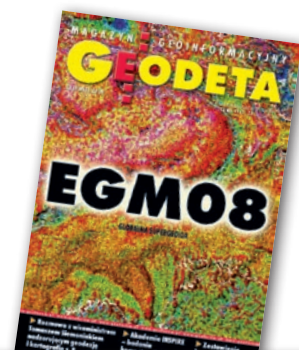


EGM08 GLOBALNA SUPERGEOIDA



W roku 2008 opublikowano model geoidy EGM08 do stopnia $n_{max} = 2190$, którego dokładność jest porównywalna z dokładnością żmudnie przez lata tworzonych na terenie Polski grawimetrycznych modeli quasigeoidy. EGM08 pozwala przekształcać wysokości GPS na wysokości względem średniego poziomu morza z dużą dokładnością w skali globalnej i stąd jego przełomowe znaczenie dla geodezji.

ADAM ŁYSZKOWICZ

Niwelacja geometryczna dostarcza wiedzy na temat wysokości, które powszechnie określamy jako wysokości H nad średnim poziomem morza. Powierzchnią odniesienia dla tych wysokości jest powierzchnia pozioma, która w skali globalnej pokrywa się ze średnim poziomem morza. Tę szczególną powierzchnię poziomą nazywamy geoidą. Wysokości to odległości pionowe od geoidy do powierzchni Ziemi (w celu łatwiejszego zrozumienia tekstu autor świadomie pomija dokładniejszą definicję wysokości i nie wprowadza pojęcia wysokości ortometrycznej i normalnej ani dokładnego rozróżnienia między geoidą i quasigeoidą).

Natomiast system GPS daje zupełnie inny rodzaj wysokości. Bez względu na metodę wyznaczenia pozycji otrzymujemy współrzędne X, Y, Z , które zależą od lokalizacji stacji bazowych i pozycji satelity. Jako że współrzędne te nie

wyrażają bezpośrednio wysokości, konieczne jest ich przekształcenie do innego układu współrzędnych. Zazwyczaj współrzędne X, Y, Z są przekształcane na szerokość φ , długość λ oraz wysokość elipsoidalną h . To przekształcenie wykonywane jest przy użyciu prostego, dwuparametrowego modelu.

Między wysokością elipsoidalną h , wysokością H a odstępem geoidy od elipsoidy N istnieje następująca zależność (rys. 1):

$$h = H + N \quad (1)$$

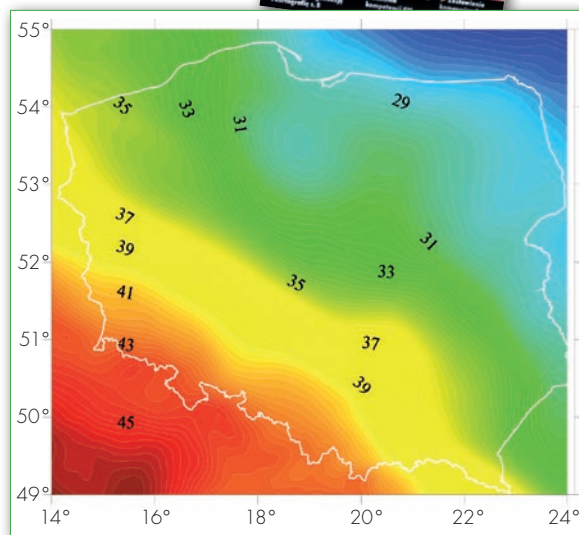
Różnice między wysokością elipsoidalną a wysokością względem średniego poziomu morza są dość znaczne i w skali całego globu mogą wahać się od +75 do -100 metrów. Na terytorium Polski mieszczą się w granicach od +43 do +28 metrów (rys. 2). Zmiany wysokości geoidy/quasigeoidy są znaczne i mają wyjątkowo złożony charakter. Wiąże się to zarówno z topografią terenu, jak i zmiennością gęstości skał znajdujących się pod powierzchnią Ziemi. W celu ułatwienia przekształceń wysokości otrzymywanych za pomocą GPS na wysokości odniesione do średniego poziomu morza według wzoru:

$$H = h - N \quad (2)$$

opracowuje się modele geoidy/quasigeoidy o wysokiej rozdzielczości oraz powiązane z tym oprogramowanie komputerowe do interpolacji i transformacji jednego typu wysokości na drugi.

• MODELE GEOIDY

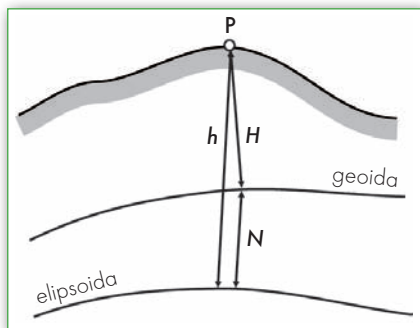
Istnieją dwa podejścia do liczenia modelu geoidy/quasigeoidy. Można to zrobić z danych grawimetrycznych przy wy-



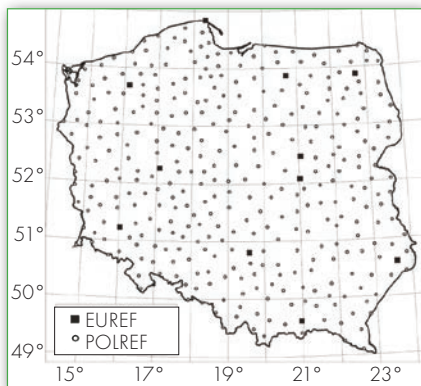
Rys. 2. Quasigeoida dla obszaru Polski (izolinie w metrach)

korzystaniu całej Stokesa oraz z modeli geopotencjału. Prace nad stworzeniem dokładnego modelu quasigeoidy dla obszaru Polski trwają od 50 lat. Pierwszą astrograwimetryczną geoidę opracował w 1961 roku J. Bokun. Natomiast pierwsza grawimetryczna quasigeoida dla Polski została opracowana w 1993 r. przez autora tego artykułu. Najnowsze badania nad modelowaniem centymetrowej quasigeoidy z wykorzystaniem danych geodezyjnych, grawimetrycznych, astronomicznych, geologicznych i satelitarnych zostały wykonane w latach 2002-2005 przez zespół specjalistów reprezentujących różne dyscypliny nauk o Ziemi, koordynowany przez Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie, w ramach projektu badawczego KBN [patrz GEODETA 12/2005 – red.]. Dokładność bezwzględna uzyskanego modelu *quasi06a* oceniana jest na ± 4 cm, a po jej dopasowaniu do układu wysokościowego dokładność wzrasta do $\pm 2,1$ cm [Kryński, 2007].

Model quasigeoidy można również wyliczyć z modeli geopotencjału, które są wyznaczone z analizy orbit sztucznych satelitów Ziemi, z pomiarów grawimetrycznych wykonanych na powierzchni Ziemi i z danych altimetrycznych (pomiar odległości od satelity do powierzchni morza).



Rys. 1. Związek między odstępem geoidy N , wysokością elipsoidalną h oraz wysokością nad średnim poziomem morza H



Rys. 3. Punkty sieci EUREF-POL92 i POLREF

Obecnie jest tylko kilka ośrodków w Europie i w USA, które opracowują i publikują globalne modele pola siły ciężkości. Pierwszy geopotencjalny model do stopnia $n_{max} = 8$ wyznaczony z danych lądowych został opracowany przez Żongołowicza w 1956 r. Drugi model, również do stopnia $n_{max} = 8$, wyznaczony z danych satelitarnych, został obliczony w Smithsonian Institute w 1966 roku. Modele te umożliwiały wyliczenie odstępów geoidy/quasigeoidy od elipsoidy z dokładnością ± 10 m. Od tamtej pory dokonano znacznego postępu w jakości publikowanych modeli geopotencjału.

Poczynając od 1978 roku opracowano wiele modeli do stopnia i rzędu 180 (i wyższych), a w 1985 roku opublikowano modele OSU86E/F, które zostały wyznaczone do stopnia i rzędu 360. Przedostatni model o nazwie EGM96 stopnia $n_{max} = 360$ został opublikowany w 1996 roku i charakteryzuje się dokładnością ± 19 cm na terenie Polski, czyli 10 razy gorszą niż ostatni model grawimetryczny *quasi06a*. Natomiast w roku 2008 został opublikowany model EGM08 do stopnia $n_{max} = 2190$, powodując dziejowy przełom w geodezji. Jego dokładność – jak to zostanie wykazane – jest porównywalna z dokładnością żmudnie przez lata tworzonych grawimetrycznych modeli quasigeoidy na terenie Polski.

• EGM08 W INTERNECIE

Model EGM08 wraz z oprogramowaniem do jego obsługi opublikowano na stronie <http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/index.html>. Współczynniki modelu podane są w dwóch wersjach, a mianowicie: uwzględniającej tzw. zerowy model pływów i wolnej od wszelkich pływów (zalecanej do stosowania w praktycznych obliczeniach). Dodatkowo załączony jest program HARMONIC_SYNT (w wer-

sji źródłowej w Fortranie) umożliwiające obliczenie odstępów geoidy od elipsoidy oraz innych charakterystyk pola siły ciężkości, np. odchył pionu. Program ten jest dosyć skomplikowany i jego obsługa wymaga dużej wiedzy z zakresu geodezji fizycznej. Trudności te można jednak łatwo ominąć, gdyż autorzy modelu EGM08 wyliczyli dla całego globu ziemskiego odstęp quasigeoidy w węzłach siatki $1' \times 1'$ i $2,5' \times 2,5'$, dołączając do nich odpowiednie programy do interpolacji. Ponieważ zbiory te są bardzo duże i nieporęczne w praktycznych zastosowaniach, opracowano także program umożliwiające wycięcie z globalnej siatki danych dla konkretnego obszaru, np. Polski. Zbiór takich odstępów uzyskany dla obszaru $49^\circ < \varphi < 55^\circ$, $14^\circ < \lambda < 24^\circ$ przedstawiono na rys. 2.

• DOKŁADNOŚĆ EGM08

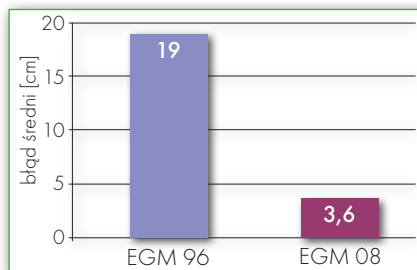
Do oceny dokładności modelu EGM08 na terenie Polski wykorzystano geometryczne odstęp quasigeoidy od elipsoidy $\zeta^{gps/niw}$ otrzymane z satelitarnych pomiarów GPS i niwelacji precyzyjnej na punktach sieci POLREF. Sieć ta składa się z 360 punktów pomierzonych w trakcie trzech kampanii przeprowadzonych w latach 1994-95. Poprzez niwelację precyzyjną punkty sieci zostały także włączone do państwowego układu wysokościowego (Kronszad86).

W celu określenia dokładności quasigeoidy z modelu EGM08 na punktach sieci POLREF wyliczono różnice:

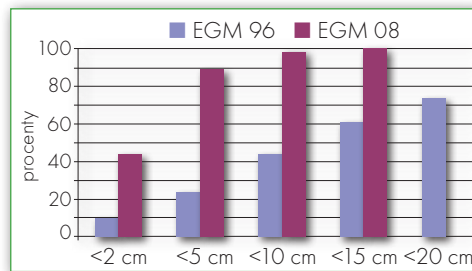
$$\Delta_i = N_i^{gps/niw} - N_i^{EGM08} \quad (3),$$

gdzie $N_i^{gps/niw}$ jest odstępem geoidy od elipsoidy wyliczonym z obserwacji GPS i niwelacji precyzyjnej, N_i^{EGM08} – odstępem geoidy od elipsoidy wyliczonym z modelu EGM08.

Wartość średnia oraz empiryczne odchylenie standardowe tak wyznaczonych różnic dla modelu EGM08 wynosi odpowiednio: $-12,5$ cm i $\pm 3,6$ cm. Dla poprzedniego modelu, tj. EGM96, wartości te osiągały: -53 cm i ± 19 cm (rys. 4).



Rys. 4. Statystyczne charakterystyki odchyłek $\zeta^{gps/niw} - \zeta^{EGM08}$ na 360 punktach sieci POLREF



Rys. 5. Procentowy udział 360 absolutnych wartości odchyłek Δ_i nieprzekraczających ustalonych poziomów dokładności quasigeoidy (po usunięciu wartości średniej)

Oznacza to, że model EGM08 jest 5 razy dokładniejszy niż EGM96 oraz że dokładności EGM08 i ostatnio opracowanego w Polsce modelu grawimetrycznego *quasi06a* są prawie identyczne.

Na rys. 5 podano procentowy udział punktów sieci POLREF, których bezwzględne odchyłki Δ_i (po usunięciu wartości średniej) nie przekraczają ustalonych poziomów dokładności quasigeoidy. Zgodność między modelem EGM08 a geometrycznymi odstępami $\zeta^{gps/niw}$ jest lepsza niż 2 cm dla 40% punktów wszystkich 360 punktów sieci, podczas gdy dla poprzedniego modelu zgodność ta była na poziomie 9%. Ponadto 97% punktów ma odchyłki mniejsze niż 10 cm (w przypadku EGM96 tylko 44% punktów spełnia ten warunek).

• DOPASOWANIE DO UKŁADU WYSOKOŚCIOWEGO

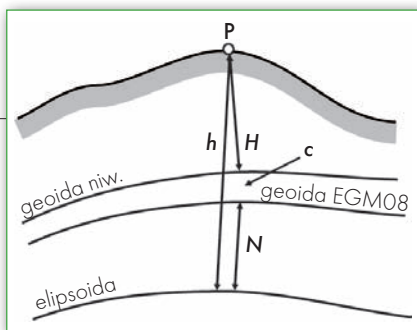
Przytoczony na wstępie artykułu wzór $h = H + N$ został wyprowadzony przy założeniu, że występujące w nim wielkości odniesione są do wspólnego układu odniesienia. Należy pamiętać, że układ taki jest stworzony poprzez definicje i pomiary. W praktyce błędy systematyczne lub różnice w definiowaniu układów występują we wszystkich trzech elementach składowych wzoru, a mianowicie w wysokości elipsoidalnej δh , wysokości względem średniego poziomu morza δH oraz geoidy δN , co można zapisać w następujący sposób:

$$h + \delta h = (H + \delta H) + (N + \delta N) \quad (4).$$

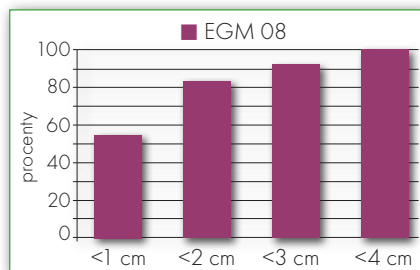
Formalnie wzór 4 można przekształcić do postaci:

$$h = H + N + (\delta H + \delta N - \delta h) = H + N + c \quad (5).$$

Oznacza to, że transformacja wysokości elipsoidalnych na wysokości względem poziomu morza według wzoru (2) nie jest poprawna, gdyż jest obciążona pewnym zmiennym czynnikiem c , który dla obszaru Polski osiąga wartość nawet kilku decymetrów. Wyznaczenie te-



Rys. 6. Rozbieżności między geoidami wyznaczanymi różnymi technikami



Rys. 7. Procentowy udział 44 absolutnych wartości odchyłek v_i (otrzymanych z równania 6) nieprzekraczających ustalonych poziomów dokładności quasigeoidy

go czynnika nazywa się dopasowaniem modelu geoidy EGM08 do krajowego układu wysokościowego, czyli tak zwanej geoidy niwelacyjnej (rys. 6).

W literaturze są znane liczne sposoby wyznaczenia czynnika korekcyjnego c występującego we wzorze (5). W niniejszej pracy zostały zaprezentowane wyniki wyznaczenia „powierzchni korekcyjnej” c z następującego modelu:

$$a_0 + a_1 \cos \varphi_i \cos \lambda_i + a_2 \cos \varphi_i \sin \lambda_i + a_3 \sin \varphi_i + \Delta_i = v_i \quad (6)$$

gdzie a_0, a_1, a_2, a_3 są parametrami wyliczonymi metodą najmniejszych kwadratów.

Wyznaczenie czterech parametrów transformacji dokonano na podstawie danych z 360 punktów sieci POLREF. Jakość dopasowania tak utworzonej „korekcyjnej powierzchni” oceniono na 44 superprecyzyjnych punktach trawersu GPS założonego, pomierzonego i obliczonego przez IGiK w latach 2003-04 [Kryński i in., 2005]. Z przeprowadzonej oceny wynika, że zgodność między dopasowanymi powierzchniami wyrażona za pomocą empirycznego odchylenia standardowego wynosi $\pm 1,5$ cm (tab. 1) Oznacza to, że tak utworzona „powierzchnia korekcyjna” umożliwia na obszarze Polski transformację wysokości elipsoidalnych na wysokości normalne w układzie

Kronsztad86 (i odwrotnie) z błędem około 1,5 cm, czyli nieco lepiej niż przy użyciu precyzyjnej quasi-geoidy grawimetrycznej *quasi06a*.

Niezwykle interesujące informacje zawiera rys. 7, przedstawiający procentowy udział 44 punktów trawersu, których odchyłki nie przekraczają ustalonych poziomów dokładności quasigeoidy. Zgodność między modelem EGM08 a geometrycznymi odstępami $\zeta_{GPS/niw}$ jest lepsza niż ± 1 cm dla więcej niż 55% punktów. Prawie 93% punktów daje zgodność lepszą niż ± 3 cm, a 100% punktów – lepszą niż ± 4 cm.

Oprócz testów dotyczących absolutnej dokładności geoidy EGM08, które zostały przedstawione powyżej, przeprowadzono również testy umożliwiające określenie względnej dokładności modelu EGM08.

W tym celu różnice odstępów geoidy z pomiarów GPS i niwelacji porównano z różnicami odstępów geoidy z modelem EGM08, co można wyrazić za pomocą wzoru

$$\Delta N_{ij}^{GPS} - \Delta N_{ij}^{EGM08} = (h_j - H_j - h_i + H_i) + -(N_j^{EGM08} - N_i^{EGM08}) \quad (7)$$

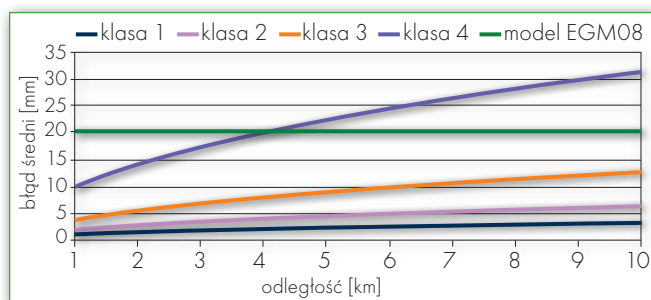
Z porównania wykonanego dla poszczególnych boków trawersu wynika, że dla linii o długość od 0,5 do 13 km (w takich granicach zawierały się boki trawersu) błąd średni wyznaczenia różnicy geoidy z modelem EGM08 jest rzędu ± 2 cm, co daje względną dokładność wyznaczenia różnicy rzędu 5×10^{-5} .

● EGM08 DOKŁADNY, ALE WYMAGA BADAŃ

Wyniki badań testowych pokazały, że model EGM08 jest najdokładniejszym modelem ze wszystkich istniejących modeli geopotencjału dla obszaru Polski. Dokładność geoidy/quasigeoidy obliczona z modelu EGM08 jest porównywalna z obecnym rozwiązaniem grawimetrycznym, które charakteryzuje się dokładnością nieznacznie poniżej ± 2 cm. Przeciętny poziom niezgodności między wysokościami elipsoidalnymi, normalnymi i odstępem quasi-geoidy z modelem EGM08 jest na poziomie $\pm 1,5$ cm (tabela 3) i odzwier-

ciadla głównie regionalne efekty błędów współczynników harmonik sferycznych, jak również innych błędów systematycznych pochodzące z definicji i realizacji układu wysokościowego.

Podobnej dokładności modelu EGM08 należy spodziewać się na obszarach Europy Zachodniej, Stanów Zjednoczonych Ameryki i Kanady, czyli wszędzie tam, gdzie istnieje duża liczba naziemnych pomiarów grawimetrycznych. W Afryce, gdzie znaczna część kontynentu nie jest pokryta pomiarami grawimetrycznymi,



Rys. 8. Porównanie dokładności wyznaczenia różnicy wysokości z niwelacji geometrycznej i niwelacji satelitarnej przy wykorzystaniu modelu geoidy EGM08 na terenie Polski

dokładność modelu EGM08 będzie kilka razy mniejsza. Mimo to geoida EGM08 jest pierwszą globalną geoidą, która może posłużyć jako powierzchnia odniesienia globalnego układu wysokościowego.

Prezentowane wyniki badań są obiecującym dowodem na możliwość pomyślnego użycia modelu EGM08 w geodezyjnych zastosowaniach na obszarze Polski. Z przeprowadzonych badań wynika, że przy odległościach większych niż 4 km niwelację geometryczną klasy 4 można zastąpić niwelacją satelitarną, w której odstęp geoidy od elipsoidy jest wyliczany z modelem EGM08 (rys. 8).

Jednak w celu użycia tego modelu w praktycznych zastosowaniach konieczne są dalsze badania nad jego dopasowaniem do istniejącego układu wysokościowego, aby można było transformować wysokości elipsoidalne na wysokości normalne i odwrotnie na poziomie ± 1 cm.

PROF. ADAM ŁYSZKOWICZ
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

LITERATURA

- Kryński J., Cisak J., Figurski M., Mańk M., Bieniewska H., Moskwiński M., Sękowski M., Zanimoskiy Y., Żak Ł., 2005: GPS survey of control traverses and eventual link of the traverse sites to the vertical control with levelling as well as data processing (in Polish), Institute of Geodesy and Cartography, Report for the Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw;
- Kryński, 2007: Precyzyjne modelowanie quasigeoidy na obszarze Polski - wyniki i ocena dokładności, IGiK, seria monograficzna nr 13.

TAB. 1. STATYSTYCZNE CHARAKTERYSTYKI ODCHYLEK $N_{GPS/NIW} - N_{EGM08}$ NA 44 PUNKTACH TRAWERSU [M]

	średnia	odch. stand.	min.	maks.
EGM08 ($n_{max}=2190$)	0,000	0,015	-0,035	0,035