

ОПРЕДЕЛЯНЕ ГРАНИЦАТА НА МОХОРОВИЧИЧ ЗА ТЕРИТОРИЯТА НА БЪЛГАРИЯ ПО СПЪТНИКОВИ ГРАВИМЕТРИЧНИ ДАННИ

Любка Пашова, Божидар Сребров

*Национален институт по геофизика, геодезия и география –
Българска академия на науките
e-mail addresses: bismall@argo.bas.bg, srebrov@geophys.bas.bg*

Ключови думи: граница на Мохоровичич, аномалии Буге, спътникови гравиметрични данни

Резюме: В статията са представени резултати от определяне на границата на Мохоровичич за територията на България по спътникови гравиметрични данни. Изчисленията са извършени чрез итеративния подход на Parker–Oldenburg метода, като е приложен нискочестотен филтър при анализа на гравиметричните данни за постигане сходимост на окончателното решение. Получените в настоящето изследване резултати са анализирани и сравнени с такива от предходни изследвания, свързани с определяне долната граница на земната кора за територията на страната.

OBTAINING OF MOHO BOUNDARY ON THE TERRITORY OF BULGARIA USING SATELLITE GRAVIMETRY DATA

Lyubka Pashova, Bozhidar Srebrov

*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail addresses: bismall@argo.bas.bg, srebrov@geophys.bas.bg*

Key words: Mohorovičić discontinuity, Bouguer anomaly, satellite gravimetric data

Abstract: This study represents the results of the modeling of Mohorovičić discontinuity (Moho depth) for the territory of Bulgaria using satellite gravity data. Parker-Oldenburg iterative method is used and a low-pass filter was applied to gravity information towards the convergence of the final solution. The obtained results are discussed and compared with those derived from previous studies for the Bulgarian territory.

I. Въведение

Съвременните геолого-геофизични изследвания на територията на България допринасят за изясняване на геоложката еволюция, протичащите тектонски процеси и строежа на земната кора и горната мантия. С развитието на спътниковите технологии през последните десетилетия се осигуряват нови гравиметрични и геомагнитни данни с глобално покритие. Тази допълваща наземните измервания информация се използва за моделиране на различни параметри на земното гравитационно и геомагнитно поле с повишена пространствена и времева точност. Чрез съвместен анализ и интерпретация на разнороден тип геофизични данни се изучават детайлно изостатичните условия за формиране на земната кора и произходът на отделни геоложки структури, формиращи нейният тектонския строеж. Един фундаментален геофизичен параметър е дебелината на земната кора, т. нар. граница на Мохоровичич (граница Мохо, дълбочина на Мохо). Проучванията, свързани с определянето на тази граница, започват в началото на 20 век с усъвършенстване на сеизмичните методи за изследване на земетресения. Подробен и задълбочен анализ на сеизмологичните изследвания, посветени на изясняване границата между земната кора и горната мантия през последното столетие, са публикувани в (Prodehl et al., 2013).

Съвременният геоложки строеж и протичащите геодинамични процеси на територията на страната определят комплексната тектонска обстановка. Тези обстоятелства намират

отражение в земното гравитационно поле и дават възможност да се изследва вътрешният строеж на Земята по гравитационни данни чрез решаване на обратни гравиметрични задачи. При решаването на тази геофизична задача се правят предположения и налагат редица ограничения за априорната информация, защото нейното решение не е еднозначно. Основен източник на информация за изследване дълбочинната структура на литосферата и земната кора за територията на страната са проучвателните геофизични методи, като сеизмично профилиране, сеизмична томография, гравиметрични/изостатични методи и др. Наличността на нови данни от гравитационни и геомагнитни проучвания позволява да се потвърдят или ревизират стойностите за дълбочината на земната кора за територията на страната, публикувани през последните десетилетия (напр., Zagorchev, 1992; Boykova, 1999; Raykova and Nikolova, 2007 и др.).

Това изследване цели да се моделира границата на Мохоровичич за територията на България чрез инверсионна процедура с използване на гравиметрични данни от глобалния геопотенциален модел WGM2012. GM2012 моделът е първа реализация на изчислените гравитационни (Буге, изостатични и за свободен въздух) аномалии на Земята, представени във вид на GRID и карти (Balmino et al., 2012). За целите на изследването са използвани данни за аномалии Буге за територията на Балканския п-в във вид на мрежа с размер на клетката 2' x 2' и точност $\pm 3\text{mGal}$, които са изтеглени от базата данни на Международното гравиметрично бюро от интернет адрес: <http://bgi.omp.obs-mip.fr>. Допълнителни сравнения и анализи на спътниковите гравиметрични данни съвместно с такива от налични за територията на страната наземни гравиметрични измервания не са извършвани, поради ограничителния режим на достъп до такъв тип информация.

II. Подход за определяне на границата на Мохоровичич

Численото моделиране на границата на Мохоровичич за територията на страната е извършено чрез итеративния метод на Parker-Oldenburg, като е използвана Matlab програмата 3DINVER.M (G.-Ortiz and Agarwal, 2005). Приложена е оптимизационна процедура за определяне 3D геометрията на границата Мохо, която се основава на връзката между преобразуванията Фурие на гравитационните аномалии Буге и сумата от преобразуванията Фурие на Мохо повърхнината. Схемата на итеративния процес включва изчисление на параметри чрез Фурие преобразувания, като са използвани следните уравнения:

- уравнение на Parker (1973)

$$(1) \quad F(\Delta g) = -2\pi G \rho e^{(-kz_0)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F[h^n(x)] ,$$

където $F(\Delta g)$ е Фурие трансформация на гравитационни аномалии Буге Δg ; G - гравитационна константа, ρ - разлика в плътността на границата между земната кора и горната мантия, k - вълново число, $h(x)$ - дълбочина на Мохо, z_0 - средна дълбочина на търсената повърхнина;

- уравнение на Oldenburg (1974)

$$(2) \quad F[h(x)] = -\frac{F[\Delta g(x)]e^{(-kz_0)}}{2\pi G \rho} - \sum_{n=2}^{\infty} \frac{k^{n-1}}{n!} F[h^n(x)].$$

$F(h(x))$ е Фурие трансформацията на търсената граница Мохо. В итеративната процедура за решаване на уравнение (2) са наложени следните ограничителни условия за сходимост на процедурата:

$$(3) \quad \text{HCF}(k) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{k - 2\pi WH}{2(SH - WH)}\right) \right], \text{ for } WH < k < SH$$

$$\text{HCF}(k) = 0 \text{ for } k > SH,$$

$$\text{HCF}(k) = 1 \text{ for } k < WH$$

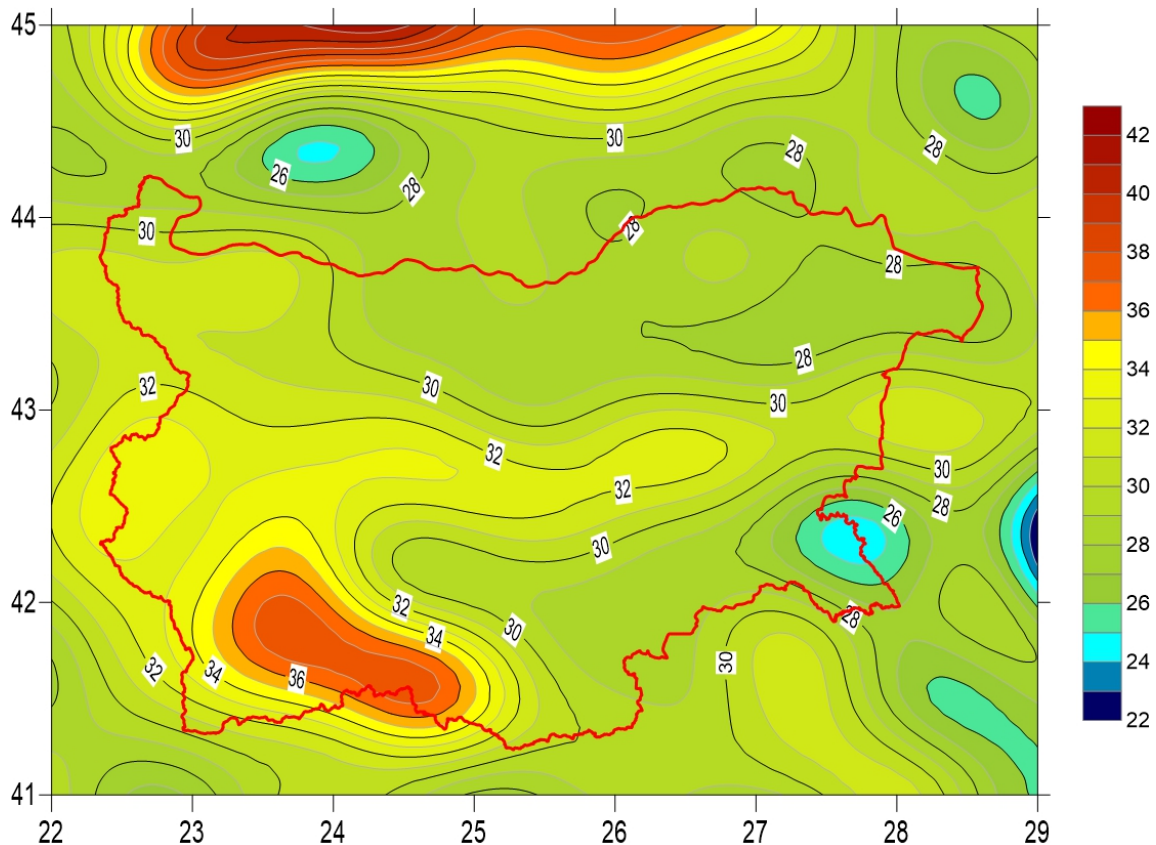
където WN и SH са съответно ниската и високата стойност на вълновото число k при прилагане на нискочестотния филтър за отстраняване на високите честоти в гравитационния сигнал. Вълновото число k може да се замести с $1/\lambda$, където λ е дължината на вълната, изразена в km. За да се постигне сходимост на итерационния процес е приложен високочестотен филтър на гравиметричните аномалии Буге с реципрочната стойност на дължината на вълната λ .

III. Използвани данни и резултати от определяне на границата Мохо

Границата на Мохоровичич за българската територия е определена за района в граници $41^{\circ} \leq \varphi \leq 45^{\circ}$ и $22^{\circ} \leq \lambda \leq 29^{\circ}$. Използваните стойности на аномалии Буге от глобалния геопотенциален модел WGM2012 (Balmino et al., 2012) са във формата на мрежа с размери на клетката $2' \times 2'$ ($\sim 2.7 \times 2.7$ km за $\varphi_{ср.г.ш.} = 43^{\circ}$). Гравитационните аномалии за изследвания район се изменят в границите $-20.03 \div +199.44$ mGal, със средна стойност и стандартно отклонение, съответно 98.49 ± 32.10 mGal. Площта на района е увеличена двукратно, за да се избегне появата на нежелани систематични изкривявания по границите на изследваната област. При численото моделиране са въведени оптимални управляващи параметри на итеративната процедура за решаване на уравнение (2) с гранични условия (3). Използвани са следните входни параметри, които са определени след многократни тестови числени опити:

- средна дълбочина на земната кора $z_0 = 30$ km;
- разлика в плътността на границата земна кора-горна мантия $\rho = 0.45$ g/cm³;
- стойност на вълновото число за нискочестотния филтър в уравнение (3) 0.0067 km⁻¹ (150 km дължина на вълната);
- средна квадратична грешка между две последователни итерации $RMSE = 0.1$.

Резултата от итеративното решение на уравнение (2) са стойности на границата Мохо и оценка на точността, с която те са определени. На Фиг. 1 е изобразена повърхнината на тази граница, която за територията на страната се изменя в границите 24 - 38 km. Най-дълбоката граница земна кора-горна мантия се наблюдава в ЮЗ България, като изтъняване на земната кора се установява в югоизточната част, в района около Бургаската падина. Получената повърхнина на границата Мохо е гладка, отразява характера на аномалното гравитационно поле и дава обща представа за основните тектонски структури на земната кора за територията на страната.

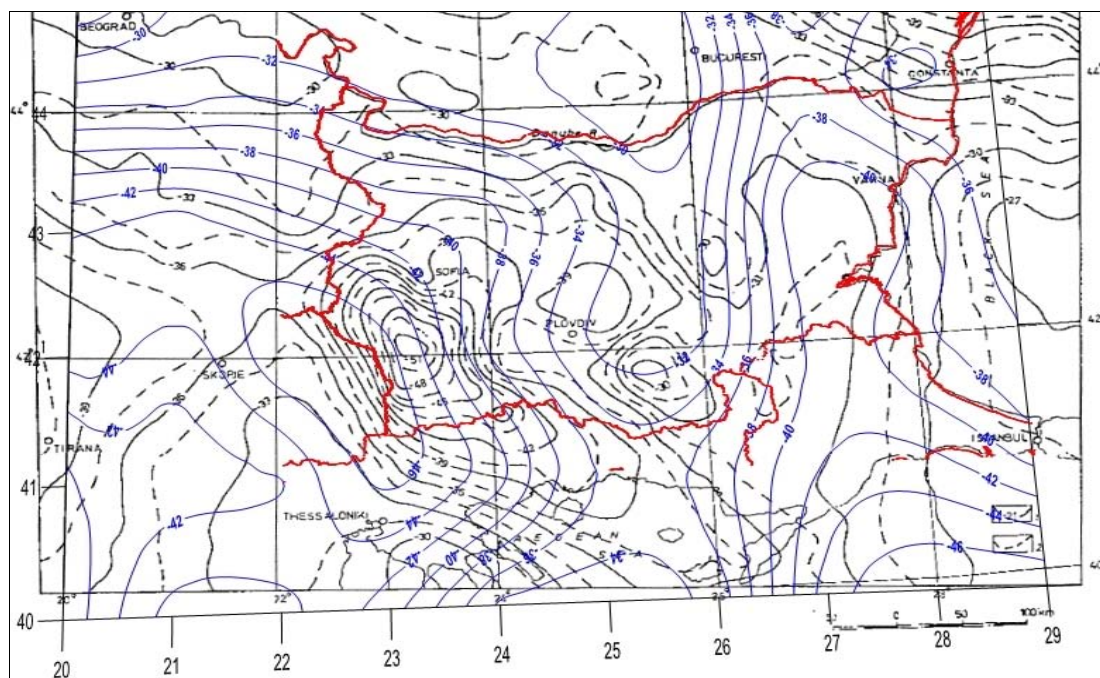


Фиг. 1. Аномалии Буге за изследваната територия от модела WGM2012

IV. Сравнение с други изследвания

Повърхнината на границата Мохо, определена чрез описаната итеративна процедура на Parker–Oldenburg, е сравнена с резултати от изследвания на други автори. Дълбочините на земната кора са близки по стойност с определените от глобалния модел за Европейската континентална плоча CRUST1.0 (Laske et al. 2013), който е построен на основата на сеизмични данни и допълнителна информация. Резултатите са сравними с тези от европейския модел на границата Мохо, публикуван от Grad, Tiira and ESC Working Group (2009). В източната част на българската територия и в западночерноморската падина са установени райони с изтъняване на земната кора, каквито резултати са получени от предходно изследване на авторите по данни от геопотенциалния модел EGM'2008 (Пашова и Сребров, 2011).

По геоложки данни, границата Мохо в ЮЗ България достига дълбочина около 50 km (Bojkova 1999), като по данни от (Zagorchev, 1992) дори я надвишава в района на Пирин и Родопския масив. В (Bojkova, 1999) е представена карта на границата Мохо за централната част на Балканския полуостров, която е получена чрез геостатистически (вариационен и кригинг) анализ на 144 неравномерно разположени точкови стойности от дълбочинно сеизмично сондиране и сеизмологични данни. Направената оценка на точността по grid 20 x 20 km показва, че максимална грешка от ± 7 km е получена за периферията на изследваната зона, а средната квадратична грешка за цялата територия е $\pm 2-3$ km. Raykova and Nikolova (2007) прилагат друг подход за определяне на границата Мохо за българската територия - инверсионен анализ на сръзващите вълни на сеизмичните сигнали, получавани в български сеизмични станции. На фиг. 2 е представено графично сравнение на определени две повърхнини на границата Мохо за територията на страната. На фигурата ясно личат разликите в дълбочините, като по-големи са тези в източната част от територията на страната, където разликите достигат 10-12 km. Забелязва се едно изместване на определената в (Raykova and Nikolova, 2007) дълбочина на земната кора от ~50 km на запад от местоположението на най-голямата дълбочина на земната кора, публикувано в (Zagorchev, 1992; Bojkova 1999). По-ново изследване на границата Мохо от сеизмични данни е публикувано в (Georgieva & Nikolova, 2013), което не се различава съществено от резултатите от предходни сеизмични изследвания. Характерното при него е, че е установена разлика в дълбочините на земната кора, определени за сеизмични станции Крупник и Мусомища, съответно 27-30 km и 50 km, които са на отстояние една от друга от около 60 km. Това показва, че тектонският строеж в ЮЗ България е сложен и са необходими допълнителни геофизични изследвания за изясняване на дълбочините Мохо за този район.



Фиг. 2. Графично сравнение на повърхнини на Моховичич, определени от Bojkova (1999) и Raykova&Nikolova (2007)

Получените в това изследване стойности за границата Мохо се различават от цитираните геоложки и сеизмични изследвания за територията на страната с около $\pm 10-12$ km. Това може да се обясни с различните подходи за определяне на тази повърхнина, използваните изходни данни и първоначална информация, както и предположенията в процеса на числения анализ и моделирането. За разлика от приложения в това изследване изчислителен подход за обработка на гравиметрични аномалии Буге, границата Мохо може да се определи по-детайлно чрез тримерно гравитационно моделиране с използване на голям обем различни по тип и с висока точност геофизични данни (вж. Starostenko et al., 2004). Друг съвременен геофизичен метод за дълбочинно проучване на строежа на литосферата е магнитно-вариационното сондиране, което за първи път е приложено от (Srebrov et al., 2013) за изследване на геоелектричната проводимост на земната кора и мантия на дълбочина до 1000km в района на геомагнитната обсерватория Панагюрище.

V. Заключение

Подобрената пространствена разделителна способност на съвременните модели на гравитационното поле на Земята от типа на WGM2012 осигурява допълнителна информация за по-детайлно представяне на аномалното гравитационно поле, което отразява дълбочинната структура на земната кора и горната мантия. В това изследване е моделирана повърхнината на границата Мохо чрез итеративна процедура на Parker–Oldenburg. Резултатите показват, че използваният метод дава възможност да се определи границата Мохо, която отразява общия характер на аномалното гравитационно поле. Новите данни от спътниковите гравиметрични и геомагнитни мисии допълват информацията от предходни изследвания на повърхнината на Мохоровичич, която чрез усъвършенствани методи и изчислителни средства могат да се комбинират оптимално с наземни данни за нейното по-детайлно и по-точно моделиране. Такъв тип геофизични изследвания допринасят за изясняване генезиса на основните геоложки структури и на протичащите на територията на страната тектонски процеси.

Съставените досега карти на дълбочината /мощността/ на земната кора за българската територия са с различна точност и детайлност на изобразената повърхнина. Необходими са допълнителни съвременни и подробни наземни и морски гравиметрични измервания, магнитотелурично и сеизмично сондиране за определяне локалните особености на тектонския строеж на земната кора и горната мантия, в т.ч. и на границата Мохо. Наличната геофизична /геоложка, гравиметрична, сеизмична и др./ информация за територията на страната следва да бъде събрана, систематизирана и организирана в единна база данни, като се приложат международно приети процедури и стандарти за хомогенизиране, анализ и съхранение на данните. Спътниковите гравиметрични данни, сравнени със съвременни наземни гравиметрични, могат да се използват за определяне на границата Мохо. Сеизмичните данни могат да се използват в процеса на итеративната процедура за калибриране и при избора на по-добро решение при решаване на обратната гравиметрична задача. Осигуряването на допълнителни гравиметрични и геофизични данни за територията на страната и за Черно море ще позволи повишаване точността на моделираната граница Мохо и нейното по-детайлно представяне.

Благодарности: Авторите изказват своите благодарности на Международното гравиметрично бюро (Bureau Gravimétrique International (BGI), Франция за възможността да ползват гравиметричните данни за целите на настоящото изследване, достъпни на интернет адрес (<http://bgi.omp.obs-mip.fr>).

Литература:

1. Пашова, Л. и Б. Сребров. Моделиране границата на Мохоровичич за Черноморския регион по гравиметрични данни от геопотенциалния модел EGM2008, БГД, Сборник доклади от Национална конференция с международно участие „ГЕОНАУКИ 2011“, стр. 107-108.
2. Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F., Sarrailh, M., 2012. World Gravity Map. Commission for the Geological Map of the World. Eds. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris.
3. Boykova, A. Moho discontinuity in central Balkan Peninsula in the light of the geostatistical structural analysis, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 114, 1999, pp. 49–58.
4. Georgieva, G and S. Nikolova. The Moho depth and crustal structure beneath Bulgaria obtained from receiver function analysis, C. R. Acad. Bulg. Sci., 66(5), 2013, pp. 725- 732.
5. Gomez-Ortiz, D. and B. Agarwal, 2005. – 3DINVER.M: a MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker-Oldenburg's algorithm, Computer&Geosciences, 31(4), 513-520. doi:10.1016/j.cageo.2004.11.004

6. Grad, M., T. Tiira and ESC Working Group, 2009. The Moho depth map of the European Plate, *Geophys. J. Int.*, 176 (1), pp. 279–292, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03919.x
7. Laske, G. Et al. CRUST1.0: an updated global model of the Earth's crust. EGU General Assembly, 14p. 3743, 2012. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>
8. Oldenburg, D.W. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophys.*, 39 (4), 1974, pp. 526–536. doi:10.1190/1.1440444
9. Parker, R. L. The rapid calculation of potential anomalies, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 31, 1973, pp. 447-455, doi:10.1111/j.1365-246X.1973.tb06513.x
10. Prodehl, C., B. Kennett, I. M. Artemieva, H. Thybo. 100 years of seismic research on the Moho, *Tectonophysics*, 609, 2013, pp. 9-44.
11. Raykova, R. and S. Nikolova. Tomography and velocity structure of the crust and uppermost mantle in southeastern Europe obtained from surface wave analysis, *Studia Geophysica et Geodaetica*, DOI: 51(1), pp. 165-184, DOI: 10.1007/s11200-007-0008-5.
12. Srebrov, B., B. Ladanyvskyy, I. Logvinov, Application of space generated geomagnetic variations for obtaining geoelectrical characteristics at Panagyurishte geomagnetic observatory region, *C. R. Acad. Bulg. Sci.*, 66 (6), pp. 857-864.
13. Starostenko, V., V. Buryanov, I. Makarenko, O. Rusakov, R. Stephenson, A. Ni kishin, G. Georgiev, M. Gerasimov, R. Dimitriu, O. Legostaeva, V. Pchelarov, C. Sava, Topography of the crust-mantle boundary beneath the Black Sea Basin, *Tectonophysics*, 381, 2004, pp. 211–233.
14. Zagorchev, I. Neotectonics of the central parts of the Balkan Peninsula: Basic features and concepts, *Geologische Rundschau*, Vol.81, Iss.3, 1992, pp. 635-654.