z wykorzystaniem satelitów na niskich orbitach sięga początku lat 70. XX wieku. Niemal równolegle rozpoczęto badania nad techniką pomiaru satelity z satelity (satellite-to-satellite tracking, SST) (Wolf M. 1969; Morrison F. 1970; Schwarz K.P. 1970; Comfort G.C. 1973; Balmino G. 1974; Kryński J. 1977, 1978) w dwóch konfiguracjach: wysoki-niski (H-L) i niski-niski (L-L) oraz gradiometrii satelitarnej (Chovitz B. et al. 1973; Reed G.B. 1973; Rummel R. 1975; Kryński J., Schwarz K.P. 1977a, 1977b). Zasadniczym problemem pomiarowym w technice obserwacji satelity z satelity był precyzyjny pomiar odległości pomiędzy satelitami. W przygotowywanych projektach eksperymentów kosmicznych rozważano technikę dopplerowską lub technikę opartą na pomiarze laserowym. W gradiometrii satelitarnej zasadniczą przeszkodą typu pomiarowego było skonstruowanie odpornego na zakłócenia zewnętrzne gradiometru o bardzo wysokiej czułości. Brakowi gotowości technicznej do skonstruowania odpowiedniej aparatury pomiarowej towarzyszyły trudności w uzyskaniu

środków na realizację odpowiedniej misji kosmicznej. Kilkakrotnie wykonywane były eksperymenty z pomiarem satelity z satelity przy okazji różnorodnych misji kosmicznych (np. przy łączeniu statków kosmicznych Apollo i Soyuz), jednak dopiero implementowanie techniki pomiarowej GPS umożliwiło realizację programów kosmicznych, w których pomiary satelity z satelity stanowią będąc jeden z zasadniczych elementów misji. Sprawne funkcjonowanie odbiornika GPS na pokładzie satelity altymetrycznego TOPEX/Poseidon, dzięki któremu orbita satelity wyznaczana była z centymetrową dokładnością i wysoką rozdzielczością na podstawie obserwacji typu satelity z satelity w konfiguracji H-L, stało się kluczowym elementem powodzenia zaplanowanego programu badawczego. Technika obserwacji satelity z satelity w konfiguracji H-L posłużyła następnie kolejnym misjom kosmicznym, takim jak Ørsted, SAC-C, GPS/MET. Po raz pierwszy jednak na satelitach typu LEO technika SST znajduje zastosowanie w misjach CHAMP (konfiguracja H-L) i GRACE (konfiguracja L-L). W niedalekiej przyszłości technika pomiaru satelity z satelity zostanie wykorzystana w programach kosmicznych Jason i GOCE. Prace nad implementacją gradiometrii satelitarnej znajdują się jeszcze w fazie badań i eksperymentów. Ważnym etapem prac eksperymentalnych nad utworzeniem gradiometru satelitarnego jest umieszczenie na satelitach CHAMP i GRACE akcelerometrów. W obydwu misjach akcelerometry te przeznaczone są do śledzenia niegrawitacyjnych perturbacji ruchu orbitalnego satelitów. Przewiduje się, że aparatura gradiometryczna zostanie po raz pierwszy użyta w misji satelitarnej GOCE, planowanej na 2006 rok.

Technika pomiarów GPS, utworzona do celów globalnej nawigacji, obok szerokich zastosowań wynikających z możliwości używania jej do precyzyjnego wyznaczania pozycji z wysoką rozdzielczością czasową, znalazła zastosowanie w modelowaniu troposfery i jonosfery. Wykorzystuje się w tym celu sieć kilkuset stacji permanentnych GPS funkcjonujących w ramach Międzynarodowej Służby GPS (IGS) powołanej przez Międzynarodową Asocjację Geodezji (IAG). Działalność tych stacji służy realizacji i monitorowaniu globalnego ziemskiego układu odniesienia, wyznaczaniu precyzyjnych orbit satelitów GPS oraz badaniom geodynamicznym. Na bazie istniejących globalnych i regionalnych sieci stacji GPS stworzono dodatkowo systemy regularnego monitorowania zawartości elektronów w jonosferze, temperatury troposfery i zawartości pary wodnej w troposferze. Dane uzyskiwane z analizy obserwacji GPS stanowią jakościowe i ilościowe uzupełnienie informacji o atmosferze, pozyskiwanych za pomocą tradycyjnych technik pomiarowych. Z uwagi na konfigurację układów "odbiornik na stacji naziemnej – satelita GPS" systemy te dostarczają informacje o strukturze i dynamice atmosfery głównie w kierunku pionowym. Rozdzielczość systemów zależy od konfiguracji stacji naziemnych, których rozkład jest dalece niejednorodny. Umieszczenie odbiornika GPS na pokładzie

satelity umożliwia tworzenie jednorodnych czterowymiarowych obrazów stanu atmosfery, a także regularne sondowanie niskich warstw atmosfery, zapewniając dodatkowo wysoką rozdzielczość horyzontalną. Sondowanie to odbywa się na zasadzie pomiaru kąta zakrzywienia trajektorii sygnału (kąta zakrzywienia jest funkcją refrakcyjności ośrodka), który przebiega tuż nad powierzchnią Ziemi od satelity GPS do odbiornika na satelicie śledzącym. Pomiar efektu zwanego okultacją radiową rozpoczęto w programach kosmicznych wykorzystujących wysokie satelity Ørsted, SAC-C i GPS/MET. CHAMP jest pierwszym satelitą typu LEO, którego jednym z głównych celów jest monitorowanie dolnych warstw atmosfery na podstawie obserwacji okultacji radiowych.

Podobnie jak w przypadku pola grawitacyjnego Ziemi, globalne modelowanie pola magnetycznego Ziemi stało się możliwe dopiero w epoce kosmicznej. Obserwacje wykonywane za pomocą aparatury magnetometrycznej umieszczonej na pokładzie satelitów służą do globalnego wyznaczania i monitorowania zmienności pola magnetycznego Ziemi. Złożoność struktury, podatność na czynniki zewnętrzne i szybka zmienność pola magnetycznego Ziemi powodują potrzebę ciągłego monitorowania tego pola, w miarę możliwości na różnych wysokościach. Obserwacje magnetyczne wykonane w ramach misji CHAMP po raz pierwszy na wysokości satelity typu LEO obok wzbogacenia rozdzielczości czasowo-przestrzennej modelu pola magnetycznego Ziemi dostarczą informacji o polu magnetycznym, z których wraz z pozyskanymi informacjami o polu grawitacyjnym Ziemi można będzie uzyskać nową jakościowo wiedzę o litosferze ziemskiej, przydatną dla geodezji, geologii i geofizyki. Informacje te będą reprezentowane przez zbiory danych o dużym wskaźniku nadliczbowości. Jakość danych zapewni precyzyjna aparatura pomiarowa wyposażona w dokładne urządzenia do określania jej orientacji. Zmniejszanie się wysokości satelity w czasie trwania misji spowoduje zwiększenie rozdzielczości pola modelowanego z obserwacji. Informacja o strukturach geologicznych o wymiarach przekraczających 300 km jest trudna i kosztowna do uzyskania przy użyciu rutynowych technik geologicznych. W takich skalach można efektywnie interpretować litosferę, wykorzystując magnetyczne i grawimetryczne obserwacje z misji CHAMP (Ravat D. 2002).

Misja satelitarna CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) dedykowana badaniom pola grawitacyjnego i magnetycznego Ziemi oraz atmosfery rozpoczęła się 15 lipca 2000 r. Satelita CHAMP został wystrzelony na rosyjskiej rakiecie z kosmodromu w Plesecku i umieszczony na prawie kołowej orbicie (kąta nachylenia orbity  $87^\circ$ ) o wysokości 454 km. Misja ta, przewidziana na pięć lat, koordynowana jest przez GeoForschungsZentrum (GFZ) w Poczdamie. CHAMP jest pierwszą z serii aktywnych misji satelitarnych ukierunkowanych na badanie figury Ziemi. Partnerami GFZ w misji CHAMP są: NASA, CNES i Air Force Research Laboratories (AFRL).

Na czele grupy sterującej eksperymentem stoi prof. Christopher Reigber – dyrektor Oddziału 1 GFZ “Kinematyka i Dynamika Ziemi”. Zasadnicze cele misji są następujące:

1. badanie struktury i dynamiki Ziemi, począwszy od jej jądra, poprzez płaszcz do skorupy oraz badanie jej wzajemnych oddziaływań z oceanem i atmosferą;
2. dokładniejsze monitorowanie cyrkulacji oceanicznej, zmian poziomu morza, a także krótkoterminowych zmian równowagi globalnych stosunków wodnych oraz ich oddziaływania na pogodę i klimat;
3. globalne sondowanie warstw neutralnego i zjonizowanego gazu w otoczeniu Ziemi i ich związków z pogodą na Ziemi i w przestrzeni wokółziemskiej;
4. dostarczenie łączne modeli pola grawitacyjnego i pola magnetycznego Ziemi.

Na program naukowy misji CHAMP składa się ponad 100 wybranych we wrześniu 2001 roku projektów zgłoszonych przez 22 kraje w ramach Announcement of Opportunity (Schwintzer P. 2002). Polska nie uczestniczy w programie naukowym misji CHAMP. Aktywnie uczestniczą w nim jednak małe kraje, np. Republika Czeska (dwa własne projekty). Wyniki naukowe misji CHAMP są opracowywane przez dwa ośrodki. GFZ w Poczdamie jest odpowiedzialne za obliczenia orbity i pola grawitacyjnego, pola elektrycznego i magnetycznego oraz radiowe okultacje w neutralnej atmosferze. Okultacje radiowe w jonosferze opracowywane są w DLR-IKN w Neustrelitz. Wyniki naukowe są sklasyfikowane w poziomach od 0 do 4, w zależności od stopnia przetworzenia surowych danych. Poziom 1 różni się od poziomu 0 zaledwie tym, że zawarte w nim dane są zdekodowane. Użytkownikom eksperymentu udostępniane są wyniki z poziomów wyższych. Wśród tych wyników można wymienić przetworzone dane obserwacyjne z odbiornika GPS (szczytowa antena), akcelerometru, sensorów gwiazdowych oraz obu magnetometrów. Poziom 3 zawiera także dane o precyzyjnej orbicie. W najbliższym czasie przewiduje się umieszczenie na poziomie 4 modeli pola grawitacyjnego oraz pola magnetycznego Ziemi otrzymanych z misji CHAMP. Dane z tego poziomu umieszczone są na publicznym serwerze i będą dostępne bez ograniczeń (Schwintzer P. 2002).

Podczas kilkunastu miesięcy trwania misji CHAMP jej uczestnicy i koordynatorzy zdobyli nowe doświadczenia, zgromadzono bogaty materiał obserwacyjny oraz uzyskano interesujące wyniki wstępnych opracowań danych. Potrzeba podsumowania pierwszych wyników misji, zweryfikowania i pełniejszej koordynacji programów badawczych oraz wprowadzenia modyfikacji w dalszej realizacji misji CHAMP była motorem zwołania w styczniu 2002 roku w Poczdamie konferencji naukowo-technicznej pod nazwą “Pierwszego spotkania naukowego misji CHAMP”, w której ramach odbyły się trzy sympozja tematyczne, każde poświęcone jednemu z głównych

przedmiotów badań misji, a mianowicie: “Magnetyzm”, “Pole grawitacyjne Ziemi” i “Atmosfera/Jonosfera”. Interdyscyplinarność poddawanych pod dyskusję problemów badawczych, kompleksowość rozwiązywanych zagadnień naukowych oraz nowatorstwo metod technicznych i naukowych stosowanych w realizacji i opracowywaniu wyników misji CHAMP stały się stymulatorem przygotowania niniejszego artykułu. Zawiera on przegląd najważniejszych zagadnień naukowych poddanych pod dyskusję podczas konferencji oraz wniosków wyciągniętych z dotychczas przeprowadzonych badań. Treść opracowania przedstawiona jest zgodnie z podziałem obrad konferencji na sesje tematyczne.

## 2. BADANIE POLA MAGNETYCZNEGO ZIEMI

Na satelicie CHAMP umieszczony został system magnetometrów, składający się z magnetometru skalarnego (absolutny magnetometr Overhousera), wytworzonego w Laboratoire d’Electronique de Technologie et d’Instrumentation w Grenoble, oraz magnetometru wektorowego (magnetometr Fluxgate), wyprodukowanego w Technical University of Denmark w Lyngby, a także system kamer gwiazdowych, również wyprodukowany w Technical University of Denmark w Lyngby, wykorzystywany do określenia orientacji magnetometru wektorowego (Lühr H. 2002a). Obydwa magnetometry dostarczają danych o rozdzielczości 0.1 nT. Kalibrację magnetometrów wykonano przed rozpoczęciem misji. Procedurę kalibracyjną magnetometru skalarnego przeprowadza się regularnie raz na dobę w trakcie trwania misji, z uwzględnieniem uprzednio wyznaczonych laboratoryjnie zmian kalibracyjnych w skali subdobowej (Rother M. et al. 2002). Na łukach o długości połowy orbity absolutną dokładność wyznaczonego wektora szacuje się na poziomie 2 nT, zaś dokładność różnicową – na poziomie 0.5 nT. Pomiary magnetyczne wykonywane po nocnej stronie Ziemi są znacząco lepsze jakościowo. Są one obarczone mniejszym szumem. Znacznie dokładniejsze jest również określenie orientacji wektora po nocnej stronie, z uwagi na nie zakłócone działanie obu kamer gwiazdowych (po daytimej stronie jedna z kamer jest “oślepią”) (Lühr H. 2002a). Dodatkowym przyrządem umieszczonym na pokładzie satelity CHAMP jest cyfrowy miernik ruchu jonów (DIDM), wyprodukowany przez Air Force Research Laboratories w USA. Aczkolwiek praktyczna sprawność tego miernika odbiega od założeń postawionych przez jego konstruktorów, działa on efektywnie w okresach ekstremalnie wysokiego zagęszczenia plazmy (Cooke D., Roth C. 2002). Opracowana została procedura kalibracji miernika na orbicie. Miernik ten dostarcza obecnie informacji o rozdzielczości 100 m/s przy gęstości  $10^4/cc$ .

Pomiary magnetometryczne dostarczają pełnego pokrycia przestrzennego z powtarzalnością trzydniową. Dokładność wyznaczania pola magnetycznego przez system magnetometrów kształtuje się na poziomie lepszym od 1 nT (Lühr H. 2002a). Do modelowania pola magnetycznego przyjmowane są obserwacje pochodzące z luków orbitalnych po stronie nocnej z okresów spokoju magnetycznego (Lühr H. 2002b). W okresach tych znacznie zmniejszone jest przewodnictwo w warstwie E, co wiąże się z silnym osłabieniem, prawie zanikiem, prądów jonosferycznych. Dotychczas obserwowano nocne prądy generowane w średnich szerokościach jednej półkuli i przechodzące na przeciwną półkulę, których źródło przypisywano niestabilności plazmy w warstwie F. Dane z misji CHAMP wskazują na istnienie również w warstwie F nocnych prądów, które pojawiają się w strefie równikowej w godzinach poprzedzających północ (Lühr H. 2002b). Wyniki uzyskiwane z misji CHAMP w znaczący sposób uzupełniają model struktury i długofalowych zmienności pola magnetycznego generowanego przez jądro Ziemi, uzyskiwany na podstawie danych gromadzonych w ramach innych misji satelitarnych, to jest Ørsted, Ørsted2, Ørsted3, MAGSAT, MAGSAT2, SAC-C, POGO, COSMOS-49, naziemnych pomiarów radarowych EISCAT KST, ESR oraz naziemnych pomiarów magnetometrycznych (Chambodut A. et al. 2002; Holme R. et al. 2002; Hulot G. et al. 2002; Lesur V., Thomson A. 2002; Mozzoni D. et al. 2002; Olsen N. et al. 2002; Paris J., Menvielle M. 2002). Do modelowania pola magnetycznego stosowane są klasyczne metody oparte na reprezentacji pola w postaci funkcji kulistych. W niektórych opracowaniach do opisu pola magnetycznego stosuje się nowsze, bardziej efektywne metody wykorzystujące transformatę *wavelets* (Chambodut A. et al. 2002). Kombinacja danych satelitarnych i naziemnych wiąże się z koniecznością kontynuacji danych w dół (*downward continuation*); wymaga zatem rozwiązania problemu odwrotnego, który jest problemem źle postawionym (*ill posed problem*) (Webers W.A. 2002). Problem ten jest znany w geodezji i występuje przy modelowaniu pola grawitacyjnego Ziemi, a w szczególności przy opracowywaniu grawimetrycznych obserwacji satelitarnych i lotniczych. Wyniki pomiarów magnetycznych umożliwiają poznanie struktury morfologii głównego pola magnetycznego i jego implikacji dla geodynamiki (Jackson A. 2002).

Zaobserwowane zmienności pola magnetycznego uzyskane z misji satelitarnych oraz z analizy danych zgromadzonych przez ostatnie 400 lat potwierdzają konieczność prowadzenia długofalowego, a najlepiej ciągłego monitorowania tego pola. Takie monitorowanie umożliwi wykrywanie i badanie źródeł gwałtownych skoków (*jerks*) w zmianach wiekowych jądra Ziemi (typowa prędkość jądra wynosi 20–30 km/rok), a także poznanie ruchu płynnych mas w górnej warstwie jądra (Jackson A. 2002). Przebadano zmiany wiekowe pola magnetycznego za okres 1980–2000. W szczególności poddano badaniu  *jerk* z 1991 roku. Szczegółowa analiza gwałtownego skoku

w 1970 roku wskazuje wyraźnie na znaczący udział zewnętrznych źródeł w jego powstaniu (Wardinski I., Holme R. 2002). Zaobserwowane skoki w zmianach długości dnia (LOD) mają zadziwiająco podobny przebieg do zarejestrowanych na podstawie pomiarów magnetycznych skoków w zmianach wiekowych jądra (Jackson A. 2002). Stąd wynika, że pomiary magnetyczne mogą być wykorzystywane do prognozowania zmian w parametrach ruchu obrotowego Ziemi.

Głównym źródłem pola magnetycznego Ziemi jest ciekłe jądro, w którym tworzy się mechanizm "Geodynamo". Pole to jest częściowo zakłócanie przez inne źródła, takie jak skorupa ziemska, jonosfera i magnetosfera. Jednym z celów badań magnetycznych w ramach eksperymentu CHAMP jest doskonalenie metod rozdzielania wewnętrznego od zewnętrznego sygnału pola magnetycznego oraz badania indukcji i przewodnictwa. Porównując pomiary wykonane na orbitach o zbliżonych śladach punktów podsatelitowych, można wyeliminować z nich czynnik udziału litosfery (Schwarte J. et al. 2002). Uzyskane wyniki wskazują na liniową zależność pomiędzy wewnętrznymi i zewnętrznymi współczynnikami pierwszego stopnia skończonego modelu pola SHA. Otrzymane współczynniki skalujące różnią się od wielkości publikowanych i wykazują zależność od czasu lokalnego.

Badania prądów indukowanych na podstawie danych magnetometrycznych uzyskanych z misji CHAMP wykonywane są różnymi technikami przez różne grupy badawcze. Do wydzielenia sygnału dla badań indukcji magnetycznej z obserwacji z satelity CHAMP skonstruowano model pola, który obok zasadniczego pola zawiera pole magnetyczne skorupy ziemskiej do rzędu 65 włącznie, a także regularne i burzowe efekty pochodzące od jonosfery i magnetosfery (Korte M. et al. 2002). Opracowano również metodę przestrzenno-czasowej analizy danych magnetycznych satelity CHAMP w aspekcie wyznaczania indukcji elektromagnetycznej wzdłuż orbity (Martinec Z. 2002). Metoda ta oparta jest na rozwiązaniu w dziedzinie czasowej przy użyciu elementów skończonych. Już wyniki badań obserwacji magnetycznych z satelitów MAGSAT i Ørsted wykazały, że możliwe jest wyznaczenie z magnetycznych danych satelitarnych globalnej funkcji przejścia pomiędzy indukowanym polem magnetosferycznym i indukowanym polem wewnętrznym. Kolejnym krokiem w badaniach indukcyjności na podstawie danych satelitarnych jest wydzielenie z nich indukowanego pola magnetycznego pochodzącego od niejednorodności płaszczka Ziemi. Zaproponowana metoda rozwiązania została pomyślnie zweryfikowana z użyciem danych z satelitów Ørsted i CHAMP (Tarits P. 2002). Za ważny, aczkolwiek trudny do rozwiązania problem uznaje się określenie korelacji pomiędzy satelitarnymi i naziemnymi pomiarami magnetycznymi. Przedmiotem intensywnych badań jest również zagadnienie pulsacji magnetycznej, to jest efektów wzajemnej magnetyzacji powierzchni Ziemi i jonosfery. Zmiany pola magnetycznego na powierzchni Ziemi pochodzące od



źródeł zewnętrznych mogą być wyjaśnione poprzez system nie rozproszonych prądów na poziomie jonosfery. Taki system prądów możliwy jest do śledzenia za pomocą naziemnej sieci (*array*) magnetometrów. Przykładem takiej sieci jest sieć IMAGE. Jest ona rozciągnięta w postaci łańcucha południkowego o długości 2000 km (60–80° N, 10–30° E) (Viljanen A. et al. 2002) i daje znakomite wyniki w monitorowaniu strumieni elektrycznych w strefie auroralnej, w której prądy silnie zależą od zmian w kierunku i natężeniu międzyplanetarnego pola magnetycznego (Vennerstroem S. et al. 2002).

W badaniach właściwości elektrodynamicznych jonosfery istotną rolę odgrywa śledzenie prądów (FAC) biegnących równolegle do linii pola magnetycznego Ziemi pomiędzy jonosferą i magnetosferą. W modelowaniu tych prądów istotną rolę odgrywają magnetyczne pomiary satelitarne wspierane przez pomiary naziemne. Dane z misji CHAMP zostały wykorzystane do stworzenia kilku modeli tych prądów, na przykład modelu opartego na hipotezie, iż prądy te układają się w płaskich warstwach (Cerisier J.C., Marchaudon A. 2002) lub modelu parametrycznego z wyraźnym zróżnicowaniem rejonów geograficznych (Christiansen F. et al. 2002). Przepływ jonów od jonosfery do magnetosfery oddziałuje na kompozycję magnetosfery oraz na zachodzące w niej procesy elektrodynamiczne podczas burz magnetycznych. Ten przepływ jonów ma znaczący wpływ na parametry modelu jonosfery. Do określenia wieloskalowej aproksymacji rozkładu prądów pionowych (FAC) na wysokości satelity CHAMP zastosowano wektorową reprezentację wavelets pola magnetycznego Ziemi (Mayer C., Maier T. 2002). Zaprezentowana metoda jest praktyczna i efektywna. Przeprowadzone zostały badania symulacyjne prądów elektrycznych dla wysokości satelity CHAMP w różnych szerokościach geograficznych dla obu półkul (Maute A. et al. 2002). W dalszych badaniach wykorzystano dane magnetyczne z misji CHAMP. Przeprowadzono analizę prądów jonosferycznych Halla w rejonie równikowym (McCreadie H. et al. 2002) oraz w rejonach polarnych (Ritter P. et al. 2002; Stampe A.M. et al. 2002). Uzyskane wyniki wykazały dobrą zgodność z wynikami obserwacji naziemnych, w szczególności z danymi z sieci magnetometrów IMAGE. Analizy danych z misji CHAMP i satelity Ørsted potwierdziły, iż w jonosferze okołobiegunowej prądy istnieją nawet w spokojnych warunkach geomagnetycznych (Stampe A.M. et al. 2002). Wykorzystując dane z satelity Ørsted oraz magnetometryczne dane ze stacji naziemnych w Grenlandii, badano relacje pomiędzy prądami FAC i Halla (Watermann J. et al. 2002). Zgodności uzyskano jedynie w przypadkach, dla których przyjęto realistyczne stosunki przewodnictwa. Oczekuje się, że dane z misji CHAMP umożliwią poprawniejsze wyznaczenie tych relacji. Kompleksowe badanie dynamiki zjawisk elektromagnetycznych na wysokości satelity oraz ich oddziaływanie na warstwy sąsiednie umożliwia kombinacja obserwacji z magnetometru

wektorowego oraz z cyfrowego miernika ruchu jonów z satelity CHAMP (Liu H. et al. 2002).

Dane magnetyczne uzyskane z misji CHAMP przyczyniają się do rozszerzenia poznanego pasma spektrum anomalii. Dotychczasowe misje satelitarne dedykowane badaniu pola magnetycznego umożliwiły wyznaczenie długofalowych anomalii tego pola. Anomalie te są spowodowane licznymi wielkoskalowymi tworami geologicznymi (Ravat D. 2002). Zestawienie anomalii skalarnych otrzymanych na podstawie dotychczasowych danych z misji CHAMP wskazuje wyraźnie na istnienie strefy TT, dla której wyróżnia się wewnętrzny sygnał magnetyczny skorupy ziemskiej (Lühr H. 2002b). Zebrane dane potwierdzają, iż najsilniejsze zakłócenia pola magnetycznego występują w rejonie równikowym. Najbardziej zmienne w czasie pole magnetyczne znajduje się w równikowej strefie Atlantyku i wynika z niestabilności w warstwie F. Wskazano na znaczenie badania litosferycznego pola magnetycznego. Odpowiednia analiza danych magnetycznych pola litosferycznego stanowi cenne źródło informacji o strukturach geologicznych oraz dostarcza parametrów o litosferze ziemskiej istotnych dla geologii i geofizyki (Ravat D. 2002). Duże znaczenie przypisuje się modelowaniu pola litosferycznego. Dane satelitarne z misji CHAMP skutecznie wypełniają lukę w mapach anomalii magnetycznych, do tworzenia których wykorzystywano pomiary naziemne i lotnicze oraz obserwacje z satelitów na wysokich orbitach (Kim H.R. et al. 2002). Mapy pola magnetycznego wykonuje się na podstawie globalnych anomalii litosferycznych po wprowadzeniu poprawek wiekowych oraz poprawek z tytułu wpływu magnetosfery i jonosfery do obserwacji satelitarnych. Różnice pomiędzy mapami wynikają głównie ze sposobu ich opracowania, użytych algorytmów i doboru okresów spokojnego pola magnetycznego. Przykładowo, wykonano mapy anomalii natężenia pola na wysokości 450 km, stosując różne techniki ich opracowania (Hemant K., Maus S. 2002). Duże różnice pomiędzy modelami wynikły z różnych sposobów określania wpływu magnetosfery i jonosfery. Podobne mapy natężenia anomalii, a także składowej pionowej pola magnetycznego, wykonano na podstawie skalarnych i wektorowych obserwacji magnetycznych z okresu 18 miesięcy trwania misji CHAMP (Maus S. et al. 2002). W obszarach silnego sygnału litosferycznego wystąpiła zgodność z odpowiednimi mapami opracowanymi na podstawie materiału obserwacyjnego z satelitów MAGSAT i POGO. Największe różnice obserwuje się w obszarach młodej skorupy, gdzie sygnał litosferyczny jest słaby. Szczególnie trudny do interpretacji jest teren Afryki. Obserwowane tam anomalie nie dają się wyjaśnić wyłącznie jako wynik indukowanej magnetyzacji i zmiennej głębokości Curie. Model pola litosferycznego wyznaczony z misji CHAMP w powiązaniu z naziemnymi danymi geologicznymi i geofizycznymi może służyć do poprawienia istniejących modeli globalnych temperatury skorupy ziemskiej, zmian geologicznych oraz

wytrzymałości litosfery (Purucker M. et al. 2002). Interesującym obiektem badawczym jest Kurska Anomalia Magnetyczna. Anomalia ta została wyraźnie zaobserwowana na podstawie danych z satelity MAGSAT. Lepsze wyniki opisu pola magnetycznego skorupy ziemskiej uzyskano z danych satelity Ørsted, który dostarczył obserwacje o lepszym stosunku sygnału do szumu. Zgodnie z przewidywaniami dobre rozwiązanie dla Kurskiej Anomalii Magnetycznej uzyskano na podstawie danych z misji CHAMP. Rozwiązania z trzech satelitów na różniących się wysokościach posłużyły do bezpośredniego wyznaczenia gradientów pola magnetycznego tej anomalii (Taylor P.T. et al. 2002). Rejonem, któremu zazwyczaj w badaniach magnetycznych poświęca się szczególną uwagę jest rejon polarny. W modelach pól anomalnych, opracowanych na podstawie danych z misji CHAMP, Ørsted i MAGSAT dla obszaru Antarktydy, uzyskano zadowalającą zgodność w wyrazach, począwszy od 13 stopnia i rzędu. Składowe o dłuższych falach zakłócone są błędami pochodzącymi od redukcji pola jądra Ziemi, w których nie uwzględniono efektów magnetycznych skorupy ziemskiej. W celu rozwiązania problemu utworzono model skorupy ziemskiej dla Antarktydy przy wykorzystaniu grawimetrycznych anomalii wolnopowietrznych oraz rzeźby terenu. Efekty pseudomagnetyczne oszacowane z tego modelu wskazują na istnienie znacznego udziału anomalii w skorupie ziemskiej w składowych długofalowych satelitarnych obserwacji magnetycznych (von Frese R.R.B. et al. 2002b). Stosowanie tak określanych anomalii magnetycznych do tworzenia map magnetyzacji litosferycznej w rejonie Antarktydy wymaga zatem dużej dozy ostrożności.

Zasadniczym problemem w opracowywaniu danych magnetycznych jest rozdzielenie pola wewnętrznego od pola zewnętrznego. Wśród metod stosowanych do rozdzielenia pól, do najczęściej stosowanych należą FFT, transformata wavelets, modelowanie z użyciem harmonik sferycznych (Korte M. et al. 2002) oraz algorytmy oparte na kontynuacji w górę i w dół (Maier T., Mayer C. 2002). Zalecane jest stosowanie różnych technik badawczych oraz używanie dobrze wyczyszczonych danych. Istotną rolę w badaniach pola magnetycznego odgrywają dane aero-magnetyczne. Spektrum tych danych jest rozdzielne ze spektrum danych satelitarnych. Badania elektromagnetyczne odgrywają znaczną rolę w śledzeniu ruchów tektonicznych.

Z rosnącą częstością sygnalizowana jest potrzeba łącznych badań pola magnetycznego i pola siły ciężkości. Za główne źródło wiekowych zmian pola grawitacyjnego Ziemi uważa się powszechnie zmiany natury hydrologicznej. Obserwuje się jednak pewne wspólne cechy pomiędzy zachowaniem pola grawitacyjnego i pola magnetycznego Ziemi. W procesie łącznej analizy danych magnetycznych i grawitacyjnych, na przykład przy użyciu relacji Poissona, wskazane jest zachowanie pewnej ostrożności. Pole grawitacyjne jest mianowicie generowane nie tylko przez litosferę, ale i przez płaszcz Ziemi.

Przewodność pola litosferycznego oraz jego magnetyzacja są dodatkowo źródłem krótkofalowych zmian wiekowych. Zarysowuje się również potrzeba badania zależności pomiędzy prądami jonosferycznymi i magnetosferycznymi.

Kolejna dyskusja na temat analizy satelitarnych danych magnetycznych na podstawie obserwacji minikonstelacji satelitów Ørsted, CHAMP, SAC-C odbędzie się w ramach wirtualnej sesji AGU poprzez stronę internetową: [www.dsri.dk/multimagsatellites](http://www.dsri.dk/multimagsatellites). W trakcie sympozjum podano także informację o Ørsted International Science Team Conference, która odbędzie się w dniach 23–27 września 2002 roku w Kopenhadze. Konferencja ta poświęcona będzie analizie obserwacji magnetycznych i modelowaniu pola magnetycznego Ziemi oraz sondowaniu atmosfery i jonosfery przy użyciu techniki GPS. Dane o konferencji zamieszczone są na stronie: [www.oersted.dk/meetings](http://www.oersted.dk/meetings).

### 3. BADANIE POLA GRAWITACYJNEGO ZIEMI

W skład aparatury przeznaczonej do modelowania pola grawitacyjnego Ziemi w eksperymencie CHAMP wchodzi odbiornik GPS typu BlackJack, elektrostatyczny 3-osiowy akcelerometr STAR pracujący na częstotliwości 0.1 Hz oraz system 4 retroreflektorów laserowych. W wyniku krytycznej analizy doświadczeń zgromadzonych w pierwszych 18 miesiącach trwania misji zarysowały się konkretne propozycje modyfikacji w oprogramowaniu odbiornika GPS i akcelerometru. Zmodyfikowane oprogramowanie przyczyni się do poprawienia wyników uzyskiwanych w dalszych etapach misji CHAMP (Grunwaldt L., Meehan T. 2002).

Dwuczęstotliwościowy, samoinicjalizujący się 48-kanałowy odbiornik GPS typu BlackJack, wykonany w JPL, zaopatrzonego w 4 anteny, rejestruje obserwacje kodowe i fazowe z częstością 50 Hz. Z taką częstością uzyskiwane jest rozwiązanie nawigacyjne w czasie rzeczywistym. Dokładność tego rozwiązania wynosi 5 m w pozycji i 0.5 mm/s w prędkości. Również w czasie rzeczywistym uzyskuje się orientację na poziomie dokładności 5° (Yunck T.P. 2002). Odbiornik BlackJack służy do kinematycznego wyznaczenia orbity satelity CHAMP oraz do badania troposfery i niskich warstw jonosfery poprzez śledzenie satelitów GPS wzdłuż trajektorii o silnym zakrzywieniu, przebiegających w pobliżu powierzchni Ziemi (okultacje). Precyzyjne obserwacje fazowe umożliwiają wyznaczenie pozycji satelity na orbicie z dokładnością 5 cm oraz orientacji z dokładnością 0.1°. Dokładność orientacji w oparciu o system kamer gwiazdowych kształtuje się na poziomie 2–10 sekund łuku (Yunck T.P. 2002). Satelita CHAMP, aczkolwiek bardzo niski (od 450 km nad powierzchnią Ziemi na początku trwania misji do 250 km w końcowej fazie misji), obserwowany jest przez 30 stacji laserowych. Stacja

w Borowcu znajduje się w czołówce stacji śledzących satelitę CHAMP (Grunwaldt L., Meehan T. 2002). Wyróżnia się ona liczbą udanych obserwacji. Dokładność obserwacji laserowych osiąga poziom kilku milimetrów. Prowadzenie obserwacji laserowych satelity CHAMP wymaga przygotowywania precyzyjnych efemeryd. Efemerydy takie opracowywane są w procesie automatycznym na podstawie nawigacyjnego rozwiązania uzyskiwanego z odbiornika GPS na pokładzie satelity CHAMP oraz obserwacje laserowe ze stacji sieci ILRS (Schmidt R. et al. 2002). Podczas 18 miesięcy trwania misji CHAMP zgromadzono wiele tysięcy obserwacji GPS odbitych od powierzchni Ziemi. Obserwacje te mogą zostać wykorzystane podobnie jak obserwacje altimetryczne. Możliwość zastosowania tych obserwacji do badania pola grawitacyjnego Ziemi, na podstawie danych symulowanych, stanowi obecnie przedmiot badań (Wagner C.A. et al. 2002).

Akcelerometr STAR, wykonany przez firmę ONERA pod patronatem CNES, przeznaczony jest do pomiaru niegrawitacyjnych przyspieszeń oddziałujących na satelitę CHAMP, na przykład oporu powietrza, bezpośredniego i odbitego ciśnienia światła. Przyspieszenia te muszą być oddzielone od rejestrowanych również przyspieszeń grawitacyjnych. Niegrawitacyjne przyspieszenia wykorzystywane są do precyzyjnego wyznaczania orbity oraz do modelowania pola grawitacyjnego Ziemi. Służą one również do modelowania niezachowawczych sił działających na satelitę, na przykład zjawisk termosferycznych takich jak docierające do Ziemi erupcje gazów ze Słońca (König R, Neumayer K.H. 2002). Wyznaczenie parametrów kalibracyjnych akcelerometru STAR (systematyczne przesunięcie i współczynnik skalujący) stwarza od początku trwania misji poważne trudności (Kang Z. et al. 2002). Parametry te nie mogły być wyznaczone przed misją; muszą one być zatem wyznaczone z danych gromadzonych na orbicie. Sygnały uzyskiwane z akcelerometru posiadają, wbrew oczekiwaniom, wiele skoków, nieciągłości i dryftów. Przejawiają one również zależność od temperatury (Perret A. et al. 2002). Problemy związane są w szczególności z wyznaczeniem współczynnika skalującego, który wykazuje tendencję do zmienności w czasie. Stąd opóźnienia w wykorzystywaniu danych z akcelerometru. Dla użytkowników eksperymentu udostępnione będą jedynie poprawione dane obserwacyjne z akcelerometru. Podczas wstępnego opracowania tych danych przeprowadza się wnikliwą analizę szumów, zakłóceń, przerw w rejestracji i innych nieregularności oraz usuwa się odstające obserwacje. Uwzględnia się także wpływ siły Lorenza, która jest wynikiem wzajemnego oddziaływania naładowanej elektrycznie masy testowej z polem magnetycznym Ziemi, na skutek ruchu satelity. W tym celu wykorzystuje się wiele różnych danych, łącznie z danymi magnetometrycznymi oraz danymi orbitalnymi (Förste C. 2002). Do wyznaczenia parametrów kalibracyjnych akcelerometru można wykorzystać

dodatkowo obserwacje z systemu czujników gwiazdowych, które służą do kontroli orientacji satelity (Förste C. 2002; Oberndorfer H., Müller J. 2002). Łączne opracowanie w dziedzinie częstotliwości z użyciem filtru Kalmana danych z akcelerometru wraz z danymi z czujników gwiazdowych umożliwia wyznaczenie parametrów kalibracyjnych akcelerometru i jednocześnie obniżenie szumu pomiarów z czujników gwiazdowych.

Przebadany został problem usytuowania środków anten GPS na satelicie CHAMP względem środka masy satelity (Shi C. et al. 2002). Porównanie wyników pomiarów GPS z pomiarami laserowymi wykazało istnienie błędu systematycznego o wielkości kilku centymetrów. W celu śledzenia satelity CHAMP założono naziemną sieć stacji śledzących GPS – High-Rate/Low Latency (Galas R. et al. 2002). Sieć ta obsługiwana jest przez GFZ i JPL. Dane w systemie tej sieci są w czasie prawie rzeczywistym przesyłane do centrali, archiwizowane, wstępnie przetwarzane i poddawane ocenie jakościowej. Dane GPS ze stacji naziemnych oraz z satelity CHAMP zbierane są w trybie automatycznym przez GFZ. Następnie są one wstępnie przetwarzane przy użyciu systemu OG w ośrodku Oberpfaffenhofen w Niemczech (Baustert G, Galas R. 2002). Monitorowana jest poprawka zegara odbiornika BlackJack w stosunku do skali czasu GPS. Nieuwzględnienie tej poprawki powoduje błąd pozycji satelity rzędu 7 mm (Grunwaldt L. Meehan T. 2002). Obliczenia orbity satelity CHAMP prowadzone są przez różne centra analiz i ośrodki badawcze, różnymi technikami, od czysto geometrycznych do w pełni dynamicznych, i przy wykorzystaniu różnych typów danych. Autorzy użytych technik korzystali w dużym stopniu z doświadczeń obliczania orbit satelitów TOPEX/Poseidon i SAC-C, na których pokładzie znajdowały się odbiorniki GPS (Yunck T.P. 2002). Precyzyjne kinematyczne wyznaczenie orbity, mniej dokładne od dynamicznego, dostarcza rozwiązania z błędem na poziomie 15–50 cm, w zależności od wykorzystywanych danych, metod obliczeniowych oraz liczby satelitów. Istotną rolę w jakości kinematycznej orbity odgrywa skrupulatność wstępnego przetworzenia materiału obserwacyjnego (Bisnath S.B., Langley R.L. 2002). Obserwacje niskiej jakości, wykonane nisko nad horyzontem, cechują się obniżonym stosunkiem sygnału do szumu i mogą znacząco pogarszać dokładność wyznaczonej pozycji. Zalecane jest zatem stosowanie odpowiedniej wstępnej selekcji obserwacji. Rozwiązanie oparte na potrójnych różnicach obserwacji fazowych z wykorzystaniem dekorelującego algorytmu dostarcza orbity z dokładnością 25–40 cm, w zależności od ilości satelitów oraz konfiguracji układów stacja naziemna – satelita CHAMP (Grejner-Brzezinska D. et al. 2002). Kinematyczne rozwiązanie orbity uzyskano w oparciu o podwójne różnice na podstawie obserwacji ze stacji naziemnych i z satelity CHAMP, z wyznaczeniem całkowitych wartości dla nieoznaczoności, przy użyciu procedury podobnej do stosowanej do opracowania obserwacji GPS w ramach

IGS (Švehla D, Rothacher M. 2002). W pierwszym kroku obliczane są nieoznaczoności dla sygnału *wide-lane*, przy wykorzystaniu kombinacji Melbourne-Wübbena obserwacji kodowych i fazowych. Użycie tej procedury możliwe jest dzięki temu, że zarówno odbiorniki GPS na stacjach śledzących, jak i na satelicie CHAMP są odbiornikami z kodem P. Dalszym posunięciem jest obliczenie nieoznaczoności dla sygnału *narrow-lane* przy wykorzystaniu liniowych kombinacji *inosphere-free*. Dokładniejsze niż otrzymywane metodami kinematycznymi wyniki wyznaczenia orbit uzyskuje się, stosując metody dynamiczne. Uwzględnienie obserwacji z akcelerometru STAR podwyższa dokładność dynamicznie wyznaczonej orbity (Loyer S. et al. 2002). Kombinacja metody kinematycznej z dynamiczną dostarcza orbity satelity CHAMP z dokładnością na poziomie pojedynczych centymetrów. Jedną z realizacji takiej kombinacji zapewnia Multisatellite Orbit Determination Program opracowany na uniwersytecie w Teksasie (Rim H. et al. 2002). Dokładność orbity satelity CHAMP obliczona tym programem wynosi około 10 cm. Praktyczna metoda kombinowana, opracowana na uniwersytecie w Bernie, jest metodą dwustopniową (Bock H. et al. 2002). W pierwszym kroku wyznacza się dyskretną orbitę na podstawie kodowych i fazowych obserwacji GPS, a następnie, traktując pozycje kinematyczne jako pseudoobserwacje, wyrównuje się orbitę dynamiczną z uwzględnieniem danych z akcelerometru. Podobne podejście, przy użyciu programu GEODYN, prowadzi do wyznaczenia orbity z dokładnością kilku centymetrów (Lemoine F.G. et al. 2002). Nie odbiegające od poprzednich jakością wyniki uzyskano z rozwiązywania kombinowanego za pomocą programu EPOS-OC, opracowanego w GFZ (Neumayer K.H. et al. 2002). Program ten umożliwia także zarówno niezależne, czysto kinematyczne wyznaczenie orbity, jak i czysto dynamiczne. Na wybór strategii obliczeń orbity satelity CHAMP mogą mieć wpływ wyniki analizy różnych kombinacji danych (Zhu S. et al. 2002). Obok predykcji i precyzyjnego liczenia orbity satelity CHAMP wyznaczana jest również szybka orbita satelity, jako narzędzie do analiz sondowania atmosfery (Michalak G. et al. 2002). Jest ona dostępna z opóźnieniem 16 h i z dokładnością 12 cm (szybkie orbity satelitów GPS są dostępne po 15 h z dokładnością 10 cm). Oczekuje się, iż do połowy 2002 roku zostanie opracowana jednolita procedura wyznaczania precyzyjnej orbity satelity CHAMP, z opóźnieniem nie większym niż praktykowane w służbie IGS (Boomkamp H. 2002). Znajdzie ona także zastosowanie w wyznaczaniu orbit dla niskich satelitów, takich jak SAC-C, oraz satelitów w przyszłych misjach kosmicznych, na przykład Jason, GRACE.

Misja CHAMP, z uwagi na rodzaj i charakter dostarczanych przez nią danych, stanowi początek nowej ery w modelowaniu pola grawitacyjnego Ziemi. Obserwacje gromadzone podczas misji CHAMP umożliwiają poprawienie modelu geopotencjału w paśmie długofalowym. Ocenę tej poprawy można przeprowadzić na podstawie analizy geoidy stowarzyszonej

z modelami geopotencjału. Wyniki uzyskane na podstawie porównania geoidy satelitarno-niwelacyjnej określonej na 245 stacjach w Skandynawii z geoidą otrzymaną z modeli OSU91A, EGM96, EGG97, NKG96 oraz FIN2000, a konkretnie określenie zależności uzyskanych różnic od odległości, wskazują na istnienie sygnałów geoidy nie znajdujących odbicia w modelach geopotencjału (Bilker M. et al. 2002). Dalsze badania z wykorzystaniem modelu geoidy z misji CHAMP dostarczą informacji o wkładzie danych z tej misji do poprawienia modelu geopotencjału oraz pozwolą na niezależną prognozę dalszej poprawy modelu geopotencjału w wyniku uwzględnienia danych z misji satelitarnych GRACE i GOCE. W pracach badawczych nad modelowaniem pola grawitacyjnego, na podstawie obserwacji z misji CHAMP, obok sprawdzonych już metod, wprowadzane są oryginalne, nowatorskie rozwiązania. Wśród nich można wymienić metodę modelowania pola grawitacyjnego za pomocą harmonicznych funkcji sklepanych (*spline*) w połączeniu z regularyzacją Tikhonova i z wykorzystaniem szybkiej techniki multipolowej (Glockner O. 2002) oraz modelowania przy użyciu elipsoidalnych funkcji harmonicznych (Reubelt T. et al. 2002). Niemal ciągłe śledzenie orbity poprzez obserwacje GPS, wspierane obserwacjami akcelerometru, po raz pierwszy w historii stwarza możliwość pełnego wykorzystania zasady zachowania energii do modelowania pola grawitacyjnego. Co więcej, dane z misji CHAMP mogą być bezpośrednio użyte do wyznaczenia geoidy na wysokości satelity, bez potrzeby korzystania z modelowania z zastosowaniem funkcji kulistych. W jednej z przedstawionych metod dane obserwacyjne są w pierwszym kroku sprowadzane do stałej wysokości, co powoduje, że utworzona macierz równań normalnych ma strukturę blokowo diagonalną, a zatem łatwą do odwrócenia. W metodzie tej wykorzystana jest koncepcja zaproponowana do opracowywania obserwacji satelity z satelity (L-L) (Kryński J. 1981). Rozwiązanie układu równań prowadzi do wyznaczenia współczynników harmonik modelu pola grawitacyjnego oraz globalnego modelu geoidy (Gerlach G. et al. 2002). Model otrzymany na podstawie pierwszych danych z misji CHAMP jest bliski modelowi GRIM5, zaś błąd wyznaczonej z niego geoidy oszacowany jest na poziomie 1 m. Model pola grawitacyjnego otrzymany z kinematycznie wyznaczonej orbity nie jest obciążony niedoskonałością dotychczasowej znajomości tego pola. Już pierwszy okres trwania eksperymentu CHAMP zaowocował opracowaniem kilku nowych, poprawionych modeli geopotencjału (Reigber Ch. et al. 2002b). Oceny jakości nowych modeli można dokonać poprzez porównywanie obliczanych na ich podstawie orbit satelity CHAMP i innych satelitów z kinematycznie wyznaczanymi orbitami, porównywanie z innymi modelami pola grawitacyjnego i geoidy (Tapley B. et al. 2002), analizę residuów oraz powtarzalności obserwacji (Moore P. et al. 2002), analizę propagacji błędów, na przykład przy użyciu trójwymiarowej transformacji macierzy kowariancji



przeprowadzającej pseudoobserwacje (orbita kinematyczna) w parametry pola grawitacyjnego Ziemi (współczynniki harmonik kulistych lub elipsoidalnych) (Marinkovic P., Grafarend E.W. 2002). Zaproponowano metodę badania jakości modelu pola grawitacyjnego Ziemi z użyciem obserwacji misji CHAMP (wektor stanu i dane akcelerometru) poprzez porównanie geoidy wyznaczonej na wysokości satelity przy wykorzystaniu zasady zachowania energii z geoidą obliczoną na podstawie istniejącego modelu geopotencjału. Analiza różnic w wysokości geoidy uzyskanych na podstawie obserwacji z okresu 6 dni wykazała zmienność o charakterze liniowej funkcji czasu. Przyczyną otrzymanej zmienności może być błąd systematyczny w danych z akcelerometru (Ditlevsen E.H., Tscherning C.C. 2002). W modelach geopotencjału wyznaczonych na podstawie danych z misji CHAMP widoczna jest poprawa w porównaniu z dotychczasowymi modelami, w szczególności w rejonie Antarktyki, gdzie wykryto występowanie w poprzednich modelach systematycznego błędu regionalnego rzędu 5 mGal (von Frese R.R.B. et al. 2002). W trakcie analiz danych z misji CHAMP stwierdzono również wysoką czułość tych danych na harmoniki nieparzystego stopnia. Dane GPS SST wraz z danymi z akcelerometru, zgromadzone podczas pierwszych 12 miesięcy trwania eksperymentu CHAMP, zgrupowane w 63 zbiorach na łukach orbity od 1 do 1.5 doby (łącznie 88 dni), wykorzystano do utworzenia nowego globalnego modelu geopotencjału EIGEN-1S (Reigber Ch. et al. 2002a). Jako wyjściowego użyto modelu geopotencjału GRIM 5. Zastosowano algorytm regularyzacji oraz użyto odpowiednio dobranych współczynników wagowych. W równaniach obserwacyjnych uwzględnione zostały zmiany w czasie pola grawitacyjnego Ziemi. Model EIGEN-1S jest kompletny do stopnia i rzędu 120 (z wyrazami rezonansowymi do 119 stopnia i 111 rzędu) i cechuje się wyraźnie poprawniejszym, w porównaniu z poprzednimi modelami, wyznaczeniem harmonik niskiego rzędu. Dla współczynników powyżej stopnia 70 obserwuje się wyraźną nieregularność w zachowaniu widma mocy. Zjawisko to w pełni tłumaczy się zmniejszającą się czułością orbity na pole grawitacyjne na obecnej wysokości satelity (Reigber Ch. et al. 2002a). Szczegółowe uwzględnienie wyrazów rezonansowych w perturbacjach orbity satelity CHAMP stanowi dodatkowe źródło poprawienia parametrów modelu geopotencjału, wyznaczanego z danych z tej misji (Gooding R.H. et al. 2002). Oczekuje się, że nowy model geopotencjału będzie efektywnym narzędziem w rozwiązywaniu podstawowych problemów oceanograficznych. W badaniach cyrkulacji i transportu mas oceanicznych zasadniczą rolę odgrywa dokładny globalny model oceaniczny. Do utworzenia takiego modelu niezbędne są, obok precyzyjnych danych altimetrycznych, dokładne wysokości geoidy. Dotychczasowe modele geoidy umożliwiają prowadzenie efektywnych badań oceanograficznych zaledwie na kilku ograniczonych obszarach oceanicznych. Modele geoidy uzyskane z misji CHAMP, i w najbliższej przyszłości z misji

GRACE i GOCE, w znaczący sposób rozszerzą zakres badań oceanografii fizycznej (Seufer et al. 2002).

Nowy model geopotencjału stanowi dobry punkt wyjścia do tworzenia dokładnych regionalnych modeli pola grawitacyjnego Ziemi. Wśród problemów towarzyszących wyznaczaniu globalnego modelu geopotencjału do najważniejszych zaliczają się: luki w pokryciu danymi, modelowanie w celu ujednoczenia rozkładu danych, potrzeba jednolitej regularyzacji danych, kombinacja z różnorodnymi danymi naziemnymi, problemy obliczeniowe wynikające z ogromnej liczby danych i parametrów do wyznaczenia (Ilk K.H. 2002). Wyznaczaniu regionalnego modelu pola grawitacyjnego towarzyszą następujące problemy: kwestie wynikające z ograniczenia powierzchni pochodzenia danych (*truncation*), niekompletność spektralna danych, stabilność rozwiązania, tworzenie modelu globalnego poprzez łączenie rozwiązań regionalnych (Ilk K.H. 2002). Do wyznaczenia regionalnego modelu pola grawitacyjnego proponowane jest użycie następującej procedury:

- analiza rozwiązania globalnego w regionie;
- regionalna reprezentacja pola grawitacyjnego przy użyciu lokalnie wspomaganych funkcji bazowych;
- stworzenie modelu obserwacyjnego;
- kontynuacja w dół i regularyzacja;
- rozwiązanie równań normalnych;
- opracowanie zregularyzowanego rozwiązania;
- opracowanie kombinacji danych naziemnych i satelitarnych (Ilk K.H. 2002).

Konkretne kroki czynione są w kierunku wykorzystania wyników misji CHAMP do tworzenia regionalnego modelu pola grawitacyjnego Ziemi dla Europy. Przy tworzeniu modelu, obok danych z misji CHAMP, przewiduje się wykorzystanie dostępnych danych grawimetrycznych, danych o topografii terenu oraz wysokości geoidy wyznaczonych z obserwacji GPS na punktach niwelacji precyzyjnej. Porównanie i ocena poszczególnych zbiorów danych mogą być wykonane zarówno w dziedzinie przestrzennej, jak i w dziedzinie częstotliwości (transformata wavelets). Proponowana jest również metoda łącznego opracowania obserwacji naziemnych i globalnych satelitarnych wraz z oceną dokładności (Denker H., Roland M. 2002).

Materiał obserwacyjny zgromadzony już w pierwszej fazie eksperymentu CHAMP umożliwia określenie zmienności w czasie pola grawitacyjnego Ziemi. Istotną rolę w tych badaniach odgrywa zrozumienie dynamiki prądów powierzchniowych oraz interakcji sztywnej Ziemi z oceanami i atmosferą, a także procesów zachodzących w wodach kontynentalnych (Gegout P., Lemoine J.M. 2002). Przemieszczanie mas lodowcowych, lepkość, ruch obrotowy, interakcja skorupy i płaszcz Ziemi

powinny być również wzięte pod uwagę. Uwzględnienie zmian w rozkładzie mas, wywołanych przez atmosferę i oceany, wymaga zastosowania modeli dynamiki atmosfery i oceanów do wydzielenia tych efektów z obserwacji satelitarnych. Dynamika atmosfery odpowiada maszynie termicznej. Dominującą jej strukturą jest struktura pionowa, z uwzględnieniem specyfiki geograficznej (struktura konwekcyjna – w strefie równikowej, reżim turbulencji – w strefie umiarkowanej, specyficzna struktura – w strefie biegunowej) oraz wyraźnymi granicami pomiędzy regionami szerokościowymi oraz granicą wyznaczoną przez powierzchnię Ziemi. Zmiany rejestrowane w niskich harmonikach (2.0 ....) są wynikiem procesów zachodzących w otoczeniu powierzchni Ziemi. Należą do nich głównie izostatyczne procesy postglacjalne oraz współczesne zmiany mas lodowych kontynentów i obszarów (Gegout P., Lemoine J.M. 2002). Rozdzielenie tych dwóch efektów będzie możliwe przy użyciu danych z obecnej misji CHAMP oraz rozpoczętej 17 marca 2002 roku misji GRACE. Zmiany w wyższych harmonikach (do 30 stopnia) obrazują deformacje w płaszczu Ziemi wywołane konwekcją (Vermeersen B. et al. 2002). Satelitarne misje grawitacyjne umożliwią znacznie dokładniejsze wyznaczenie liczb Love'a. Zmienność harmoniki  $c_{20}$ , określona 10 lat temu z obserwacji laserowych satelity LAGEOS, wyniosła około  $5 \times 10^{-10}$ . Ta zmiana wiekowa jest skorelowana z naciskiem atmosfery, który podlega zmianom o wyższej częstotliwości, a także zmianom rocznym oraz 18-letnim zmianom pływowym. Dane z satelitarnych misji grawimetrycznych umożliwią predykcję El-Niño oraz określenie krótkookresowych zmienności pola grawitacyjnego Ziemi (Gegout P., Lemoine J.M. 2002). Zmiany pola grawitacyjnego Ziemi, które dają się wyznaczyć z misji CHAMP, są skorelowane ze zmianami w ruchu obrotowym Ziemi. Niezależne pomiary nieregularności ruchu obrotowego Ziemi mogą zatem znaleźć zastosowanie do oceny wyznaczonych z misji CHAMP zmienności w czasie współczynników harmonik niższych stopni, po usunięciu efektów wiatru i prądów morskich (Gross R.S. 2002).

#### 4. BADANIE ATMOSFERY I JONOSFERY

Sondowanie atmosfery i jonosfery w misji CHAMP przeprowadzane jest przy wykorzystaniu pomiarów okultacji radiowych techniką GPS. Pomiary okultacji radiowych, w celu profilowania atmosfery i jonosfery, zapoczątkowano w eksperymencie Ørsted. Na satelicie Ørsted zainstalowany jest odbiornik Turbo Rogue, przeznaczony do śledzenia satelitów GPS. Kolejnymi satelitami zaopatrzonymi w odbiorniki GPS i dostarczającymi obserwacji okultacji radiowych są satelity SAC-C i GPS/MET. Techniki opracowania obserwacji okultacji radiowych, używane do danych z eksperymentów Ørsted i SAC-C, zostały przystosowane do opracowania danych z misji CHAMP

(Larsen G.B. et al. 2002). Od rozpoczęcia eksperymentu z radiowymi okultacjami GPS misji CHAMP, to jest od 11 lutego 2001 roku do 22 stycznia 2002 roku zarejestrowano 36600 okultacji radiowych. Już wstępne analizy wykazały, że odbiornik GPS na pokładzie satelity CHAMP, podobnie jak instalacja i charakterystyki anten, umożliwiają globalne sondowanie atmosfery z dużą dokładnością i dużą rozdzielczością w wysokości (Wickert J. et al. 2002a). Udział sygnałów odbitych od powierzchni Ziemi w zaobserwowanych okultacjach szacuje się na poziomie 20–30% (Beyerle G. et al. 2002).

Odbicia (*multipath*) stanowią istotny problem w opracowaniu okultacyjnych obserwacji GPS. Trudności wiążą się ze stosowaniem typowej dla odbiorników GPS pętli *phase lock*. Zamiast niej stosuje się inne techniki, na przykład *open loop* lub *fly wheeling*. Odbity sygnał może być użyty jako narzędzie do usuwania wpływu jonosfery i atmosfery z bezpośredniego sygnału. Drugim poważnym problemem jest inwersja sygnału. Wielokrotny sygnał (sygnał bezpośredni wraz z odbitymi) dochodzący do odbiornika powoduje nieoznaczoność w określającym kąt padania parametrze wyznaczanym na podstawie pomiarów dopplerowskich. Rozwiązanie tego problemu dostrzega się w możliwości odwrotnej propagacji pomierzonych amplitudy i fazy do płaszczyzny stycznej w punkcie styczności, obliczonej przy użyciu całki dyfrakcji Kirchoffa. Przeprowadzono symulowane badania różnych technik śledzenia pod kątem znalezienia odpowiedniej metody odwrotnej propagacji. Opracowano system symulacyjny, który działa w następujący sposób:

- generuje syntetyczne dane okultacyjne GPS za pomocą wielofazowego modelu;
- opracowuje dane syntetyczne przy użyciu egzemplarza odbiornika BlackJack;
- odwraca dane, korzystając z odwrotnej propagacji (Ao C.O. et al. 2002).
- analizę i badania okultacji radiowych GPS można sprowadzić do pięciu zających się ze sobą problemów:
  - rutynowe opracowanie okultacji radiowych GPS ze wszystkich satelitów (łącznie z precyzyjnym wyznaczeniem orbit, kalibracją, naprawianiem i kontrolą jakości),
  - sprawdzenie radiowych okultacji poprzez porównanie z pomiarami z innych źródeł (radiosondy, inne satelity) oraz z modelami (NCEP, ECMWF),
  - przebadanie różnych pętli śledzących odbiornik GPS,
  - przebadanie różnych algorytmów poprawiania obserwacji (np. radioholografia, odwrotna propagacja),
  - badania naukowe oparte na pozyskanych danych (Hajj G. et al. 2002a).

Wyłączenie 2 maja 2000 roku Selective Availability (S.A.) w systemie GPS spowodowało zmniejszenie błędu zegara satelity GPS o dwa rzędy wielkości. Stworzyło to możliwość opracowywania obserwacji GPS,

korzystając z pojedynczych różnic (z S.A. konieczne było korzystanie z podwójnych różnic). Algorytm wykorzystujący pojedyncze różnice stosowany jest w GFZ do opracowania danych okultacyjnych z misji CHAMP. Jego weryfikacji dokonano porównując wyniki opracowania 400 okultacji z misji CHAMP z wynikami opracowania podwójnych różnic oraz z danymi meteorologicznymi. 70% zebranego materiału obserwacyjnego z misji CHAMP opracowywane jest automatycznie (Wickert J. et al. 2002a; Wickert J. et al. 2002b). Do wyznaczenia kątów zakrzywienia torów propagacyjnych sygnałów GPS na podstawie obserwowanej fazy i amplitudy, przy założeniu pojedynczej propagacji (sygnał dopplerowski) i wielokrotnej (*multipath*) propagacji (złożony sygnał), opracowano wiele algorytmów. Poszczególne algorytmy oparte są na odwrotnej propagacji, przesunięciach widmowych lub transformacji kanonicznej. Do obliczania orbit niskiego satelity stosowane jest oprogramowanie *bernese*. Automatycznie opracowujące dane obserwacyjne wersje programu testowane były na materiale z misji GPS/MET, SAC-C i CHAMP. Otrzymywane wyniki porównywane są z danymi z radiosond oraz z modelami numerycznego prognozowania pogody NWP (Hunt D. et al. 2002).

Rozkład pary wodnej – najważniejszego składnika wywołującego efekt cieplarniany – oddziałuje na temperaturę przy powierzchni Ziemi. Z uwagi na szybką zmienność, rozkład pary wodnej jest szczególnie ważnym elementem krótkoterminowego prognozowania meteorologicznego. W obszarach arktycznych temperatura jest szczególnie szybko oddawana za pośrednictwem rozszerzania się lub kurczenia zamrożonych permanentnie powierzchni Ziemi i powierzchni morza (Gerding M. et al. 2002). Chociaż w rejonie arktycznym, na północ od równoleżnika 60°, funkcjonuje około 80 stacji radiowego sondowania atmosfery, nierównomierność ich rozkładu (całkowity brak stacji na Oceanie Arktycznym i w głębi Grenlandii) powoduje niską jakość wyznaczanych profili wilgotnościowych. Dane z satelitów LEO, do których zalicza się CHAMP, obserwujących zakrzywienia sygnałów radiowych, połączone z dodatkową informacją geologiczną, umożliwiają skuteczne profilowanie temperatury i wilgotności w atmosferze. W wyborze metody opracowania tych danych pomocna jest analiza porównawcza wyników z obserwacji GPS i z sond radiowych, zarówno na poziomie pojedynczych okultacji, jak i uśrednionych danych. Dodatkową weryfikację można przeprowadzić, stosując informacje otrzymane z analizy regionalnego modelu klimatycznego ECMWF (Gerding M. et al. 2002). Podobną procedurę testowano na podstawie danych z 9 dni obserwacji radiowych okultacji z satelitów CHAMP i Ørsted. Otrzymane z danych satelitarnych profile temperatury i wilgotności są statystycznie zgodne z odpowiadającymi profilami obliczonymi na bazie modelu ECMWF. Analiza wyników pozwoliła wyjaśnić zjawiska meteorologiczne, jakie w przypadkach podwyższonej wilgotności powodują znaczne rozbieżności pomiędzy profilami temperatury i

wilgotności a wynikami analiz NWP (Grove-Rasmunssen J. 2002). Do opracowania obserwacji radiowych okultacji można stosować jednowymiarową analizę wariacyjną (1DVAR) temperatury, wilgotności i ciśnienia na poziomie morza. Za podstawę analizy może służyć 6-godzinna prognoza oparta na systemie porównania danych o ograniczonej objętości (FVDAS). Włączenie do analizy danych z 1995 roku z satelity GPS/MET przyczyniło się do wyraźnej poprawy wyników otrzymywanych na podstawie obserwacji z sond radiowych. Efektem badań było zintegrowanie modelu 1DVAR z systemem FVDAS. Zintegrowany model poddany został licznym testom z wykorzystaniem danych z satelity GPS/MET z okresu 2 tygodni, a uzyskane wyniki porównano z wynikami opartymi na poprzednio używanych rozwiązaniach. Poprawę w jakości prognozowania meteorologicznego stwierdzono w szczególności dla półkuli południowej (Poli P., Joiner J. 2002). Wyniki analizy danych z satelity GPS/MET z użyciem modelu ECMWF zostały wykorzystane jako punkt wyjścia do opracowania niezależnej metody analizowania danych z misji CHAMP. W metodzie tej po bezpośrednim porównaniu wybranych profili temperaturowych w stratosferze, otrzymanych z obserwacji GPS, porównywane są globalne pola temperaturowe otrzymane z obserwacji radiowych okultacji z satelity CHAMP z bieżącymi danymi meteorologicznymi. Szczegółowe opracowanie danych z misji CHAMP z danymi meteorologicznymi powinno być poprzedzone wnikliwą analizą różnic pomiędzy wykorzystywanymi zbiorami danych. Wzajemnie porównywane średnie miesięczne pola temperaturowe stratosfery, wyznaczone z różnych zbiorów danych, wykazały zgodność w dolnej stratosferze (100–50 hPa) oraz znaczne rozbieżności w średniej stratosferze (30–10 hPa) w okresie zimowym. Duże rozbieżności wystąpiły szczególnie nad Syberią, Północnym Pacyfikiem i otoczeniem Alaski, gdzie rzadko wykonywane są sondáže radiowe atmosfery. W rejonach tych pomiary uzyskiwane z misji CHAMP przyczynią się do znacznej poprawy analiz meteorologicznych (Schöllhammer K. et al. 2002).

Szczególne znaczenie w prognozowaniu meteorologicznym przypisywane jest jakości profili wilgotności w troposferze. Europejskie Centrum Prognoz Pogody o Średnim Zasięgu (ECMWF) używa do prognozowania pogody hydrostatycznego numerycznego regionalnego modelu o wysokiej rozdzielczości (HRM). 30-godzinne prognozy pogody dla Europy określane są codziennie o 0h UTC. Porównano pionowe profile wilgotności otrzymane z HRM z profilami wyznaczonymi na podstawie radiowych okultacji z misji CHAMP oraz z profilami uzyskanymi z detektora MODIS, umieszczonego na pokładzie satelity Terra. Wstępnie uzyskane wyniki porównania wskazują, iż wartości wilgotności otrzymywane z modelu HRM są nieco większe od odpowiednich otrzymanych z misji CHAMP oraz że różnica zwiększa się wraz z malejącą wysokością nad powierzchnią Ziemi. Podobna

systematyczna różnica, tylko z przeciwnym znakiem, została otrzymana z porównania z wynikami Terra/MODIS (Johnsen K.P., 2002).

Stosowane obecnie w prognozowaniu meteorologicznym systemy teledetekcyjne IR/MW mają ograniczone możliwości wyznaczania profili temperaturowych i wilgotnościowych w pobliżu tropopauzy i w stratosferze. Dokładne profile refrakcyjności troposferycznej i stratosferycznej, które pozostają w związku funkcyjnym z temperaturą i wilgotnością, można uzyskać z opracowania obserwacji GPS. W szczególności pomiary radiowych okultacji dostarczają informacji o strukturze atmosfery w rejonie tropopauzy, które uzupełniają wyniki z jonosond (Borbás E. et al. 2002). Produktem obserwacji radiowych okultacji są profile temperatury i wilgotności, a także globalne mapy temperatury i rozkładu pary wodnej w atmosferze. Kombinacja systemów radiometrycznych z systemami geometrycznymi, przy użyciu statystycznej regresji, może być stosowana do tworzenia profili temperaturowych i wilgotnościowych. Do opracowania danych z misji CHAMP, w powiązaniu z danymi uzyskanymi z jonosond, można posłużyć się modelem numerycznego prognozowania pogody (NWP) (Borbás E. et al. 2002). Udoskonaloną metodę pozyskiwania profili temperatury i wilgotności z danych okultacyjnych opracowano na podstawie zasad optymalnej estymacji (Marquardt C. et al. 2002b). Podobne algorytmy wariacyjne stosowane są w szerokim zakresie w teledetekcji. Metodę zweryfikowano poprzez porównanie jednowymiarowych profili uzyskanych z obserwacji z misji CHAMP z danymi meteorologicznymi z sondażu radiowych atmosfery (Marquardt C. et al. 2002b). Dane temperaturowe z misji CHAMP są bardzo bliskie danym uzyskiwanym z radiosondaży (0.95 – współczynnik korelacji). Cechują się one odchyleniem standardowym 2–3°K. Błąd systematyczny tych danych nie przekracza 1°K na wszystkich wysokościach półkuli północnej. Błąd ten jest większy na półkuli południowej na większych wysokościach (Foelsche U. et al. 2002; Marquardt C. et al. 2002a). Profile uzyskane dla suchej refrakcji pozostają w dobrej zgodności z otrzymanymi przy zastosowaniu innych technik. Nieco sceptycznie autorzy eksperymentu odnoszą się do wyników dotyczących wilgotności. Niekiedy dane z misji CHAMP prowadzą do uzyskania ujemnych wartości pary wodnej w atmosferze, na przykład w rejonie Himalajów (Marquardt C. et al. 2002a).

Pomiary radiowych okultacji mogą służyć do określenia struktur fal grawitacyjnych w pionowych profilach temperaturowych. Za odniesienie dla wyznaczanych struktur mogą służyć dane uzyskane z sondażu balonowych. Przeprowadzono analizę łącznego opracowania danych z sond balonowych wypuszczanych ze stacji Andoya (69°N, 16°E) wspólnie z danymi z misji CHAMP. Wartości temperatury i widm częstotliwości, tworzące bazę danych o wysokiej rozdzielczości w określonym punkcie, porównano z uśrednionymi horyzontalnie pomiarami temperaturowymi z misji CHAMP. Przeprowadzono również teoretyczną ocenę możliwości wyznaczenia fal grawitacyjnych

w zależności od typu fali, ich długości w poziomie i pionie oraz parametrów geometrycznych, przy wykorzystaniu obserwacji radiowych okultacji (Lange M., Jacobi C. 2002).

Dane okultacyjne wykorzystywane są także do wyznaczania wysokości geopotencjalnych powierzchni stałego ciśnienia. Wysokość powierzchni geopotencjalnej stałego ciśnienia jest miarą średniej temperatury mas powietrza pod tą powierzchnią. Ciągłe monitorowanie wysokości geopotencjalnych może służyć modelowaniu zmian temperatury w atmosferze. Przewiduje się, że w przyszłości stanie się ono użytecznym narzędziem służącym do monitorowania klimatu (Landtman M. 2002).

Gęstość atmosfery może być monitorowana za pomocą akcelerometru STAR, który mierzy niegrawitacyjne przyspieszenia wzdłuż 3 wzajemnie prostopadłych osi akcelerometru. Składowa wzdłuż orbity reprezentuje głównie opór atmosfery, który jest proporcjonalny do gęstości. Gęstość otrzymuje się przy założeniu, że atomy środowiska atmosferycznego podlegają hipertermalnemu swobodnemu przepływowi. Wiatry termosferyczne nie mogą być dokładnie wymodelowane, stąd nie daje się usunąć ich wpływ z obserwowanego oporu atmosfery. Dokładność wyznaczanej gęstości jest więc również funkcją aktywności magnetycznej i szerokości (Bruinsma S., Biancale R. 2002). Wskazano, że analiza radioholograficzna danych okultacji radiowych jest potężnym narzędziem do badania globalnych naturalnych struktur mezosfery i atmosfery wraz z naturalnymi procesami antropogenicznymi (Pavelyev A.G. et al. 2002a). Radiowa holografia umożliwia obserwację sygnałów bezpośrednich i odbitych oraz pomiar ich charakterystyk. Wyniki uzyskane na podstawie opracowania eksperymentalnych danych potwierdzają możliwość pomiaru własności refrakcyjnych atmosfery w warstwie granicznej przy użyciu odbitego sygnału (Pavelyev A.G. et al. 2002b). Na podstawie danych misji CHAMP uzyskuje się bardzo dokładny obraz struktur falowych w górnej atmosferze, pionowych gradientów gęstości elektronowej w dolnej jonosferze oraz temperatury w atmosferze z wysoką rozdzielczością w wysokości (ok. 70 m). Duża dokładność pomiaru parametrów górnej atmosfery na podstawie danych z misji CHAMP umożliwia śledzenie zmian zachodzących w atmosferze oraz efektów ich oddziaływania na powierzchnię Ziemi. Oczekuje się, że naturalne procesy zachodzące w atmosferze i stratosferze, przejawiające się gwałtownym wzrostem wraz z wysokością amplitud fal pochodzenia wewnętrznego lub planetarnego, spowodowanym zmniejszającą się gęstością gazu neutralnego, mogą silnie oddziaływać na pionową strukturę mezosfery. Niewielkie zmiany w dolnych warstwach atmosfery mogą więc być zaobserwowane dzięki ich wpływowi na stan mezosfery. Procesy zachodzące w górnej jonosferze i magnetosferze mogą stanowić przyczynę zmian w mezosferze, w szczególności podczas okresów zwiększonej aktywności słonecznej. Opracowywana baza danych radioholograficznych, z uwzględnieniem



obserwacji z misji CHAMP, będzie zawierała dokładne i o wysokiej rozdzielczości informacje o parametrach mezosfery i atmosfery (Pavelyev A.G. et al. 2002a).

Dane uzyskane w misji CHAMP mogą posłużyć do uzupełnienia długoskalowych obserwacji powolnych zmian związanych ze zmianami klimatycznymi oraz wpływem antropogenicznym (Pavelyev A.G. et al. 2002a). Do opracowywania danych satelitarnych niezbędne są dane uzupełniające z innych źródeł. W obecnej chwili jednak trudno jest pokazać wpływ danych satelitarnych na jakość prognozowania, w szczególności na półkuli północnej. Dużą wagę przywiązuje się do oceny błędów, co ma bezpośredni wpływ na jakość prognozowania (Healy S. 2002). Obserwacje mogą być czułe na wielkoskalową strukturę rzeczywistej atmosfery, która nie znajduje odbicia w modelu prognostycznym. Rozkład obserwowanych okultacji jest niejednorodny. Najmniej okultacji przypada na strefę równikową, potem na strefę średnich szerokości.

W ostatniej dekadzie technika GPS stała się potężnym narzędziem do badania parametrów jonosfery i troposfery. Na bazie istniejących globalnych i regionalnych sieci stacji GPS stworzono systemy regularnego monitorowania zawartości elektronów w jonosferze, temperatury troposfery i zawartości pary wodnej w troposferze. Jako przykład może posłużyć trójwymiarowy system monitorowania gęstości elektronów w jonosferze dla regionu Europy (Schlüter S. et al. 2002). System ten wykorzystuje obserwacje GPS prowadzone na stacjach permanentnych sieci IGS w Europie. Wielkości TEC uzyskiwane są w sposób ciągły z obserwacji GPS za pomocą iteracyjnych metod rozwiązania problemu odwrotnego ze wsparciem modelowym. Jednak nawet przy gęstej sieci stacji naziemnych GPS pomiary nie zapewniają zadowalającego pokrycia i nie dają satysfakcjonującej rozdzielczości wysokościowej. Stąd zarówno obserwacje przy użyciu jonosond jak i dane radiowych okultacji z misji satelitarnych, w tym misji CHAMP, będą używane do poprawiania obrazu jonosfery (Schlüter S. et al. 2002). Do celów badania jonosfery satelita CHAMP umieszczony jest na zbyt niskiej orbicie. Tylko 50% TEC może być wyznaczone z pozyskiwanych danych. Informacja o wyższych warstwach jonosfery musi być otrzymywana z modelu. W przeciwieństwie do innych technik sondowania jonosfery technika okultacji dostarcza profili poziomych. Opracowanie danych z misji CHAMP wymaga zatem stosowania innych niż używane dotychczas algorytmów. Wiele takich algorytmów znajduje się obecnie w trakcie testowania. Przykładowo, algorytmy te oparte są na uogólnionej transformacji Abela dla ukośnego TEC lub różnych technikach tomograficznych (modele 3D Voxela, kombinacja naziemnych danych z danymi LEO GPS, kombinacja naziemnych danych z danymi z sond jonosferycznych) (Hernandez-Pajarez M. et al. 2002). W metodzie opartej wyłącznie na pomiarach GPS absolutne wielkości TEC wzdłuż trajektorii sygnałów obliczane są po skalibrowaniu, oddzielnie dla

każdej pary nadajnik-odbiornik, na podstawie kombinacji różnic obserwacji fazowych i kodowych GPS. Kalibracji dokonuje się przy wsparciu modelowym w okresie nocnej jonosfery, kiedy występuje niski poziom jonizacji, co z kolei zmniejsza błędy kalibracyjne. Skalibrowane wielkości TEC, obliczone dla jednego obrotu satelity CHAMP, są wprowadzane do parametryzowanego modelu jonosfery (PIM), który obejmuje również plazmosferę. Opracowano technikę tworzenia dwuwymiarowej reprezentacji gęstości elektronów jonosfery/plazmosfery na wysokości orbity CHAMP i w przestrzeni pomiędzy wysokością CHAMP a wysokością satelitów GPS oraz przeprowadzono jej weryfikację (Heise S. et al. 2002). Standardowy algorytm transformacji Abela nie jest optymalnym narzędziem do analizy danych jonosferycznych misji CHAMP z uwagi na niską orbitę satelity oraz założenie symetrii sferycznej. W pobliżu wschodu lub zachodu Słońca oraz podczas burz jonosferycznych oczekuje się dużych gradientów gęstości plazmy, w szczególności w okresach wzmożonej aktywności słonecznej, i stąd założenie sferycznej symetrii nie odpowiada realiom fizycznym. Przeprowadzono wiele testów polegających na porównaniu wyników uzyskanych z opracowania okultacji radiowych z misji GPS/MET z profilami koncentracji elektronowej otrzymanymi z odwrócenia jonogramów z sondowania jonosondami w pobliżu rejonów okultacji. Wyniki tych testów wskazują, że stosowanie transformacji Abela prowadzi do poprawnych wyników w ciągu dnia w średnich szerokościach, zaś sprawdza się znacznie gorzej w nocy i w okresach gwałtownych zmian magnetycznych (Chong C., Mitchell C.N. 2002). Algorytm Abela można poprawić poprzez włączenie do niego gradientów horyzontalnych oraz modelowanie gęstości elektronowej w niskich warstwach jonosfery. Modyfikacje modelu Abela polegające na odrzuceniu symetrii sferycznej prowadzą do znaczącej jego poprawy, zarówno w średnich szerokościach, jak i rejonach okołobiegunowych (Angling M.J. 2002; Hernandez-Pajarez M. et al. 2002). Innym korzystnym rozwiązaniem jest wpasowanie względnych pomiarów TEC z aparatury pomiarowej CHAMP do modelu globalnego, w sposób podobny do stosowanego do neutralnej atmosfery, przy użyciu numerycznych modeli pogody. Utworzony w ten sposób globalny model jonosfery GAIM został zweryfikowany na bazie danych testowych. Gęstość elektronowa na punktach siatki tego modelu otrzymywana jest przy użyciu modelu fizyki jonosfery (model "wprzód") oraz jednej z dwóch technik: ograniczony pasmowo filtr Kalmana lub 4DVAR (4-wymiarowy wariacyjny). Efektywność wykorzystania okultacji z misji CHAMP do modelowania jonosfery sprawdzana jest poprzez wprowadzenie do modelu GAIM danych z satelity CHAMP oraz danych naziemnych i porównanie wyników z wynikami uzyskanymi z niezależnych pomiarów, na przykład pionowe TEC z altimetru TOPEX, ukośne TEC z naziemnych pomiarów GPS, dane globalne z poziomów FoF2, HmF2 oraz z dolnych profili z jonosond (Hajj G. et al. 2002b). Stosowane od wielu lat w

meteorologii (i w geodezji) estymacje BLUE oraz techniki wariacyjnej asymilacji danych (jedno- trzy- lub czterowymiarowych) znajdują obecnie również zastosowanie do monitorowania neutralnej atmosfery, przy użyciu obserwacji okultacji radiowych. Opracowane technikami BLUE dane okultacyjne mogą być zastosowane jako uzupełnienie parametryzowanego modelu jonosferycznego (PIM). W tym celu przeprowadzono analizę wyników na podstawie danych z misji GPS/MET (Angling M.J. 2002). Z przeznaczeniem dla przestrzennego chwilowego obrazowania atmosfery i jonosfery opracowany został algorytm MIDAS, analizujący dane pochodzące z różnych źródeł sondowania atmosfery (Mitchell C.N. 2002; Spalla P. et al. 2002). Rutynowo algorytm ten umożliwia tworzenie czterowymiarowych globalnych obrazów koncentracji elektronów, na podstawie dwuczęstotliwościowych obserwacji GPS ze stacji naziemnych. Do programu MIDAS mogą być także wprowadzane dane jonosferyczne w postaci profilów gęstości, otrzymane z odwrócenia jonogramów lub w formie bezpośrednich pomiarów koncentracji jonizacji, pochodzące z satelitów orbitujących na niskich orbitach. Typowa tomografia jonosferyczna oparta jest na dwuwymiarowej inwersji danych z pojedynczego satelity na orbicie biegunowej. Zakłada się w niej stacjonarny rozkład jonizacji podczas pojedynczego przelotu nad stacją, trwającego około 20 minut. Ciągła obserwacja wielu satelitów GPS umożliwia wyznaczenie w pełni czterowymiarowego rozkładu jonizacji z rozdzielczością czasową 30 sekund, a tym samym badanie zmienności w czasie trójwymiarowych struktur jonizacji. Uzyskuje się zatem trójwymiarowy ruchomy obraz, w przeciwieństwie do dwuwymiarowego obrazu oferowanego przez inwersję tomograficzną. Jednoczesne opracowanie obserwacji GPS ze stacji naziemnych oraz z odbiornika na satelicie (*satellite to satellite tracking*) prowadzi do znaczącej poprawy geometrii w porównaniu z uzyskiwaną z pojedynczego źródła obserwacji. Kombinacja tych danych, obok wysokiej rozdzielczości pionowej, zapewnia wysoką rozdzielczość poziomą. Poprawność oraz efektywność działania programu MIDAS zostały wykazane poprzez porównanie z wynikami otrzymanymi na podstawie danych okultacyjnych z misji CHAMP nad obszarem Europy (Mitchell C.N. 2002; Spalla P. et al. 2002).

Dane okultacyjne z misji CHAMP opracowywane są automatycznie w DLK/IKN w Neustrelitz i wynikowe modele jonosferyczne dostępne są za pośrednictwem Information System and Data Center GFZ w Poczdamie w 3 godziny po uzyskaniu danych. Błędy średnie TEC w warstwie FoF2 uzyskane na podstawie porównania z innymi wynikami sondowań kształtują się na poziomie 18%, zaś w warstwie HmF2 – 13% (Jakowski N. et al. 2002). Wśród problemów naukowych związanych z sondowaniem jonosfery przy użyciu radiookultacji GPS, jako elementu misji CHAMP, do najważniejszych zaliczają się:

- 1) określenie optymalnej metody opracowania wysokościowego profilu gęstości elektronowej;
- 2) tomograficzna asymilacja technik obrazowania jonosfery (aparatury modelowania i opracowania danych podobny do współczesnego stosowanego w geodezji);
- 3) problemy związane z opracowaniem danych (potrzebne operacyjne generowanie danych);
- 4) problemy naukowe związane z poprawianiem modeli, opisem perturbacji jonosferycznych;
- 5) zatwierdzanie produktów sondażu jonosferycznych;
- 6) organizowanie koordynowanych kampanii pomiarowych;
- 7) określenie wymagań stawianych danym przeznaczonym do badania jonosfery.

Obecnie dane opracowywane przez IGS dostarczają godzinnych rozwiązań dla jonosfery. Rozwiązania te mogą być interpolowane na dowolną epokę. Dokładność produktów jonosferycznych z misji CHAMP jest oceniana poprzez porównanie ich z danymi uzyskiwanymi niezależnie z sondy Langmuire'a umieszczonej na pokładzie satelity CHAMP (Jakowski N. et al. 2002), jonosond oraz *incoherent scatter radar*. Do krytycznych należy struktura warstwy F2. Jej badanie, obok danych okultacyjnych z misji CHAMP, wymaga jednoczesnego gromadzenia obserwacji przez stacje naziemne. W celu zwiększenia rozdzielczości i pełniejszego zobrazowania jonosfery sugerowana jest potrzeba zwiększenia częstotliwości obserwacji GPS. Obecnie do celów modelowania jonosfery stosuje się dwuczęstotliwościowe dane GPS rejestrowane z krokiem 1 sekundy. W wyniku analizy jakościowej profili atmosferycznych proponuje się do dalszych badań jonosfery częstotliwość 50 Hz rejestracji danych GPS (Wickert J. et al. 2002c). Stosowana obecnie częstotliwość rejestracji obserwacji GPS w misji CHAMP może być zmieniona w dalszej realizacji misji. Spodziewane jest uzyskanie interesujących wyników w późniejszej fazie eksperymentu CHAMP, gdy obniży się wysokość orbity satelity (do 250 km w końcowej fazie eksperymentu). Ośrodki obliczeniowe zaangażowane w misję CHAMP planują opracowywanie w trybie automatycznym w czasie prawie rzeczywistym map TEC dla Europy.

## 5. PODSUMOWANIE

Realizacja misji satelitarnej CHAMP stanowi istotny krok w kierunku dalszego, kompleksowego poznania Ziemi jako planety wraz z jej otoczeniem razem ze zmiennością w czasie i w przestrzeni. Nowa jakość danych gromadzonych podczas misji stanowi wyzwanie dla grup zaangażowanych w badania w zakresie nauk o Ziemi oraz powstawanie nowych technologii pomiarowych. Opracowywanie danych z misji CHAMP wymaga bliskiej współpracy specjalistów reprezentujących różne dyscypliny naukowe. Użytkownikami eksperymentu są zespoły badawcze, których projekty zostały przyjęte do programu wykorzystania misji w ramach Announcement of Opportunity w 2001 roku. Zespołom tym udostępniane są dane z eksperymentu po zaledwie wstępnym ich przetworzeniu. Wyniki opracowań danych z misji CHAMP, na przykład modele pola grawitacyjnego oraz pola magnetycznego Ziemi otrzymane z misji CHAMP, dostępne są na publicznym serwerze oraz bez ograniczeń poprzez stronę internetową [http://www.gfz-potsdam.de/pb1/index\\_D1en.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb1/index_D1en.html). W trakcie trwania misji lista użytkowników eksperymentu CHAMP może zostać rozszerzona. Istnieje zatem możliwość zgłaszania kolejnych projektów badawczych do koordynatorów eksperymentu. Dostęp do unikalnych danych stworzy krajowym zespołom zaangażowanym w modelowanie pola grawitacyjnego Ziemi, badanie i modelowanie pola magnetycznego Ziemi, badanie fizyki atmosfery, badania meteorologiczne, klimatyczne oraz oceanograficzne wyjątkowo atrakcyjne warunki prowadzenia nowatorskich prac badawczych i rozwoju kadry naukowej.

## LITERATURA

- [1] Angling M.J., 2002, *Data assimilation of ionospheric radio occultation measurements*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [2] Ao C.O., Hajj G.A., Leroy S.S., Meehan T.K., de la Torre Juarez M., Iijima B.A., Mannucci A.J., 2002, *Backpropagation processing of GPS radio occultation data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [3] Balmino G., 1974, *Determination of Earth potential by means of space methods*. Space Geodynamics, Lannion.
- [4] Baustert G., Galas R., 2002, *Experiences from the CHAMP data pre-processing system for orbit and gravity field*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [5] Beyerle G., Hocke K., Wickert J., Schmidt T., Marquardt C., Reigber Ch., 2002, *GPS signal surface reflections and signal*

- propagation in the troposphere*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [6] Bilker M., Ollikainen M., Poutanen M., 2002, *Distribution of errors in geoid models*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [7] Bisnath S.B., Langley R.L., 2002, *CHAMP orbit determination with GPS phase-connected, precise point positioning*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [8] Bock H., Hugentobler U., Beutler G., 2002, *Kinematic and dynamic determination of trajectories for low earth satellites using GPS*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [9] Boomkamp H., 2002, *IGS LEO pilot project Associate Analysis Centre coordination at ESOC*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [10] Borbás E., Menzel P., Jun Li J., 2002, *Combination of NOAA16/ATOVS brightness temperatures and the CHAMP bending angle profiles to get temperature and humidity profiles*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [11] Bruinsma S., Biancale R., 2002, *Total density retrieval with STAR*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [12] Cerisier J.C., Marchaudon A., 2002, *Currents parallel to the earth magnetic field at the CHAMP orbit: application to the electrodynamics of the ionosphere*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [13] Chambodut A., Mandeau M., Holschneider M., 2002, *Modelling the Earth's magnetic field: wavelet based and standard methods*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [14] Chong C., Mitchell C.N., 2002, *Ionospheric radio-occultation using GPS/MET with ionosonde verification*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [15] Chovitz B., Lucas J., Morrison F., 1973, *Gravity gradients at satellite altitudes*. NOAA Technical Report NOS 59, Rockville MD.
- [16] Christiansen F., Neubert T., Papitashvili V.O., 2002, *Modeling field-aligned currents derived from high-precision satellite magnetic field data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [17] Comfort G.C., 1973, *Direct mapping of gravity anomalies by using Doppler tracking between a satellite pair*. Journal of Geoph. Res., Vol. 78, No. 21.
- [18] Cooke D., Roth C., 2002, *Ion Drift-Meter status and calibration*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.

- 
- [19] Denker H., Roland M., 2002, *Regional gravity modelling in Europe based on CHAMP and terrestrial data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [20] Ditlevsen E.H., Tscherning C.C., 2002, *Preliminary analysis of CHAMP state vector and accelerometer data for the recovery of the gravity potential*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [21] Foelsche U., Kirchengast G., Steiner A.K., Gobiet A., Loescher A., Bichler C., Wickert J., Beyerle G., Kornbluh L., Gorbunov M., Syndergaard S., Hauchecorne A., 2002, *Global climate monitoring based on CHAMP/GPS radio occultation data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [22] Forward R.L., 1975, *Review of artificial satellite gravity gradiometer techniques for geodesy*. The Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, Athens, pp. 157–192.
- [23] Förste C., 2002, *CHAMP accelerometer data preprocessing – Level-2-data generation at GFZ Potsdam*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [24] von Frese R.R.B., Potts L.V., Kim H.R., Shum C.K., Taylor P.T., Kim J.W., Han S.C., 2002a, *CHAMP gravity anomalies over Antarctica*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [25] von Frese R.R.B., Kim H.R., Taylor P.T., Kim J.W., 2002b, *CHAMP, Ørsted, and Magsat magnetic anomalies of the Antarctic lithosphere*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [26] Galas R., Baustert G., Förste C., Köhler W., 2002, *GFZ GPS active network for CHAMP: Operation, data quality control and integrity monitoring*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [27] Gegout P., Lemoine J.M., 2002, *Temporal variations of the gravity field*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [28] Gerding M., Weisheimer A., Dethloff K., Neuber R., 2002, *Validation of water vapour profiles from GPS radio occultation soundings in the Arctic region*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [29] Gerlach G., Sneeuw N., Visser P.N., Svehla D., 2002, *CHAMP gravity field recovery with the energy balance approach: first results*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [30] Glockner O., 2002, *Gravitational field modelling from CHAMP-ephemerides by harmonic splines and fast multipole techniques*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [31] Gooding R.H., Wagner C.A., Klokočnik J., Kostelecky J., König R., Reigber Ch., Schwintzer P., 2002, *CHAMP, orbit resonances and*

- gravity field parameters*. CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [32] Grejner-Brzezinska D., Kwon J., Hong C.K., Bae T.S., 2002, *Performance analysis of CHAMP kinematic orbit determination*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [33] Gross R.S., 2002, *CHAMP, mass displacements, and the Earth's rotation*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [34] Grove-Rasmussen J., 2002, *Comparison of DMI retrieval of CHAMP occultation data with ECMWF*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [35] Grunwaldt L., Meehan T., 2002, *Orbit and gravity instrument status*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [36] Hajj G., Ao C., Dong D., Iijima B., Kuang D., Kursinski R., Mannucci A., Meehan T., de la Torre M., Yunck T., 2002a, *An overview of CHAMP radio occultation analysis at JPL*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [37] Hajj G., Wilson B., Iijima B., Pi X., Wang C., 2002b, *Analysis of CHAMP ionospheric measurements using a global ionospheric data assimilation model*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [38] Healy S., 2002, *The assimilation of radio occultation measurements*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [39] Heise S., Jakowski N., Wehrenpfennig A., Reigber Ch., Lühr H., 2002, *Initial results on ionosphere/plasmasphere sounding based on GPS data obtained onboard CHAMP*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [40] Hemant K., Maus S., 2002, *A comparison of global lithospheric field models derived from satellite data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [41] Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Garcia-Fernandez M., 2002, *An improvement of retrieval techniques for ionospheric radio occultations*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [42] Holme R., Olsen N., Rother M., Lühr H., 2002, *A CHAMP magnetic field model*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [43] Hulot G., Eymin C., Langlais B., Manda M., Olsen N., 2002, *Small-scale structure of the Geodynamo inferred from Ørsted and Magsat satellite data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.



- 
- [44] Hunt D., Rocken C., Schreiner B., Sokolovskiy S., 2002, *Processing of CHAMP, SAC-C and GPS/MET Occultation Data at CDAAC*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [45] Ilk K.H., 2002, *Regional gravity field modeling*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [46] Jackson A., 2002, *New views of the core magnetic field from CHAMP and other satellites*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [47] Jakowski N., Wehrenpfennig A., Heise S., Reigber Ch., Lühr H., 2002, *Status of ionospheric radio occultation CHAMP data analysis and validation of higher level data products*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [48] Johnsen K.P., 2002, *NWP model specific humidities compared with CHAMP/GPS radio occultation data and with Terra/MODIS data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [49] Kang Z., Bettapur S., Tapley B., Cheng M., Ries J., 2002, *Determination of CHAMP accelerometer calibration parameters*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [50] Kim H.R., von Frese R.R.B., Taylor P.T., Kim J.W., 2002, *CHAMP enhances utility of satellite magnetic observations to augment near-surface magnetic survey coverage*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [51] Korte M., Constable S.C., Constable C.G., 2002, *Separation of the external magnetic signal for induction studies*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [52] König R., Neumayer K.H., 2002, *Thermospheric events in CHAMP precise orbit determination*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [53] Kryński J., Schwarz K.P., 1977a, *Analysis of satellite gradiometer data for local geoid determination*. Mitteilungen der geodätischen Institute der TU Graz, Folge 26.
- [54] Kryński J., Schwarz K.P., 1977b, *Zastosowanie satelitarnych pomiarów gradiometrycznych do wyznaczania lokalnego przebiegu geoidy*. Geodezja i Kartografia T. XXVI No 1 pp. 87–101.
- [55] Kryński J., 1977, *Badanie pola grawitacyjnego Ziemi w oparciu o obserwacje pary niskich satelitów przy zastosowaniu metody kollokacji*. Geodezja i Kartografia T. XXVI No. 1 pp. 241–253.
- [56] Kryński J. 1981, *A Global Determination of the Earth's Gravity Field by Using Satellite – to – Satellite Tracking*. Bolletino di Geodesia e Scienze Affini, Anno XL, No. 3, pp. 197–212.
- [57] Kryński J., 1978, *Possibilities of low-low satellite tracking for local geoid improvement*. Mitteilungen der geodätischen Institute der TU Graz, Folge 31.

- 
- [58] Landtman M., 2002, *Geopotential height calculations using radio occultation data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [59] Lange M., Jacobi C., 2002, *Analysis of gravity waves from atmospheric occultation measurements with CHAMP*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [60] Larsen G.B., Høeg P., Grove-Rasmussen J., Sørensen M.B., 2002, *GPS atmosphere and ionosphere profiling methods used on Ørsted data and application on CHAMP data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [61] Lemoine F.G., Luthcke S.B., Rowlands D.D., Pavlis D.E., Colombo O.L., Ray R.D., Thompson B., Nerem R.S., Williams T.A., 2002, *CHAMP Tracking and Accelerometer Data Analysis Results*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [62] Lesur V., Thomson A., 2002, *A comparison of CHAMP and Ørsted main and external field models for 2001*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [63] Liu H., Richmond A., Schlegel K., 2002, *Field-aligned ion flows at the topside polar ionosphere and the field-aligned current*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [64] Loyer S., Bruinsma S., Tamagnan D., Lemoine J.M., Perosanz F., Biancale R., 2002, *STAR accelerometer contribution to dynamic orbit and gravity field model adjustment*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [65] Lühr H., 2002a, *Magnetometry instruments status and performance*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [66] Lühr H., 2002b, *Night-time ionospheric currents*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [67] Maier T., Mayer C., 2002, *Multiscale Geomagnetic Crustal Field Downward Continuation From CHAMP-Data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [68] Marquardt C. et al., 2002a, *Status of CHAMP radio occultation products and their validation*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [69] Marquardt C., Healy S.B., Wickert J., Schmidt T., Beyerle G., König R., Galas R., 2002b, *Variational retrieval of CHAMP radio occultation data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [70] Marinkovic P., Grafarend E.W., 2002, *Space gravity spectroscopy: Variance – covariance transformation from pseudo – observations (Cartesian coordinate ephemeris) to gravity field parameters (spherical or ellipsoidal harmonics) based upon Taylor – Karman structured*

- criterion matrices*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [71] Martinec Z., 2002, *Two-dimensional spatio-temporal electromagnetic induction along a satellite trajectory*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [72] Maus S., Hemant K., Rother M., Lühr H., 2002, *Mapping and initial interpretation of the lithospheric field from CHAMP scalar and vector magnetic data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [73] Maute A., Richmond A.D., Roble R.G., 2002, *Ionospheric dynamo currents and magnetic perturbations modeled in a realistic geomagnetic field*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [74] Mayer C., Maier T., 2002, *Multiscale determination of radial current distributions from CHAMP-FGM data*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [75] McCreadie H., Holme R., Maus S., Lühr H., 2002, *The equatorial electrojet as seen from the CHAMP satellite*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [76] Michalak G., Baustert G., König R., Schwieger V., Reigber Ch., 2002, *CHAMP rapid science orbit determination – Status and future prospects*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [77] Mitchell C.N., 2002, *Combining radio occultation measurements with other instruments to map the ionospheric electron concentration*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [78] Moore P., Turner J.F., Zhang Q., 2002, *CHAMP gravity field analyses at Newcastle University*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [79] Morrison F., 1970, *Comments on paper by Milo Wolf “Direct measurements of the Earth’s gravitational potential using a satellite pair”*. Journal of Geoph. Res. Vol. 75 No. 11.
- [80] Mozzoni D., Cain J.C., Ferguson B., 2002, *Combined modeling of Ørsted and CHAMP magnetic field data with help from magnetic observatory secular change*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [81] Neumayer K.H., König R., Reigber Ch., Zhu S.Y., 2002, *Approaches to CHAMP precise orbit determination*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [82] Oberndorfer H., Müller J., 2002, *CHAMP – Accelerometer and star sensor data combination*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.

- 
- [83] Olsen N., Friis-Christensen E., Vennerstroem S., 2002, *Monitoring the magnetic signature of the magnetospheric ring-current with Ørsted, CHAMP and Ørsted-2/SAC-C*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [84] Paris J., Menvielle M., 2002, *Derivation and dissemination of the longitude sector indices*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [85] Pavelyev A.G., Wickert J., Igarashi K., Hocke K., 2002a, *High-precision observation of the mesosphere and atmosphere using radioholographic analysis of GPS/MET and CHAMP radio occultation database*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [86] Pavelyev A.G., Kucherjavenkov I.A., Kucherjavenkov A.I., Gubenko V.N., Wickert J., Beyerle G., Hocke K., Pavelyev D.A., 2002b, *Observation of reflected signals in MIR/GEO, GPS/MET and CHAMP radio occultation experiments*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [87] Perret A., Biancale R., Perosanz F., Lemoine J.M., Fayard T., Vales N., Sarrailh M., Loyer S., Touboul P., Foulon B., Pradels G., Grunwaldt L., Duvivier E., 2002, *On-board evaluation of the STAR accelerometer*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [88] Poli P., Joiner J., 2002, *Assimilation experiments of IDVAR analyses with GPS/MET refractivity*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [89] Purucker M., Olsen N., Ravat D., Schwintzer P., Langlais B., 2002, *Improving global crustal temperature, geologic variation, and lithospheric strength models utilizing the lithospheric magnetic field derived from CHAMP*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [90] Ravat D., 2002, *Unraveling the magnetic mystery of the Earth's lithosphere: The background and the role of the CHAMP mission*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [91] Reed G.B., 1973, *Application of kinematical geodesy for determining the short wave length components of the gravity field by satellite gradiometry*. OSU Report, No. 201, Columbus, Ohio.
- [92] Reigber Ch., Schwintzer P., Luhr H., 1999a, *The CHAMP geopotential mission*. Bolletino di Geofisica Teoretica ad Applicata, Vol. 40 N. 3–4 pp. 285–289.
- [93] Reigber Ch., Barthelmes F., Greiner-Mai H., Gruber T., Jochmann H., Wunsch J., 1999b, *Temporal gravity field variations from oceanic, atmospheric and inner core mass redistributions and their sensitivity to new gravity missions CHAMP and GRACE*. Bolletino di Geofisica Teoretica ad Applicata Vol. 40 N. 3–4 pp. 329–340.

- 
- [94] Reigber Ch., Balmino G., Schwintzer P., Biancale R., Bode A., Lemoine J.M., König R., Loyer S., Neumeyer H., Marty J.C., Barthelmes F., Perosanz F., 2002a, *New global gravity field model from selected CHAMP data sets*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [95] Reigber Ch., Jochmann H., Wunsch J., Neumayer K.H., Schwintzer P., 2002b, *First insight into temporal gravity variability from CHAMP*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [96] Reubelt T., Austen G., Grafarend E.W., 2002, *Ellipsoidal space gravity spectroscopy: Analysis of the Earth's gravitational field by means of a LEO satellite orbit. Case study: (simulated) CHAMP kinematic orbit*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [97] Rim H., Yoon S., Schutz B., Kang Z., Nagel P., Bettadpur S., Tapley B., Choi K., Ries J., Cheng M., 2002, *CHAMP POD at CSR*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [98] Ritter P., Viljanen A., Lühr H., Olsen N., 2002, *Ionospheric currents from CHAMP magnetic field data – Comparison with ground measurements*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [99] Rother M., Choi S., Mai W., Lühr H., Holme R., 2002, *Calibration and processing of CHAMP magnetometry data products*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [100] Rummel R., 1975, *Downward continuation of gravity information from satellite-to-satellite tracking or satellite gradiometry in local areas*. OSU Report No. 221 Columbus, Ohio.
- [101] Schlüter S., Stolle C., Jakowski N., Jacobi C., 2002, *Monitoring of 3-dimensional ionospheric electron density distributions based on GPS measurements*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [102] Schmidt R., Baustert G., König R., Reigber Ch., 2002, *Orbit predictions for CHAMP: Development & status*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [103] Schöllhammer K., Marquardt C., Labitzke K., Naujokat B., 2002, *Comparison of five different meteorological datasets (Berlin Stratospheric Analyses, NCEP, ECMWF, UKMO)*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [104] Schwarte J., Lühr H., Holme R., 2002, *Improved parametisation of external magnetic fields from CHAMP Measurements*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [105] Schwarz Ch.R., 1970, *Gravity field refinement by satellite-to-satellite Doppler tracking*. OSU Report No. 147 Columbus, Ohio.

- 
- [106] Schwintzer P., 2002, *Orbit and gravity data processing and product status*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [107] Schwintzer P., Reigber Ch., Bode A., Kang Z., Zhu S., Massmann F.H., Raimondo J.C., Biancale R., Balmino G., Lemoine J.M., Moynot B., Marty J.C., Barlier F., Boudon Y., 1997, *Long-wavelength global gravity field models: GRIM4-S4, GRIM4-C4*. Journal of Geodesy Vol. 71 pp. 189–208.
- [108] Seuffer V., Schröter J., Wenzel M., 2002, *Assimilation of altimeter and geoid data into a global ocean model*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [109] Shi C., Grunwaldt L., Meixner H., Zhu S., 2002, *Determination of the offset of CHAMP GPS antenna with respect to the mass center*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [110] Spalla P., Jakowski N., Wehrenpfennig A., Spencer P.S.J., Mitchell C.C., 2002, *Verification of CHAMP radio-occultation observations in the ionosphere using MIDAS*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [111] Stampe A.M., Friis-Christensen E., Vennerstrøm S., Olsen N., 2002, *Current systems in the polar region during quiet geomagnetic conditions – Multi-satellite observations*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [112] Svehla D., Rothacher M., 2002, *CHAMP double-difference kinematic POD with ambiguity resolution*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [113] Tarits P., 2002, *Preliminary investigation of the CHAMP magnetic data for induction studies*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [114] Tapley B., Bettadpur S., Chambers D., Cheng M., Gunter B., Kang Z., Kim J., Nagel P., Ries J., Rim H., Roesset P., Roundhill I., 2002, *Gravity field determination from CHAMP using GPS tracking and accelerometer data: Initial results*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [115] Taylor P.T., Frawley J.J., von Frese R., Kim H.R., Kim J.W., 2002, *Comparing Magsat, Ørsted and CHAMP crustal magnetic anomaly data over the Kursk Magnetic Anomaly, Russia*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [116] Vennerstroem S., Moretto T., Olsen N., Friis-Christensen E., 2002, *Multi-satellite observations of currents in the day-side cusp and polar cap*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.

- [117] Vermeersen B., Schott B., Sabadini R., 2002, *Geophysical impact of field variations*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [118] Viljanen A., Pulkkinen A., Amm O., Ritter P., 2002, *Upward continuation of the ground magnetic field: 1D and 2D approaches*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [119] Wardinski I., Holme R., 2002, *Decadal and sub-decadal secular variation of main geomagnetic field*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [120] Wagner C.A., Klokocnik J., Kostecky J., 2002, *GPS reflecting altimetry with CHAMP: A simulation study*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [121] Watermann J., Christiansen F., Stauning P., Rasmussen O., 2002, *Field-aligned currents inferred from low-altitude Earth-orbiting satellites and ionospheric currents inferred from ground-based magnetometers – do they render consistent results?* First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [122] Webers W.A., 2002, *How important is downward field continuation when satellite magnetic field data are studied?* First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [123] Wickert J., Beyerle G., Schmidt T., Marquardt C., König R., Grunwaldt L., Reigber Ch., 2002a, *GPS radio occultation with CHAMP*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [124] Wickert J., Beyerle G., Hajj G., Kirchengast G., Schmidt T., Marquardt C., König R., 2002b, *Space-based single differencing: An alternative approach for CHAMP occultation processing*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [125] Wickert J., Schmidt T., Förste C., 2002c, *GPS ground station data for CHAMP occultations*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [126] Wolf M., 1969, *Direct measurements of the Earth's gravitational potential using a satellite pair*. Journal of Geoph. Res. Vol. 75 No. 11.
- [127] Yunck T.P., 2002, *Strategies for precise orbit determination with GPS*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.
- [128] Zhu S., Neumayer H., Massmann F.H., Shi C., Reigber Ch., 2002, *Impact of different data combinations on the CHAMP orbit determination*. First CHAMP Science Meeting, January 22–25, Potsdam, Germany.

## SATELLITE MISSION CHAMP – FIRST RESULTS AND RESEARCH PERSPECTIVES

## Abstract

Satellite CHAMP, launched on 15 July 2000, began the first space mission dedicated to the complex research of the Earth as a system composed of solid, liquid and gaseous parts that show large variation in space and time and mutual complex interactions taking place on quite different time scales, by the use of measuring instruments operating on board of a low satellite. Research topics related to CHAMP mission concentrate on the investigation of gravity and magnetic field of the Earth including their time variability as well as on the investigation of the structure and dynamics of neutral atmosphere and ionosphere. Advance in research projects and discussion of the results obtained after first 18 months of mission were the subjects of scientific conference in Potsdam in January, 2002. The paper gives a review of scientific and technical problems related with the mission and discussed during the conference as well as the results obtained and expected from the rest of the mission.

*ЯН КРЫНЬСКИ*

СПУТНИКОВАЯ МИССИЯ СНАМР – ПЕРВЫЕ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

## Резюме

Миссия СНАМР (CHALLENGING Minisatellite Payload), продолжающаяся с 15 июля 2000 года, является первой в истории спутниковой миссией, предназначенной для комплексного исследования Земли, как системы, состоящей из твёрдых, жидких и газообразных элементов, проявляющих изменчивость в пространстве и времени, а также взаимодействующих друг на друга в разных временных шкалах, с помощью измерительной аппаратуры, помещённой на низком спутнике. Исследовательская тематика миссии СНАМР концентрируется вокруг исследования гравитационного поля и магнитного поля Земли с учётом их изменчивости во времени, а также исследования состояния и динамики нейтральной атмосферы и ионосферы. Состояние продвинутых вперёд исследовательских программ и дискуссия по результатам, полученным за первые 18 месяцев осуществления миссии, были предметом научной конференции, организованной в январе



2002 года в Потсдаме. В данной работе представлен обзор исследовательских задач, связанных с реализацией миссии CHAMP, научных и технических проблем, обсуждаемых на конференции, а также результатов полученных и ожидаемых в дальнейшей фазе продолжения миссии.

Перевод: Роза Толстикова

