

## **ДВИЖЕНИЕ НА ГЕОЦЕНТЪРА И НЕГОВОТО ВЛИЯНИЕ В ИЗМЕНЕНИЕТО НА КООРДИНАТИТЕ И СКОРОСТИТЕ НА ТОЧКИ ОТ ЗЕМНАТА ПОВЪРХНОСТ**

**Мила Атанасова, Явор Чапанов**

*Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките*  
*e-mail: mila\_at\_zl@abv.bg, yavor.chapanov@gmail.com*

**Ключови думи:** *Земни координатни системи (TRF), движение на геоцентъра, времеви редове*

**Резюме:** *Промяната на параметрите на Земята се дължи най-вече на преноса на маси в тялото на планетата и над нейната повърхност; измененията настъпващи в атмосферата, океаните, снежната покривка и валежите, нивото на подпочвените води, промените в ледниковата покривка, поради следледниковите отскок, и т.н. Всички тези фактори влияят на малките премествания на всяка точка от земната повърхност и предизвиква непрекъснати глобалните промени от фигурата на Земята, гравитационно поле и други параметри. Важен инструмент за изследване на глобалните изменения на фигурата на Земята и гравитационно поле е анализи на времевите редове на вариациите на масовия център на Земята. Времевите редове на координатите на геоцентъра за периода 1991-2003, определени от JPL решения и GPACE решения за периода 2003-2009 са изследвани за тяхната последователност и спектралните промени във времето. Анализира се влиянието на сезонните и дългосрочни колебания на геоцентъра върху изменението на координатите на GPS станциите.*

*Масовия център на Земята (CM) е в центъра на общата маса на Земята, включително твърдата почва, атмосферата, океаните и водите на континентите. Така че CM не е идентичен с масовия център на земната повърхност (CE) и съществува трансляция между тях, която се нарича движение на геоцентъра (GCM) Началото на Земната референтна система (TRF) се определя като CM за специална епоха. TRF се реализира и се поддържа с космически геодезически техники. CM е центърът които се използва при определяне орбитите на спътниците в космическата геодезия. Ето защо, движението на геоцентъра е основен въпрос за пространственото определяне местоположението на точките на земната повърхност.*

## **GEOCENTER MOVEMENT AND ITS INFLUENCE IN THE CHANGE OF COORDINATES AND VELOCITIES OF POINTS ON THE GROUND**

**Mila Atanasova, Yavor Chapanov**

*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences*  
*e-mail: mila\_at\_zl@abv.bg, yavor.chapanov@gmail.com*

**Keywords:** *Terrestrial coordinate systems (TRF), geocenter motion, time series*

**Abstract:** *The dominated reasons of the Earth's dynamical parameter changes are mostly the mass transfer in the planet body and over its surface: variations of the surface fluids - atmosphere and oceans, snow cover and rainfalls, level of the underground water, changes of the glacial cover, due to the post-glacial rebound, and etc. All of these factors affect small displacements of each point of the Earth surface and cause continuous global variations of the Earth's figure, gravity field and other parameters. An important instrument to study the global variations of the Earth's figure and gravity field is time series analyses of the Earth mass center variations. The time series of the geocenter coordinates for the period 1991-2003, determined from the JPL solution and Grace solution for period 2003-2009 are examined about their consistency and spectral variations in time. The influence of the seasonal and long-term oscillations of the geocenter on the GPS station coordinates is analyzed.*

*The Earth's center of mass (CM) is the center of total Earth's mass, including the solid Earth and fluid layer, such as atmosphere, oceans and continental water. So CM is not identical to the mass center of solid Earth (CE), and there exists a translation between them, which is called the geocenter motion. The origin of the terrestrial reference frame (TRF) is defined as CM at a special epoch TRF is realized and maintained with the space geodetic techniques CM is the natural center in the satellite dynamics. Therefore, geocenter motion is not only a basic issue for the space*

## Въведение

Един от важните проблеми, пред които са изправени науките за Земята, е количественото описание и динамиката на движението на литосферата, по специално на континенталните плочи и блокове, и очертаването на техните граници. Основното изискване при решаването на този фундаментален проблем е точното определяне на координатите на точки от земната повърхност, разположени върху различни континентални плочи и тяхното изменение във времето и въз основа на това да се установят техните относителни движения.

Преместването на плочите може да се проследи, чрез спътникови геодезични измервания. Големината и посоката на преместване на плочите, получени от спътникови геодезически наблюдения за кратък интервал от време (няколко години) са съпоставими, по големината и посоката на преместване на плочите, усреднени за милиони години по геоложки и геофизични данни.

Глобалните навигационни спътникови системи (GNSS), GPS, ГЛОНАСС, Galileo, предлагат ефикасен подход за създаване на тримерни опорни геодезически мрежи и мрежи с многофункционално приложение. Акцентира се върху Глобалната система за определяне на местоположение (GPS), имаща засега най-широко приложение в геодезията и геодинамиката. Интензивното развитие на геонауките в значителна степен се стимулира от повишаващата се точност на GPS технологията. Чрез GPS космическата геодезия дава възможност за бързо и надеждно количествено определяне на параметрите на съвременните геодинамични движения.

**Основен акцент** е изборът на референтна система, спрямо която да се отчете движението на точките. Съществува връзка между ITRF<sub>уу</sub> реализациите и глобалното преместване на всяка точка, причинено от движението на литосферната плоча, на която е разположена точката. С навлизането на космическите технологии в съвременната геодезия, се използват тримерните координатни системи с начало в геоцентъра.

Международната служба за въртене на Земята (IERS) поддържа Международната земна референтна система ITRS, която по същество е съвкупност от предписания и общи условия, които заедно със съответните методи за моделиране, дефинират началото, мащаба, ориентацията и изменението във времето на земната координатна система.

Тази система се реализира чрез т.нар. Международна земна референтна координатна система (ITRF), която представлява списък от координати и скорости на станции, получени чрез обработка на: GPS; VLBI (Very Long Base Interferometri) Радиointерферометрия със свръх дълги бази; SLR Лазерна локация на ИСЗ (Satellite Laser Ranging SLR); LLR Лазерна локация на Луната (Lunar Laser Ranging LLR); DORIS (Doppler Orbit Determinations and Radio positioning Intergraded on Satellite) наблюдения

**Седем коефициента** са необходими за да се дефинира референтна система в тридеменсионното пространство; три за да се определи трансляцията, три за да се определи ротацията и един мащабен фактор.

Трансляцията на земната референтна система в пространствената геодезия се дефинира от центъра на Земята.

Ротацията на Земната референтна система може да бъде дефинирана чрез фиксиране на литосферните плочи. В модела на плочите, скоростта на станцията е равна на скоростта на местоположението на тази точка на плочата минус скоростта на центъра на Земята.

Центърът на Земята е дефиниран по различен начин в различните реализации на ITRF. Оценката на ъгловата скорост на плочата зависи от оценката на скоростта на центъра на Земята. Повечето геодезически оценки на ъгловите скорости на плочите се определят, като се приема, че центъра на Земята се фиксира в Международната земна референтна система (ITRF) и следователно се натоваарва с грешки при оценката на скоростта на центъра на Земята

### **CM центъра на масата на Земята, океаните и атмосферата;**

При реализации ITRF2005 и ITRF2000 центърът на Земята е дефиниран в центъра на масата на Земята, океаните и атмосферата (CM). Скоростта на CM се оценява от SLR наблюдение от LAGEOS орбити.

### **CE центъра на масата на твърдата Земя;**

В някои модели, като GEODVEL, авторите [5] определят центъра на Земята да бъде в центъра на масата на твърдата Земя (CE).

Като се има предвид, че скоростта на MC се различава с 1.8 mm/yr между ITRF2005 и ITRF2000, скоростта на CM определена от SLR не е оценена достатъчно добре, за да направи надеждна оценка на ъгловата скорост на плочата. Скоростта на CE, определена от скоростите на станции на повърхността на Земята, вероятно е по-близо до истинската скорост на MC от скоростта, изчислена въз основа на SLR.

### **CF определен от Земната повърхност**

В система ITRF1997 скоростта на центъра на Земята е средна скорост от повърхността на Земята (CF). Скоростта на CF се оценява от геоложкия модел на плочите NUVEL-1A [7], описващ движението на земната повърхност. Всеки геодезически или геофизичен модел на плочи се дефинира в различна резлизация на световната земна координатна система.

Табл. 1. Модели описващи движенията на литосферните плочи, дефинирани в различна резлизация на световната земна координатна система

Координатна система	Модел на литосферните плочи
ITRF1997	NUVEL-1A [7]
ITRF2000	REVEL2000 [11], ITRF2000 (EUREF 2002) [2], HS3-NUVEL1A [10], APKIM2000.0 [9],
ITRF2005	GEODVEL (2010) [5], MORVEL [8], APKIM2005 [13].

Табл. 2. Абсолютни скорости на точка SOFI от мрежа BULREF определени от геодезически и геофизични модели на плочи

Model	Speed mm/yr	x vel. mm/yr	y vel. mm/yr	z vel. mm/yr	Azimuth (cw from N)	N Vel. mm/yr	E Vel. mm/yr	Plate (reference)
GEODVEL 2010	26.58	-17.23	17.83	9.58	60.82°	12.96	23.20	EU(NNR)
MORVEL 2010	24.28	-15.99	15.76	9.23	59.02°	12.50	20.82	EU(NNR)
APKIM2005-IGN	27.21	-18.29	16.82	11.08	56.55°	15.00	22.70	EU(NNR)
REVEL 2000	26.84	-17.05	18.65	9.04	62.88°	12.24	23.89	EU(NNR)
HS3-NUVEL1A	25.52	-16.17	17.82	8.51	63.17°	11.52	22.78	EU(NNR)
APKIM2000.0	26.70	-17.37	17.80	9.73	60.46°	13.17	23.23	EU(NNR)
ITRF2000 (D&A)	26.60	-17.19	17.93	9.49	61.11°	12.85	23.29	EU(NNR)
NUVEL 1A	25.53	-16.17	17.83	8.51	63.18°	11.52	22.78	EU(NNR)
NUVEL 1	26.22	-16.60	18.33	8.72	63.24°	11.81	23.41	EU(NNR)

Приложен е стандартният алгоритъм за изчисляване на абсолютни скорости за точка SOFI (табл. 2) от моделите за движение на плочи. Използва се UNAVCO-електронен калкулатор [13] за движение на плочи. Наблюдават се разлики в скоростите на точка SOFI, получени от различните модели от порядъка на 2-3 mm/yr.

Загубата на ледената покривка, колебанията на нивото на океаните и атмосферата и други явления, пораждат скорост между CM и CE, със стойност по-малка от няколко десети mm/yr [5]. Местата по границите на бившите ледникови полета са със стойности на хоризонталните движения в размер до 1.5mm/yr, отдалечавайки се от ледниковия център към крайщата. Местата които не са били до края на Плейстоцена покрити с лед са с хоризонтални движения по-малко от  $\approx 0.5$ mm/yr

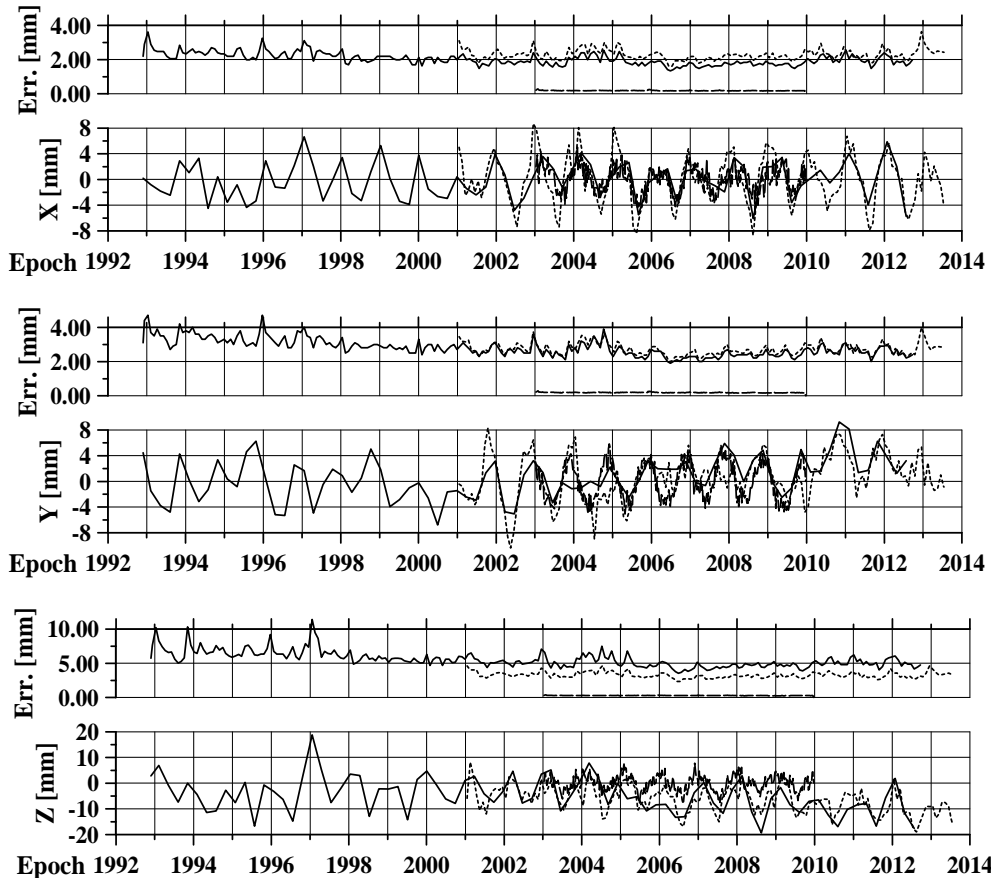
В GEODVEL едновременно са изчислени скоростта на CE и ъгловата скорост на плочите [5]. Ако се предположи, че станциите не са в близост до места с ледниково покритие до късния Плейстоцен, се приема че се движат със съответните си плочи, свързани с CE.

Непостоянството в ъгловите скорости на плочите, включва и неточността в определяне скоростта на CE. GEODVEL се различава от другите геодезически оценки на ъгловата скорост на плочите, отчасти защото скоростта на центъра на Земята, се различава между различните проучвания. GEODVEL се различава съществено от REVEL [11] с 0,028 °/Myr, главно поради това, че скоростта на центъра на Земята, се различава значително между двата модела.

В по умерени граници т.е с 0.015 °/Myr, GEODVEL се различава от модела на Altamimi et. al, (2007) [3]. Altamimi [3] приемат скоростта на центъра на Земята да бъде CMin ITRF2005.

## Движение на геоцентъра

За определяне вариациите на геоцентъра са подбрани три решения базирани основно на спътниковите наблюдения. Решението на UTCSR (University of Texas Center for Space Research) е с най-дълъг времеви ред и е получено от наблюденията на спътниците LAGEOS-1 и LAGEOS-2, което обхваща 20 годишен период от 1993 до 2013г. Второто решение на UTCSR е комбинация от наблюденията на 5 геодинамични спътника LAGEOS-1, LAGEOS-2, Starlette, Stella и Ajisai, което обхваща 12.5 годишен период от време [5]. Третото решение на GFZ Потсдам е с най-малка дисперсия, тъй като е комбинация от високоточните измервания на гравитационното поле от спътниковата мисия GRACE с GPS наблюдения и измервания на налягането върху океанското дъно (фиг.1). Съществува добра съгласуваност между трите решения, като основните колебания с годишен период практически съвпадат. Вариациите на геоцентъра са  $\pm 8\text{mm}$  в координатите X и Y; и  $\pm 20\text{mm}$  в координатата Z.



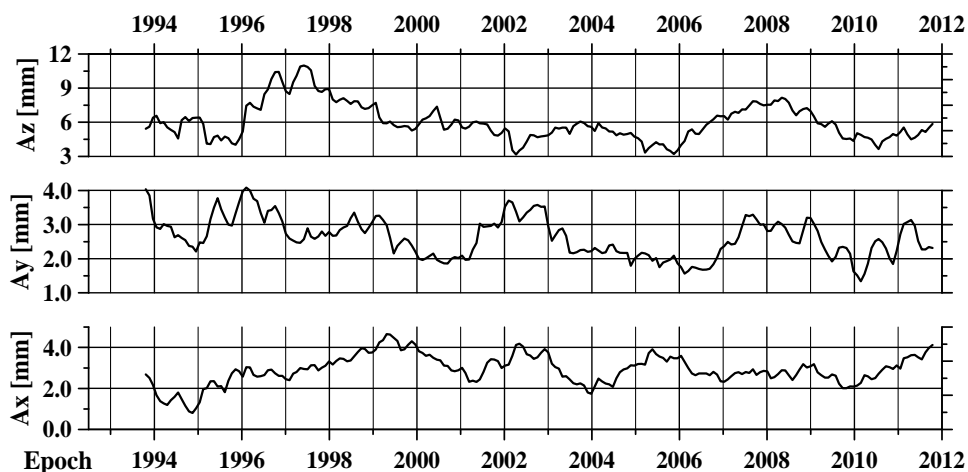
Фиг. 1. Изменения на координатите на геоцентъра и техните ср.кв. грешки, получени от наблюденията на спътниците LAGEOS-1 и LAGEOS-2 (непрекъсната линия); LAGEOS-1, LAGEOS-2; Starlette, Stella и Ajisai (точковидна линия); и GRACE, GPS и налягане на океанското дъно (пунктирна линия)

## Годишни колебания на геоцентъра

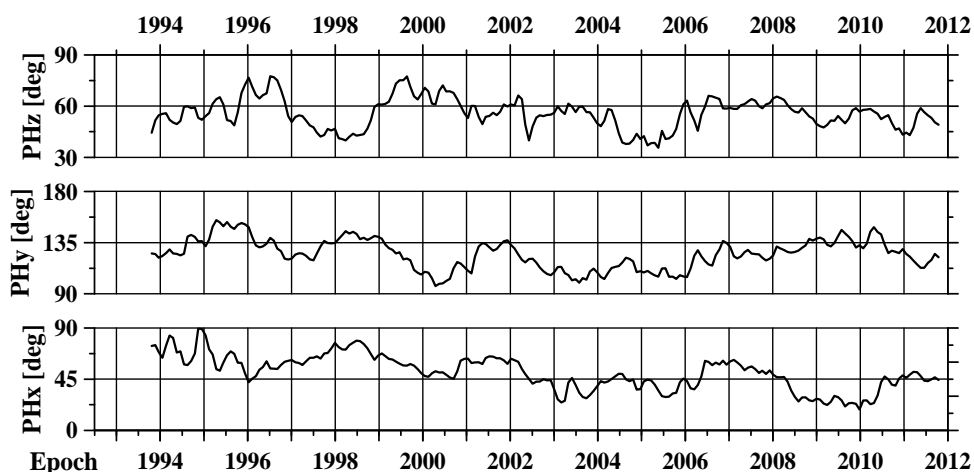
Основните колебания в движението на геоцентъра са с годишен период и значителни вариации на тяхната амплитуда. Вариациите на амплитудата  $A_{\bar{X}}$  и фазата  $\Psi_{\bar{X}}$  на годишните колебания са определени в пълзящ прозорец с големина 2 години чрез модела:

$$\begin{aligned}
 \bar{X}(t-t_0) &= \bar{X}_0 + \bar{X}_1(t-t_0) + a_{\bar{X}} \sin 2\pi(t-t_0) + b_{\bar{X}} \cos 2\pi(t-t_0), \\
 \bar{X} &= (X, Y, Z)^T, \\
 (1) \quad A_{\bar{X}} &= \sqrt{a_{\bar{X}}^2 + b_{\bar{X}}^2}, \\
 \Psi_{\bar{X}} &= \arctg(a_{\bar{X}}/b_{\bar{X}}),
 \end{aligned}$$

където  $\bar{X}(t-t_0)$  е апроксимиращата функция на координатите на геоцентъра  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  от текущия прозорец с големина 2 години.,  $t_0$  – средната епоха на наблюденията в този прозорец,  $\bar{X}_0$  – средната стойност годишната компонента,  $\bar{X}_1$  - коефициентът на линейния тренд. Неизвестните параметри  $\bar{X}_0$ ,  $\bar{X}_1$ ,  $a_{\bar{X}}$ ,  $b_{\bar{X}}$  се оценяват по метода на най-малките квадрати.



Фиг. 2. Изменение на амплитудата на годишните колебания на геоцентъра



Фиг. 3. Изменение на фазата на годишните колебания на геоцентъра

Измененията на амплитудата на годишните колебания на геоцентъра са представени на фиг.2, а на фазата – на фиг.3. Вариациите на годишната амплитуда са основно от 2 до 4мм за координатите  $X$  и  $Y$  и от 3 до 11мм – за координатата  $Z$ . В тези вариации могат да се отделят отчетливо участъци с преобладаващо линеен характер с продължителност от 2 до 6 години, прекъсванията на които вероятно се дължат на значими геодинамични явления, протичащи както на земната повърхност, така и в течното ядро на Земята.

### Заклучение

Разгледани са различните геофизични хипотези за движението на центъра на Земята и са установени систематични разлики в абсолютните скорости на точки от територията на България, при използване на геодезически и геофизични модели. Промяна в скоростта на центъра на Земята от  $1\text{mm/yr}$ , обикновено води до промяна в ъгловата скорост на плочата с  $0,012^\circ/\text{Myr}$

Вариациите на амплитудата и фазата на сезонните колебания на геоцентъра се състоят от предимно линейни изменения с продължителност от 2 до 6 години, прекъсванията на които се дължат на значими геодинамични явления.

## Литература:

1. Атанасова-Златарева, М. (2013) Трансформационни модели при съвременните геодезически координатни системи, Дисертация, НИГГГ, БАН, София, 138 стр
2. Altamimi, Z., P. Sillard, and C. Boucher, (2002), ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, *J. Geophys. Res.*, 107(B10), 2214, doi:10.1029/2001JB000561, 2
3. Altamimi, Z., Collilieux X. Legrand J. Garayt B. Boucher C., (2007), ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research*. VOL. 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949/002; see also tn31\_270.pdf.
4. Argus, D.F. and R.G. Gordon, (1991) No-net-rotation model of current plate velocities incorporating plate motion model NUVEL-1, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 2039-2042, 1991
5. Argus, D.F., R.G. Gordon, M.B. Heflin, C. Ma, R.J. Eanes, P. Willis, W.R. Peltier, and S.E. Owen, (2010), The angular velocities of the plates and the velocity of the Earth's centre from space geodesy, *Geophys. J. Int.*, 18, 1-48
6. Cheng, M.K., J.C. Ries, B.D. Tapley, 2013, Geocenter Variations from Analysis of SLR data, in Reference Frames for Applications in Geosciences, International Association of Geodesy Symposia, Vol. 138, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg), 19-26.
7. DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., & Stein, S., (1994), Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.
8. DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., (2010) Geologically current plate motions, *Geophys. J. Int.* (2010) 181, 1-80 doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x
9. Drewes H. (2006) Implementation of the kinematical NNR condition for the terrestrial reference frame, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 05014, 2006 European Geosciences Union 2006, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-05014
10. Gripp, A.E., and R.G. Gordon, (1990), Current plate velocities relative to the hotspots incorporating the NUVEL-1 global plate motion model, *Geophys. Res. Lett.*, 17, 1109-1112, 1990.
11. Sella, G., T. Dixon, A. Mao, (2002), REVEL: A model from Recent plate velocities from space geodesy *J. Geophys. Res.*, 107 (B4), ETG 11, 10.1029/2001JB000033
12. Xiaoping, Wu, Jim Ray, Tonie van Dam (2012), Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications, *Journal of Geodynamics* 58 (2012) 44- 61
13. [http://gsrm.unavco.org/model/files/1.2/rotation\\_vector\\_studies\\_PA.dat](http://gsrm.unavco.org/model/files/1.2/rotation_vector_studies_PA.dat)