

Получена: 22.12.2017 г.

Приета: 28.05.2018 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕВРОПЕЙСКИ МОДЕЛ НА ГЕОИДА EGG2015 ЗА ОГРАНИЧЕН РАЙОН ОТ ТЕРИТОРИЯТА НА Р МАКЕДОНИЯ

Е. Пенева¹, С. Господинов², А. Постоловски³

Ключови думи: модел на геоида, EGG2015, GPS/нивелация

РЕЗЮМЕ

Изследвана е точността на Европейския модел на геоида EGG2015 за част от територията на Македония, попадаща в района на град Скопие (в диапазона от 41°51' до 42°09' географска ширина и от 21°20' до 21°40' географска дължина). Оценката на точността е извършена с данни от GPS/нивелация за 41 точки от линии от Държавната нивелачна мрежа на Р Македония, попадащи в изследвания район. Оценката на точността показва средна квадратна грешка на разликите между GPS/нивелацията и геоидните височини на EGG2015 от порядъка на 0,381 m. Направен е анализ за възможните причини за полученото систематично отместване. Ондулацията на геоида от модела EGG2015 е сравнена и с глобалните геопотенциални модели на геоида EGM2008 и EIGEN6с4. Получените резултати показват добра съгласуваност между Европейския и глобалните модели – средната квадратна грешка на разликите между геоидните височини на EGG2015 и EGM2008 е 0,068 m, а между EGG2015 и EIGEN6с4 е 0,044 m.

1. Въведение

В статията се прави преглед на ползваните координатни системи в Р Македония. Последните две десетилетия са приети за ползване международно приетите референтни

¹ Елена Пенева, проф. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: peneva_el@yahoo.com

² Славейко Господинов, проф. д-р инж., кат. „Висша геодезия”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: sgospodinov@mail.bg

³ Александар Постоловски, д-р инж., GeoWILD MAK, Скопје, Македонија, e-mail: a.postolovski@geowildmak.com.mk

системи, като новите координатни системи са реализирани със съответните мрежи. Въз основа на въведените държавни мрежи и наличните данни за територията, трансформирани в приетите системи, се дискутира възможността за извеждане на модел на геоида за територията на страната. За част от територията са оценени височините на геоида, получени по метода GPS/нивелация, сравнени с европейския модел на геоида EGG15 и глобалния модел на геоида EGM08.

2. Държавни геодезически мрежи на територията на Република Македония

В Р Македония преди 2000 г. са ползвани координатни системи, представени със съществуващите тогава държавни геодезически мрежи: астрономо-геодезическата – плановата основна мрежа, височинната основна мрежа, известна като нивелачна мрежа с висока точност (НВТ1 и НВТ2) и основната гравиметрична мрежа (ОГМ71). Ползваните тогава геодезически референтни системи на мрежите са дефинирани по следния начин:

- Планова референтна система – основна точка *Hermannskogel*, негеоцентричен локален Беселов елипсоид и Гаус-Крюгера проекция.
- Височинна или вертикална референтна система – средното ниво на Адриатическо море в Триест, мареографна станция *mol.Sartorio*, епоха 1875 и нормални ортометрични височини.
- Гравиметрична референтна система – Потсдамска система, от 1971 г., свързана с IGNS71 (*International Gravity Standardization Network 1971*).

Ползваните в миналото референтни системи са спрямо приетите за ползване в бившите Югославски републики основни геодезически мрежи.

Съвременната история на Агенцията по кадастър на РМ се бележи с обновяване на референтните и координатните системи в унисон със съвременните изисквания. В рамките на различни проекти, финансирани от *Japanese International Cooperation Agency JICA* (JICA), от Световната банка и др. са реализирани много дейности за привързване на съществуващите „локални“ геодезически мрежи с „глобалните“ европейски и световни такива, с ползване на съвременни техники и методи за измерване.

Основните етапи, свързани с развитието на съвременните геодезически мрежи в РМ, са следните:

- 1996 – EUREF MAK'96 GPS кампания, в която са измерени всички точки от съществуващата референтна основа 1-ви клас (35 точки).
- 1997 – UELN'97 – свързване на Държавната нивелачна мрежа с Европейската нивелачна мрежа, чрез GPS измервания.
- В рамките на JICA проекта са изработени на цифрови карти в мащаб 1:25000, през 2004 г. е реализирана GPS мрежа от 63 точки, с подходящо разпределение на цялата територия на държавата. В по-късните етапи на развитие и съгъстяване на пасивната GPS мрежа са реализирани още две кампании през 2009 и 2010 г., като допълнително са стабилизирани и измерени 104 точки.
- Съгласно проучването за развитие на референтна GNSS основа за Република Македония, изработено от проф. д-р. Стојанчо Вучков през 2008 г.

Агенцията за кадастър започва реализация на проекта МАКПОС (МАКе-донска ПОозиционираща Система). Проектът е реализиран в три фази: В началото на 2008 г. са поставени контролен център в Скопие и първите 5 станции в градовете Скопие, Тетово, Велес, Кичево и Прилеп, с което е започнало използването на тест-мрежата. През втората фаза са създадени две допълнителни станции в градовете Битоля и Охрид, като за станция в Охрид е приета вече съществуващата IGS/EPN станция, която е построена през 2000 година. С приключването на третия етап са поставени още 7 станции в градовете Дебър, Куманово, Крива Паланка, Винаца, Неготино, Берово и Валандово, с което е възстановено пълното покритие на територията на страната.

- В периода 2012 – 2013 год. е реализиран проект за стабилизиране на нови нивелачни репери и е реализирана прецизна нивелация по тях. Проектът обхваща цялата страна с общо 1143 нивелачни репера.
- През 2012 и 2013 г. проблемът за трансформиране на глобалните координати в Държавната система по положение е разрешен, а към момента все още не е приет подходящ метод за трансформация на височините.

2.1. Координатни системи и Държавни геодезически мрежи в Република Македонија

2.2.1. Държавна планова мрежа

Държавната планова мрежа се състои от 5 основни класа и Геодезически мрежи с местно предназначение (ГТМ). Основните класове са с означения: I – V Клас. Първи клас се състои от 33 точки (фиг. 1), част от 186-те точки, реализирани от бившата СФРЮ, през 1928 – 1934 г. От втори до пети клас разстоянието между точките е от 1,5 km до 3 km, реализирани са по триангулационни секции, като точността е от 0,15 m до 0,35 m.

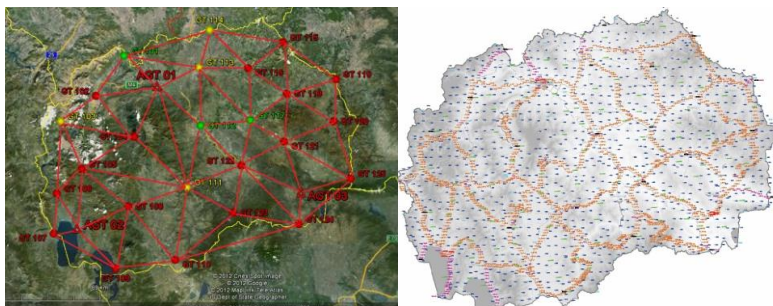




Фиг. 2. Държавна височинна мрежа Р Македния

2.2.3. Държавна гравиметрична мрежа

Новата Държавна гравиметрична мрежа се състои от три класа: нулев, първи и втори клас. Нулевият клас е от 3 абсолютни точки, реализирани през 2010 г. Първи клас е реализиран през 2013 г. и се състои от 25 точки с точност под 13 μGal . Втори клас е реализиран през 2014 г., състои се от 2310 точки с точност под 60 μGal .



Фиг. 3. Държавна гравиметрична мрежа 0-ев и I-ви клас и I-ви и II клас

2.2.4. Пасивна GPS мрежа

Пасивната GPS мрежа се състои от 63 точки, реализирана е през 2004 г. (фиг. 4). От тях 9 точки са от TM1, 20 точки са от ГТМ и 32 новопостроени точки. Точността им е от 4 mm до 12 mm. Мрежата е определена в реализация ITRF94, епоха 1996,6 и в ETRS89, епоха 1989,0. В периода 2009 – 2010 г. е извършено съгъстяване на мрежата с допълнителни 104 точки.



Фиг. 4. Пасивна GPS мрежа

2.2.5. Активна GNSS мрежа -МАКПОС

Мрежата МАКПОС се състои от 15 станции, реализирана е в 3 фази за периода 2008 – 2009 г. (фиг. 5). Мрежата е определена в реализация ITRF2008 и е представена в ETRS89, епоха 1989,0, за крайните потребители.



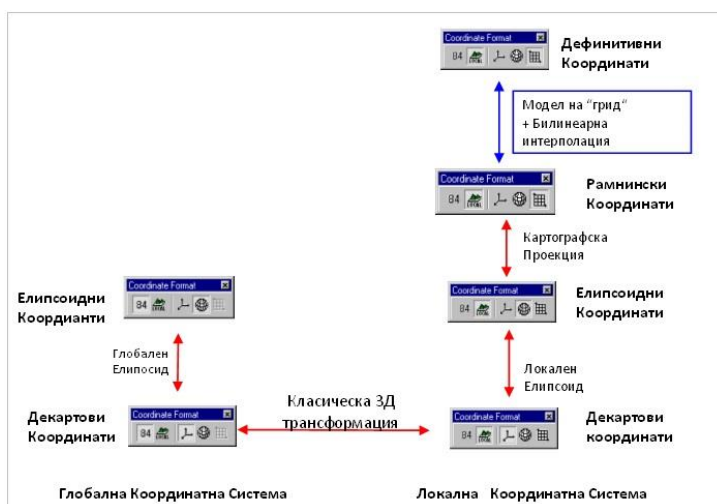
Фиг. 5. Активна GNSS мрежа -МАКПОС

2.2.6. Трансформация на координати

През 2013 г. е прието трансформирането на координатите по положение да се извършва чрез 3D трансформация с GRID корекции с точност +/- 10 cm за цялата страна. Методът е разработен чрез проект на Swedesurvey – „Estimation of coordinate transformation parameters and development of coordinate transformation service in R. Macedonia“, а е реализиран от д-р Драган Благојевић, вж. [4].

Приблизително същите резултати са получени и в докторската дисертация на тема „Хомогенизация на Държавната мрежа на Р Македония с предложение за трансформация на GNSS измервания в Държавната координатна система“, вж. [3].

Последователността за трансформиране е дадена на фиг. 6.



Фиг. 6. Трансформиране на координати

3. Модел на геоида за територията на Република Македония

Като се имат предвид наличните геодезически данни за Р Македония: топографски модел с висока резолюция (грид 5×5 m) и точност в М 1:5 000 и Държавните геодезически мрежи, описани в т. 2, следващият етап е извеждане на модел на геоида за територията на страната. Подходите за регионално моделиране на геоида са свързани с прилагането на метода Remove-Restore с изчисление по интегрални формули с бързи Фурие трансформации (FFT) или с прилагане на метода на колокацията по МНМК. Прилагането на метода Remove-Restore е свързано с ползване на глобален или континентален модел на геоида и гравитационното поле, налични представителни гравиметрични данни/модел за територията и топографски модел. С оглед на наличните данни за Р Македония прилагането на метода би довело до определяне на модел на геоида с висока точност. Препоръчително е да се приложи методът с колокацията по МНМК, особено ако не са налични данни за съседните държави.

Друг възможен подход за получаване на регионален модел на геоида е ползване на глобален или континентален модел, който да се оцени с площно разположени данни от GPS/нивелация с достатъчна гъстота, и на базата на данните от GPS/нивелация да се изведе височинна референтна повърхнина за територията на Р Македония, вж. [2].

В настоящата работа се прави оценка на Европейския модел на геоида EGG15, който се смята за най-представителният модел на геоида за Европа. Европейският модел на геоида може да се ползва както за извеждане на модел за страната по метода Remove-Restore, така и за извеждане на височинна референтна повърхнина, вж. [5, 6].

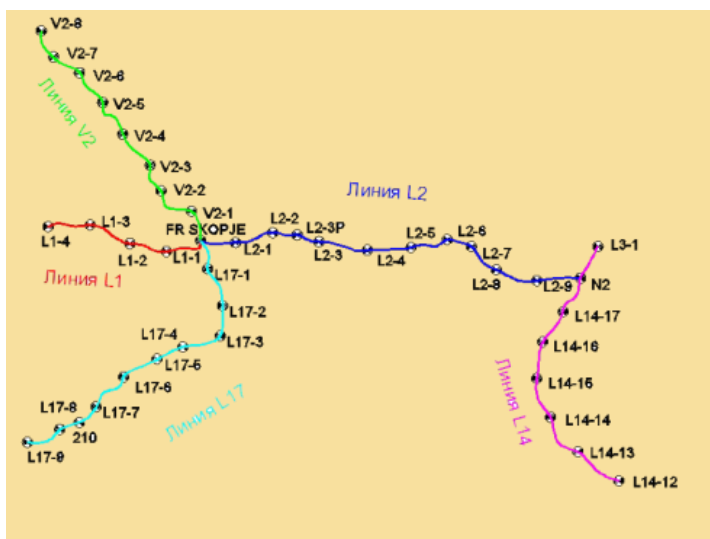
4. Изследване на модела на геоида EGG15 за част от територията на Република Македония

Моделът EGG15 е оценен за част от територията на Македония, с цел изследване на точността и приложимостта му.

Изследваният регион се намира в близост до гр. Скопие и обхваща границите от $41^{\circ}51'$ до $42^{\circ}09'$ северна ширина и от $21^{\circ}20'$ до $21^{\circ}40'$ източна дължина (фиг. 7). Ползвани са данните за реперите от Държавната нивелачна мрежа (нивелачна линия L2 и части от нивелачните линии L1, V2, L14 и L17), която съдържа и GPS определения (фиг. 8). Общият брой на точките по нивелачните линии в района е 41, като на всички тях са извършени GPS определения с точност в режим RTK: 2 cm – 4 cm и статичен режим 3 mm – 10 mm.



Фиг. 7. Изследван район



Фиг. 8. Нивелачни линии в изследвания район

4.1. Резултати от сравнение между височините на геоида от GPS/нивелация и тези от модел EGG15 за изследвания район

Получените минимални и максимални стойности за височините на геоида от GPS/нивелация и тези от модел EGG15, разликите между тях, средните им стойности за района и разликите им в метри са представени в табл. 1. Средната квадратна грешка, получена от разликите в 41 точки, е $\pm 0,381$ m.

Таблица 1. Сравнение между GPS/нивелация и EGG15 – 41 точки ДНМ Скопие

№	φ , deg	λ , deg	$N^{\text{GPS-lev}}$, m	N^{EGG15} , m	$\Delta N^{\text{GPS-lev-EGG15}}$, m
min	41,895	21,331	43,599	44,705	-1,567
max	42,091	21,675	45,018	45,168	-0,085
max-min	0,196	0,344	1,419	0,463	1,481
average	41,985	21,476	44,356	44,847	-0,491
sigma				$\sigma =$	0,381

4.2. Резултати от сравнение между височините на геоида от GPS/нивелация и тези от модел EGM08 за изследвания район

Поради получените големи отклонения между двата вида височини на геоида, представени в т. 4.1 и в табл. 1. Същото сравнение е направено и за глобалния модел на геоида EGM08, вж. [7]. В табл. 2 са представени аналогичните резултати като тези в табл. 1, но за модел EGM08. Средната квадратна грешка, получена от разликите в 41 точки за EGM08 е $\pm 0,385$ m, т.е. е в същия диапазон.

Таблица 2. Сравнение между GPS/нивелация и EGM08 – 41 точки ДНМ Скопие

№	φ , deg	λ , deg	$N^{GPS-lev}$, m	N^{EGM08} , m	$\Delta N^{GPS-lev-EGM08}$, m
min	41,895	21,331	43,599	44,319	-0,441
max	42,091	21,675	45,018	44,686	0,983
max-min	0,196	0,344	1,419	0,367	1,424
average	41,985	21,476	44,356	44,425	0,069
sigma				$\sigma =$	0,385

4.3. Резултати от сравнение между височините на геоида от модел EGG15 и EGM08 за района на изследване в точките с GPS/нивелация

В табл. 3 е представено сравнението по същите характеристики като в табл. 1 и табл. 2 за изследвания район по точките от ДНМ с GPS/нивелация. Резултатите показват добра съгласуваност между двата модела. Средната квадратна грешка, получена от разликите в 41 точки между модели EGG15 и EGM08, е $\pm 0,068$ m.

Таблица 3. Сравнение между EGG15 и EGM08 за района на изследване

№	φ , deg	λ , deg	N^{EGG15} , m	N^{EGM08} , m	$\Delta N^{EGG15-EGM08}$, m
min	41,895	21,331	44,705	44,319	0,337
max	42,091	21,675	45,168	44,686	0,583
max-min	0,196	0,344	0,463	0,367	0,246
average	41,985	21,476	44,847	44,425	0,422
sigma				$\sigma =$	0,068

4.4. Анализ на резултатите

Големите разлики във височините на геоида в точките от ДНМ в изследвания район и височините на геоида от моделите EGG15 и EGM08 се обясняват с груби грешки при GPS определенията в някои от подробните нивелачни репери. GPS определенията при възловите репери са с дефинираната точност в т. 4. Сравнението за възловите репери показва много добра съгласуваност между височините на геоида от двата модела и височините на геоида от GPS/нивелация. След внимателен анализ на GPS измерванията по нивелачните репери, без тези по възловите репери, данните от GPS/нивелация по точките от ДНМ за Р Македония биха могли да послужат за извеждане на високоточен регионален модел на геоида и/или височинна референтна повърхнина.

5. Заключение

Целта на настоящата статия е да се изтъкне, че са налични всички необходими данни за извеждане на регионален гравиметричен модел на геоида за Р Македония. Топографските и гравиметричните данни са с достатъчна гъстота и представителност. Авторите препоръчват ползване на Европейския модел на геоида EGG15, който показва малко по-добра представителност за района спрямо глобалния модел EGM08. GPS/нивелачните данни за територията на страната трябва да се прецизират и да са разпространени равномерно за цялата територия.

Благодарности

Авторите изказват своята благодарност на Агенцията по кадастър на Р Македония за предоставените данни за изследването.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вучков, С. Студија за развој на референтна GNSS основа во Р Македонија. 2008.
2. Пенева, Е., Георгиев, И. Сравнение на гравиметричен модел на геоида с данни от GPS/нивелация за територията на Югозападна България. Висша геодезия, Книга 17, Българска академия на науките, София, 2006.
3. Постоловски, А. Хомогенизација на Държавната мрежа на Р Македония с предложение за трансформација на GNSS измервания в Държавната координатна система“. Докторска дисертација, УАСГ, 2013.
4. Blagojevic, D. Estimation of coordinate transformation parameters and development of coordinate transformation service in R. Macedonia. 2012.
5. Denker H. et al. The Development of the European Gravimetric Geoid Model EGG07. In: Sideris M.G. (eds) Observing our Changing Earth. International Association of Geodesy Symposia, vol 133. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
6. Denker, H., J.-P. Barriot, R. Barzaghi, R. Forsberg, J. Ihde, A. Kenyeres, U. Marti, I. N. Tziavos. Status of the European Gravity and Geoid Project EGGP. IAG Symposia 129:125-130, Springer Verlag, 2005.
7. Pavlis, N. K. Earth Gravitational Model Advances. GEOINT Sciences. Pathfinder NGA, November/December 2008 Vol. 6 No. 6, p. 11-13, 2008.

STUDY OF THE EUROPEAN GEOID MODEL EGG2015 FOR A LIMITED AREA FROM THE TERRITORY OF MACEDONIA

E. Peneva¹, S. Gospodinov², A. Postolovski³

Keywords: geoid model, EGG2015, GPS/levelling

ABSTRACT

The accuracy of the European geoid model EGG2015 is evaluated for part of the territory of Macedonia. The studied region is within the area of Skopje – in the range 41° 51' to 42° 09' latitude and 21° 20' to 21° 40' longitude. The accuracy assessment is carried out with 41 GPS/levelling points of lines from the State Levelling Network of the Republic of Macedonia falling within the studied area. The accuracy estimate shows a mean square error of the differences between GPS/levelling and geoid heights of the EGG2015 of the order of 0.381 m. An analysis of the possible causes of the received systematic bias has been made. EGG2015 geoid undulations are also compared with the global geoid model undulations of EGM2008. The obtained results show good consistency between two models EGG2015 and EGM2008 – the mean square error of the differences between them is 0,068 m.

¹ Elena Peneva, Prof. Dr. Eng., Dept. “Geodesy”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: peneva_el@yahoo.com

² Slaveyko Gospodinov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Geodesy”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: sgospodinov@mail.bg

³ Alexandar Postolovski, Dr. Eng., GeoWILD MAK, Скопје, Македонија, e-mail: a.postolovski@geowildmak.com.mk