

Roman Kadaj

GEOIDPOL-2008C ulepszony model quasi-geoidy dla obszaru Polski utworzony przez kalibrację modelu geopotencjalnego EGM2008 na sieciach ASG-EUPOS i EUVN.

[Publikacja internetowa 3/2012 © ALGORES-SOFT, www.geonet.net.pl, 30 września 2012]

1. Wstęp

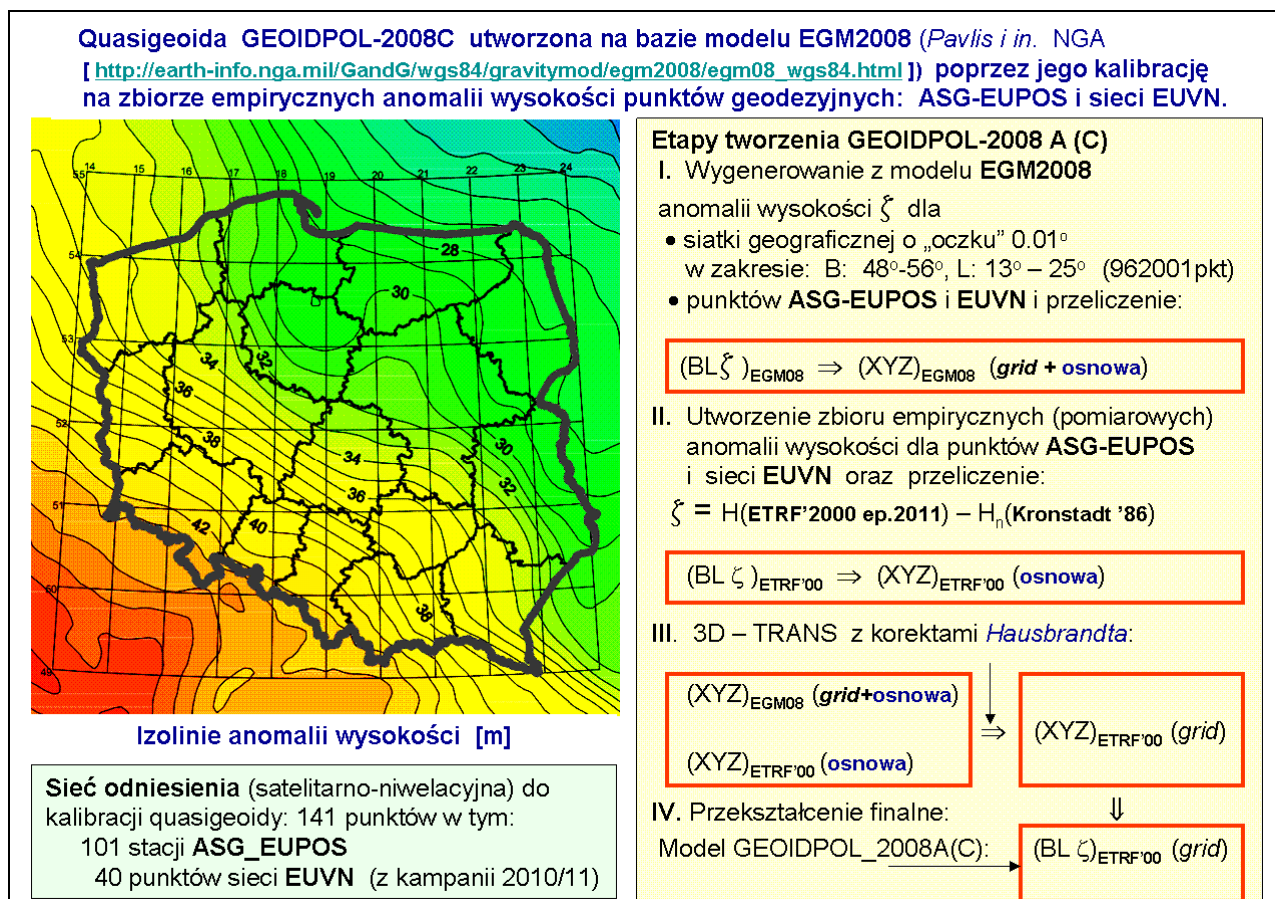
Niniejsza publikacja internetowa wraz z dołączonym programem testowym (**GEOIDPOL_2008C.exe** + plik binarny **geoidpol_2008c.bin**) jest wynikiem kolejnego etapu badań nad wykorzystaniem globalnego modelu geopotencjalnego **EGM-2008** (*Pavlis* i in., 2008a, 2008b, 2011) oraz wyników najnowszych kampanii pomiarowych integrujących sieć ASG-EUPOS z osnowami podstawowymi, do konstrukcji optymalnego modelu polskiej quasi-geoidy.

W porównaniu z poprzednim modelem (**GEOIDPOL_2008A**), gdzie wykorzystano gotową siatkę undulacji modelu **EGM2008**, o rozdzielczości 1- minutowej (opublikowaną na stronie **NGA**), obecnie dokonano niezależnego wyznaczenia anomalii wysokości tego modelu dla zadanej siatki geograficznej o rozdzielczości 0.01° (w zakresie szerokości **B** od 48° do 56° i długości **L** od 23° do 25°), czyli dla **962001** węzłów. Wykorzystano w tym celu pełny zakres rozwinięcia potencjału w szereg harmonicznych sferycznych do stopnia i rzędu **2159** (+uzupełnienia). Analogicznie wyznaczono również anomalie wysokości dla zbioru punktów satelitarno-niwelacyjnych, t.j. dla **101** punktów – stacji **ASG-EUPOS** oraz **40** punktów sieci **EUVN**.

Do kalibracji modelu quasigeoidy wybrano więc ten sam zbiór punktów co w przypadku modelu **GEOIDPOL_2008A**, ale wówczas posłużono się interpolowanymi wartościami undulacji z siatki minutowej modelu geoidy **EGM2008**. Poprzez trójwymiarowe transformacje i korekty *Hausbrandta* wpasowano je w układ empirycznych (pomiarowych) anomalii wysokości na punktach geodezyjnych, realizując równocześnie przy tych samych parametrach transformacji przekształcenie siatki modelu **EGM2008** w skalibrowany model quasigeoidy.

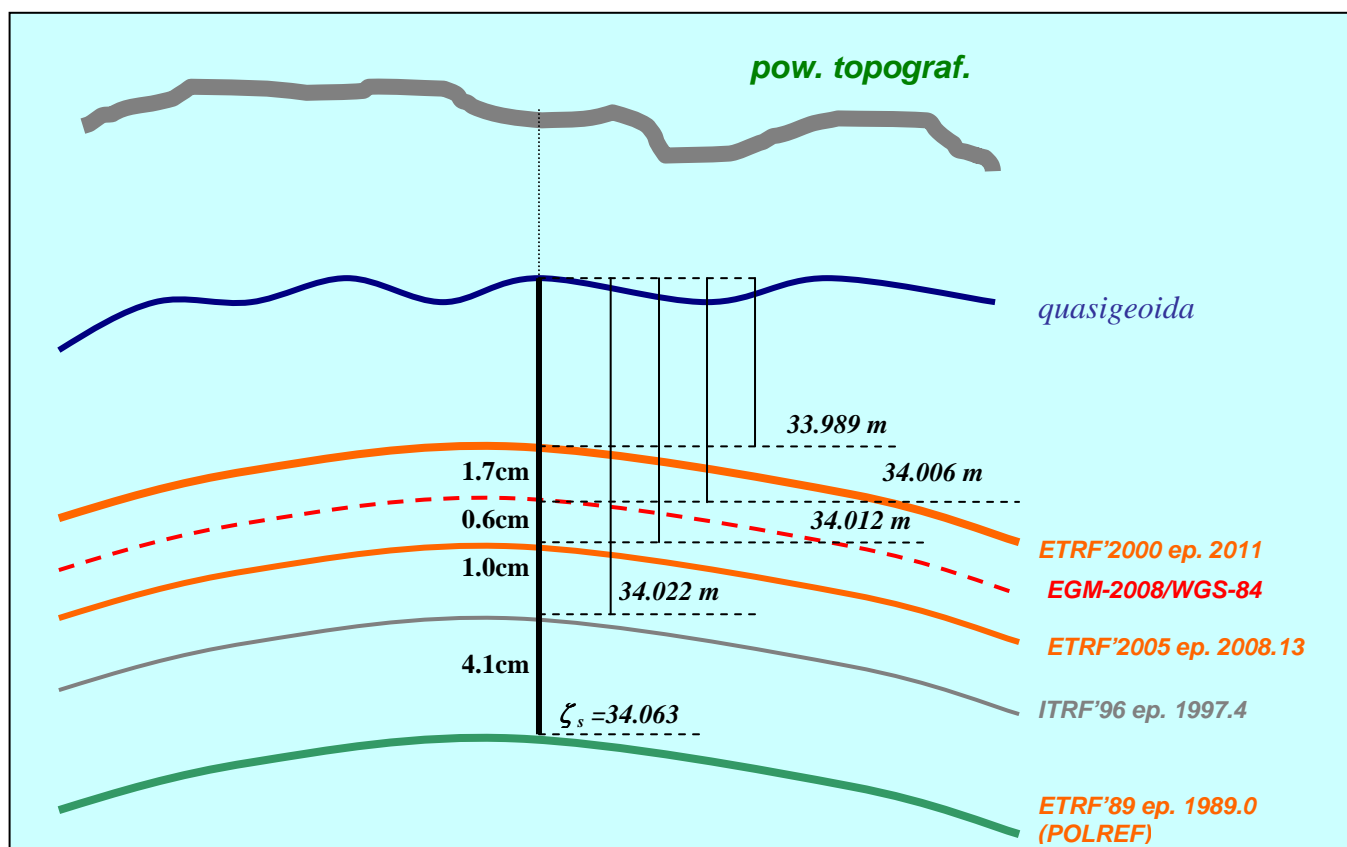
Obecnie, transformując zbiór anomalii wysokości modelu **EGM2008** na zbiór empirycznych (pomiarowych) anomalii wysokości osnowy (stosując analogiczny algorytm transformacji i korekt – rys. 1) uzyskano model quasigeoidy (**GEOIDPOL_2008C**), który statystycznie lepiej pasuje do niwelacji w obszarach górskich, ale przeciętnie (dla obszaru całej Polski) odchyła się od modelu poprzedniego nieznacznie, o wartość kilku milimetrów.

Trzeba podkreślić, że kalibracja modelu **EGM2008** na empiryczne anomalie wysokości wyznaczone dla sieci satelitarno niwelacyjnych daje zawsze „produkt” silnie zależny od jakości (dokładności i poprawności) wyznaczeń wysokości normalnych. O ile można mieć pełne zaufanie do dokładności wyznaczeń wysokości elipsoidalnych (warunki techniczne ostatniej kampanii pomiarowej, integrującej sieć **ASG-EUPOS** z osnowami podstawowymi i uzyskane wyniki wskazują na wysoką, kilkumilimetrową dokładność tych wyznaczeń), to w kwestii pomiarów niwelacyjnych nasuwają się różne wątpliwości co do zupełnej poprawności wykorzystywanych wysokości normalnych w układzie **Kronstadt’86**. Wysokości niwelacyjne **101** stacji **ASG-EUPOS** wyznaczono pośrednio poprzez przeniesienie wysokości niwelacją satelitarną z punktów ekscentrycznych, które zostały wcześniej zaniwelowane w nawiązaniu do punktów I lub II klasy osnowy wysokościowej. Teoretycznie, punkty nawiązania były ongiś wyznaczone stosowną do klasy osnowy niwelacją o dokładności 1-2 mm /km, ale dokładność bezwzględna w stosunku do bazowych reperów odniesienia ma już (niestety) poziom centymetrów. Wątpliwości dotyczą stabilności niektórych reperów osnowy I lub II klasy, do których nawiązywane były stacje (m.in. w okolicach Przemyśla). Tak, czy inaczej, wyznaczona finalnie quasigeoida jest związana ściśle z takim układem wysokościowym Kronstadt’86, jaki mamy obecnie do dyspozycji, wraz z jego wszystkimi pozytywnymi i wadami.



Rys. 1. Schemat obliczeniowy procesu kalibracji modelu geopotencjalnego EGM2008, w zakresie anomalii wysokości, na zbiorze punktów satelitarno-niwelacyjnych (sieci ASG-EUPOS i EUVN).

Na rys. 2 przedstawiono średnie dla 141 punktów osnowy (stacje **ASG-EUPOS +EUVN**) anomalie wysokości ζ_s wyznaczone jako różnice wysokości elipsoidalnych H^e (w różnych układach odniesienia) i wysokości normalnych H^n w układzie **Kronstadt'86**. Ponieważ wysokości elipsoidalne w różnych układach odniesienia są różne, więc definiowane empirycznie anomalie wysokości zależą od przyjętego układu geometrycznego. Przykładowo, anomalie wysokości w układzie **ETRF'89** (PL) przyjętym dla sieci **POLREF + EUREF-POL+EUVN** (w latach 90-tych) różnią się od anomalii wysokości w układzie **ETRF'2005 na epokę 2008.13** (aktualnie stosowanym w systemie **ASG-EUPOS**) ze względu na zmiany wysokości elipsoidalnych przeciętnie o ok. **5 cm**.



Rys. 2. Średnie anomalie wysokości dla 141 punktów w różnych układach odniesienia

Z powyższego wynika, że jeśli porównuje się różne modele quasigeoidy, trzeba je najpierw sprowadzić do wspólnego układu wysokości elipsoidalnych, poprzez zastosowanie odpowiednich formuł trójwymiarowej transformacji pomiędzy układami. W przeciwnym razie takie porównania nie mają sensu, gdyż są obarczone błędem systematycznym.

Podobna kwestia dotyczy zastosowania modelu quasigeoidy do zadania niwelacji satelitarnej. Interpolowane z siatki modelu anomalie lub różnice anomalii wysokości powinny się odnosić do tego samego układu odniesienia, w którym są mierzone wysokości lub różnice wysokości elipsoidalnych. W przeciwnym razie zadanie będzie obarczone błędem systematycznym, istotnym zwłaszcza w przypadku wyznaczeń bezwzględnych (przeliczanie wysokości elipsoidalnych na normalne). Błąd modelu będzie eliminowany tylko w lokalnych pomiarach względnych, gdy operujemy różnicami wysokości ale tylko dla wektorów co najwyżej kilkukilometrowych.

Model **GEOIDPOL-2008C** został utworzony w układzie **ETRF'2000 /ep. 2011**. Program

GEOIDPOL_2008C.exe , który aplikuje ten model zawiera wewnętrzne procedury transformacyjne pozwalające określać anomalie wysokości także w dwóch innych układach:

- 1) ETRF'89 (PL) w przypadku nawiązań do sieci POLREF
- 2) ETRF'2005 na epokę 2008.13 w przypadku aktualnych nawiązań do stacji ASG-EUPOS.

Zgodnie z nowym Rozporządzeniem Rady Ministrów w sprawie Państwowego Systemu Odniesień Przestrzennych, z dnia 14.11.2012, poz.1247, obowiązującym układem odniesienia będzie układ ETRF'2000 na epokę 2011 (jest to zatem układ bazowy quasigeoidy **GEOIDPOL_2008C**).

2. Wyniki kalibracji modelu EGM-2008 na 141 punktach sieci satelitarno-niwelacyjnych - stacjach ASG-EUPOS i punktach EUVN.

Dla 962001 punktów siatki geograficznej oraz 141 punktów sieci satelitarno-niwelacyjnych o wiadomych współrzędnych geodezyjnych B,L wyznaczono anomalie wysokości ζ (EGM-2008), tworząc zbiór punktów quasigeoidy EGM-2008 $\{(B, L, \zeta)\}$, który przeliczono następnie na współrzędne kartezjańskie $\{(X,Y,Z)\}_{EGM2008}$. Z drugiej strony, dla tych samych 141 punktów satelitarno-niwelacyjnych dysponowano empirycznymi (pomiarowymi) anomaliami wysokości czyli różnicami wysokości elipsoidalnych w układzie ETRF'2000/ep. 2011 i wysokości normalnych w układzie Kronstadt'86. W analogiczny sposób utworzono więc odpowiedni zbiór współrzędnych geodezyjnych i kartezjańskich w układzie ETRF'2000: $\{(X,Y,Z)\}_{ETRF'2000}$. Wykonano następnie trójwymiarową transformację konforemną, przekształcając całą siatkę geograficzną do układu ETRF'2000, przy wykorzystaniu 141 punktów dostosowania.

$$\{(X,Y,Z)\}_{EGM2008} \Rightarrow \{(X,Y,Z)\}_{ETRF'2000}$$

Tab. 1. Wyciąg z raportu komputerowego transformacji (system GEONET – program TRANS-3D):

FORMUŁA TRANSFORMACJI

(wskaznik 1 oznacza układ pierwotny, 2 – układ aktualny):

$$\begin{aligned} [X_1, Y_1, Z_1] &\Rightarrow [X_2, Y_2, Z_2] \\ [B_1, L_1, \zeta_1]_{EGM2008} & [B_2, L_2, \zeta_2]_{ETRF'2000} \end{aligned}$$

Wyznaczone parametry transformacji trójwymiarowej:

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + (-0.0097) + (-0.0000000233) * DX + (0.0000003335) * DY + (-0.0000005214) * DZ; \\ Y_2 &= Y_1 + (-0.0031) + (-0.0000003335) * DX + (-0.0000000233) * DY + (-0.0000006386) * DZ; \\ Z_2 &= Z_1 + (-0.0135) + (0.0000005214) * DX + (0.0000006386) * DY + (-0.0000000233) * DZ; \\ DX &= X_1 - X_{S1}; \quad DY = Y_1 - Y_{S1}; \quad DZ = Z_1 - Z_{S1}; \\ X_{S1} &:= 3702867.3121 \quad Y_{S1} := 1315710.5245 \quad Z_{S1} := 5001712.2324 \end{aligned}$$

Średniokwadratowe odchyłki współrzędnych:

$$S_x = 0.0130 \quad S_y = 0.0046 \quad S_z = 0.0172$$

Ochyłki bezwzględnie maksymalne:

NWSC	0.0331	0.0124	0.0408	***	
PRZM	-0.0360	-0.0147	-0.0467	***	*)
ZYWI	0.0428	0.0144	0.0528	***	
003	0.0418	0.0158	0.0519	***	EUVN GRYBÓW

*) Stwierdzono błędności w wysokościach reperów II klasy, do których stacja PRZM była nawiązana

Na podstawie otrzymanych odchyłek transformacji można wnioskować, że dokładność wpasowania modelu **EGM-2008** do empirycznych anomalii wysokości w układzie **ETRF'2000/ep.2011**, mierzona średniokwadratową odchyłką wertykalną jest na poziomie nie przekraczającym 2 cm (na to składa się nie tylko błąd modelu EGM2008 lecz także błędy wyznaczeń wysokości niwelacyjnych i w mniejszym stopniu błędy pomiarów GNSS).

W konstrukcji siatki modelu **GEOIDPOL_2008C** zastosowano dodatkowo lokalne korekty *Hausbrandta* dla wszystkich węzłów siatki położonych w obszarze Polski. Korekty te oznaczają wyrównanie odchyłek na punktach dostosowania z odpowiednią ich dystrybucją na punkty siatki. W ten sposób wyznaczone odwrotnie (na podstawie modelu) anomalie wysokości na punktach dostosowania są bliskie im wartościom empirycznym. Ten efekt ma istotne znaczenie przy wykonywaniu niwelacji satelitarnej w systemie **ASG-EUPOS** - stacje systemu są właśnie punktami dostosowania.

Wykonano test kontrolny na 353 punktach sieci **EUREF-POL+POLREF+EUVN** nie uczestniczących w tworzeniu modelu **GEOIDPOL_2008C** (wykluczono 7 punktów wskazanych jako błędne w kampanii pomiarowej 2010/11). Wynik porównania obliczonych modelowych anomalii wysokości z anomaliami empirycznymi jest następujący:

różnica średnich anomalii = 0.004 m
odchyłka średniokwadratowa = 0.021 m,
zakres odchyłek: < -0.056, 0.073 >

3. Programy komputerowe

Do niniejszej publikacji dołączone są programy (podane oddzielnie na stronie www.geonet.net.pl)

- Program **GEOIDPOL_2008C.exe** wraz z plikiem binarnym – siatką interpolacyjną modelu **geoidpol_2008C.bin** i danymi testowymi
- Program **trans_etrp_pl.exe** - do transformacji współrzędnych geocentrycznych pomiędzy różnymi stosowanymi w Polsce układami ETRF ***


```

TRANS   ETRF'2000/ep2011      =>   ETRF'89(PL)
        (nowy proponowany)      (POLREF)

procedure XYZ2011_XYZ1989(var x1,y1,z1,x2,y2,z2:extended);
  var xs1,ys1,zs1,dx,dy,dz: extended;
  begin
    XS1:= 3696865.52504;  YS1:= 1301613.55103;  ZS1:= 5009805.44696;
    dx := (X1-XS1)*0.00001;
    dy := (Y1-YS1)*0.00001;
    dz := (Z1-ZS1)*0.00001;
    X2 := X1 + ( 0.0345)+( 0.005948)*dx+( 0.001921)*dy+(-0.004966)*dz;
    Y2 := Y1 + ( 0.0374)+(-0.001921)*dx+( 0.005948)*dy+(-0.008406)*dz;
    Z2 := Z1 + ( 0.0555)+( 0.004966)*dx+( 0.008406)*dy+( 0.005948)*dz;
  end;

```

Dodatkowe opisy funkcjonalne programów są dostępne w oknie każdego programu pod panelem INFO.

Literatura

Wykaz wykorzystanych materiałów źródłowych i literatury podany w poprzednich publikacjach internetowych 1/2000, 2/2000 dotyczących modeli GEOIDPOL_2008, GEOIDPOL_2008A na stronie: www.geonet.net.pl