

*Получена: 22.12.2017 г.*

*Приета: 28.05.2018 г.*

## СЪВРЕМЕННА ТЕКТОНИКА НА КОНТИНЕНТАЛНИТЕ ПЛОЧИ ОТ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ НА ГЕОДИНАМИЧНИЯ СПЪТНИК LAGEOS-1

Н. Димитров<sup>1</sup>, Ив. Георгиев<sup>2</sup>

*Ключови думи:* лазерни измервания на ИСЗ, последователно оценяване, глобална тектоника

### РЕЗЮМЕ

Обработени и анализирани са лазерни измервания на геодинамичния спътник LAGEOS-1 (Laser Geodynamic Satellite) за периода януари 2002 – юни 2013 година. Анализът е извършен с разработения в Департамент Геодезия на Националния институт по геофизика, геодезия и география при БАН софтуер SLRP (Satellite Laser Ranging Processor), версия 4.2. Разработен е нов модул за оценяване на параметри по метода на най-малките квадрати, позволяващ гъвкаво третиране и комбиниране на наблюдателните уравнения – от елиминиране на неизвестни до последователно оценяване. От наблюдателните уравнения, получени от софтуера SLRP, общо 148 639, чрез последователно оценяване, са определени координатите и скоростите на 20 наблюдателни станции, разположени върху основните континентални плочи. Освен координатите и скоростите на наблюдателните станции, са определени орбитните параметри на спътника LAGEOS-1 за всяка орбитална дъга и геоцентричната гравитационна константа GM. Средната квадратна грешка на месечните орбитални дъги е от порядъка на 15 cm. Получените резултати са принос към мониторинга на съвременните движения на континенталните плочи.

---

<sup>1</sup> Николай Димитров, доц. д-р, Национален институт по геофизика, геодезия и география при БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, бл. 3, 1113 София, e-mail: nikox@abv.bg

<sup>2</sup> Иван Георгиев, проф. д-р, Национален институт по геофизика, геодезия и география при БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, бл. 3, 1113 София, e-mail: ivan@bas.bg

## 1. Въведение

Разработеният в Департамент Геодезия на Националния институт по геофизика, геодезия и география (НИГГГ) при БАН специализиран софтуерен пакет за обработка и анализ на лазерни наблюдения на изкуствените спътници на Земята (ИСЗ) – SLRP (Satellite Laser Ranging Processor) [1, 2], предоставя широки възможности за изследване на формата, размера и динамиката на Земята и взаимодействието ѝ с атмосферата и океаните. Лазерната локация на ИСЗ е един от най-точните съвременни методи на спътниковата геодезия за определяне на абсолютните геоцентрични координати на следящите станции, спътниковите орбити, вариациите на геоцентъра; вариациите на земния потенциал във времето; мониторинг на съвременните движения на континенталните плочи и следледниковото издигане. Обсерваториите, които извършват лазерни измервания на ИСЗ (Satellite Laser Ranging (SLR) са интегрална част от международни мрежи от наблюдателни станции, които включват свръхдългобазисна радиоинтерферометрия VLBI (Very Long Baseline Interferometry), GNSS (Global Navigation Satellite Systems), DORIS (Doppler Orbit determination and Radiopositioning Integrated on Satellite) и PRARE (Precise Range And Range-Rate Equipment).

НИГГГ е асоцииран Център за обработка и анализ на лазерни измервания на ИСЗ на Международната служба за лазерна локация ILRS (International Laser Ranging Service), <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>. Международната служба координира усилията за извършване на измерванията, методите, моделите и константите при обработката и анализа им, и на получаваните от тях продукти. Резултатите от анализа на лазерните измервания са фундаментални за реализацията и поддържането на Международната земна координатна система ITRS (International Terrestrial Reference Frame) от Международната служба за ротация на Земята и координатните системи IERS (International Earth Orientation and Reference Systems Service).

## 2. Софтуерен пакет за обработка и анализ на лазерни измервания за ИСЗ SLRP v4.2

Разработеният в Департамент Геодезия софтуерен пакет SLRP v4.2 се състои от два модула – динамичен орбитален модул за определяне на орбитата на ИСЗ, получаване на производните на оценяваните параметри и съставяне на наблюдателните уравнения. Вторият модул е модулът за оценяване на параметри и получаване на окончателните стойности на неизвестните.

Орбиталният модул интегрира уравненията на движение на спътника за определяне на орбитата му. Тук се интегрират и т.нар. вариационни диференциални уравнения за определяне на частните производни на измерванията спрямо оценяваните параметри. Определя се орбитата на спътника и се съставят наблюдателните уравнения. Освен цялата необходима информация за оценяването на параметрите – епоха на наблюдението, код и номер на наблюдателната станция, координати и скорости на спътника и т.н., наблюдателните уравнения съдържат геометричните и динамичните производни спрямо оценяваните параметри.

Геометрични параметри:

- координати и скорости на наблюдателните станции;
- систематични грешки (biases) на разстоянието и времето;
- параметрите на ориентация на Земята – координати на полюса и UT1-UTC.

Динамични параметри:

- началните условия (координати и скорости) на спътника за съответната орбитална дъга;
- зонални, секториални и тесерални хармоники;
- съставлящите на земните и океански приливи;
- числата на Лъв и Шида;
- геоцентричната гравитационна константа (GM) и гравитационните параметри на Луната и Слънцето;
- производни спрямо динамични коефициенти на орбиталното движение на спътника – емпирично ускорение в посока на орбитата, радиално ускорение и слънчево налягане.

Използваните при обработката модели и константи са дадени в табл. 1.

**Таблица 1. Модели и константи**

Инерциална координатна система:	динамична (Lageos 1)
Ориентация:	чрез стойностите на UTC-UT1 от EOP 14 C04 (IAU2000A)
Земна координатна система:	SSC ITRF2000
Начало:	геоцентрична
Ориентация:	фиксиране на дължината и ширината на наблюдателните станции 7090 и 7910
Скорост на светлината:	299 792 458 m/s
Геоцентрична гравитационна константа GM	$3.986004418 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
Перманентна приливна корекция:	приложена
Референтна епоха:	2000.0
Глобален тетоничен модел:	ITRF2000 поле на скоростите
Кинематична система:	фиксиране на скоростите на наблюдателните станции 7090 и 7810 към техните ITRF2000 стойности
Ориентация на Земята:	EOP 14 C04 (IAU2000A)
A priori precession model:	IAU(2000A)
A priori nutation model:	IAU(2000A)
Късопериодични вариации в x, y и UT1:	приложени

През последните години в Департамент Геодезия беше разработен нов модул за оценяване на параметри – SLR\_ESTIM 1.0 (Satellite Laser Ranging Estimation Module). Новият модул за оценяване на параметри по метода на най-малките квадрати позволява значително по-гъвкаво третиране и комбиниране на наблюдателните уравнения – от елиминирането на неизвестни до последователно оценяване, без ограничения за дължината на орбиталната дъга – от няколко денонощия до месец. Вход за модула за оценяване са наблюдателните уравнения, съставени от орбиталния модул.

### **3. Софтуерен пакет за оценяване на параметри SLR\_ESTIM 1.0**

Софтуерът за оценяване на параметри използва изравнение по метода на най-малките квадрати (МНМК). От наблюдателните уравнения се съставят уравненията на поправките, като те могат да включват различен брой параметри в зависимост от целите на обработката и анализа. Линеаризираният модел има вида:

$$V = A\Delta X + f, \quad (1)$$

където  $V$  са поправките;

$A$  – коефициенти пред неизвестните;

$\Delta X$  – неизвестни параметри. Това са корекциите към приблизителните стойности на неизвестните параметри, с които е линеаризиран моделът на лазерното наблюдение;

$f$  – свободен член.

Неизвестните, които не представляват интерес (обикновено това са параметри, свързани с орбиталната дъга), могат да бъдат елиминирани. За целта матрицата  $A$  се разделя на две матрици  $B$  и  $B_e$  [3], като:

$B$  е матрицата с коефициентите на неизвестните, които ще се оценяват;

$B_e$  – матрицата с коефициентите на неизвестните, които ще се елиминират;

$\Delta X$  – матрицата с неизвестните, които ще се оценяват;

$\Delta b$  – матрицата с неизвестните, които ще се елиминират;

$W$  – матрица на тежестите.

Наблюдателният модел придобива вида:

$$\begin{bmatrix} \Delta b \\ \Delta X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_e^T W B_e & B_e^T W B \\ B^T W B_e & B^T W B \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} B_e^T W f \\ B^T W f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta X = \left[ B^T W B - B^T W B_e (B_e^T W B_e)^{-1} B_e^T W B \right]^{-1} \times \left[ B^T W f - B^T W B_e (B_e^T W B_e)^{-1} B_e^T W f \right]. \quad (3)$$

Матриците се съставят за основния период при обработката на измерванията – орбиталната дъга. Тя може да бъде с дължина от няколко дни до месец. Нормалните матрици се запазват, за да може да бъде направено многогодишно решение, обикновено чрез последователно оценяване по МНМК и да се получат оценки на глобалните параметри.

## 4. Обработка на лазерни измервания на геодинамичния спътник LAGEOS-1 за периода януари 2002 – юни 2013 година

### 4.1. Използвани наблюдения

За да бъде тестван софтуерният пакет за оценяване на параметри, бяха обработени и анализирани общо 148 639 лазерни наблюдения от 20 следящи станции на геодинамичния спътник LAGEOS-1 за 12-годишен период – 2002 – 2013 година. Номерата на лазерните станции, принадлежността им към съответната континентална плоча и съответният брой измервания са показани в таблица 2.

Обработвани и анализирани са лазерни измервания, групирани в месечни дъги и чрез последователна обработка са оценени координатите и скоростите на наблюдателните станции; координати на полюса и продължителност на денонощието; геоцентричната гравитационна константа  $GM$ ; емпиричните коефициенти при определяне на орбитата на спътник LAGEOS 1 – на радиационното налягане  $CR$ , емпиричното ускорение  $CT$  в посока на орбитата и коефициентът на радиално ускорение  $CRAD$ . Системата наблюдателни уравнения/уравнения на поправките включва освен изброените по-горе параметри и две

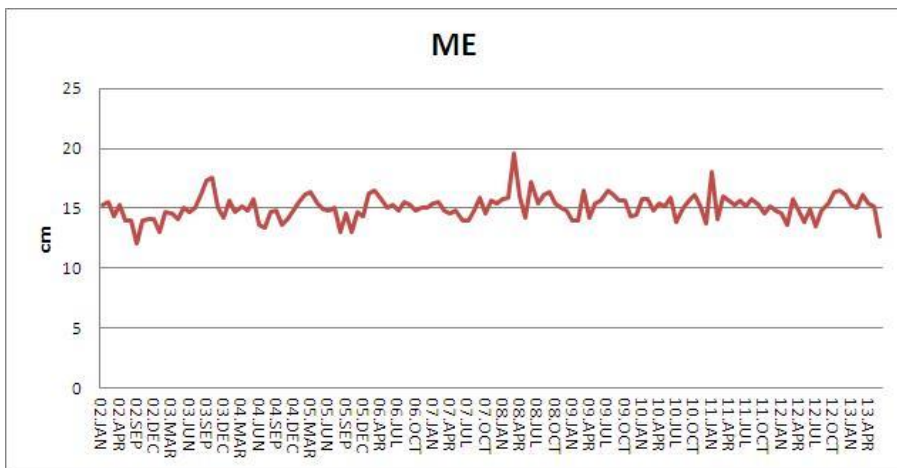
неизвестни за всяко лазерно измерване – систематичните грешки (biases) на епохата на измерване и на разстоянието. В обработката не са включени лазерни наблюдения от станции с измервания, по-малко от 30, за периода 2002 – 2013 година. Прагът за бракуване на наблюденията е  $3\sigma$ .

**Таблица 2. Използвани наблюдения**

Лазерна станция	Тектонска плоча	Брой измервания	Лазерна станция	Тектонска плоча	Брой измервания
7810	EURA	34061	7403	SOAM	835
7840	EURA	18311	7824	EURA	2535
7090	AUST	23646	7249	EURA	2443
7839	EURA	13211	7124	PCFC	849
7845	EURA	4532	7838	EURA	6022
7105	NOAM	6992	1884	EURA	1917
7501	AFRC	5564	1873	EURA	1767
7110	PCFC	8070	7308	EURA	1626
7080	NOAM	3781	1893	EURA	2285
7237	EURA	8117	7811	EURA	2075

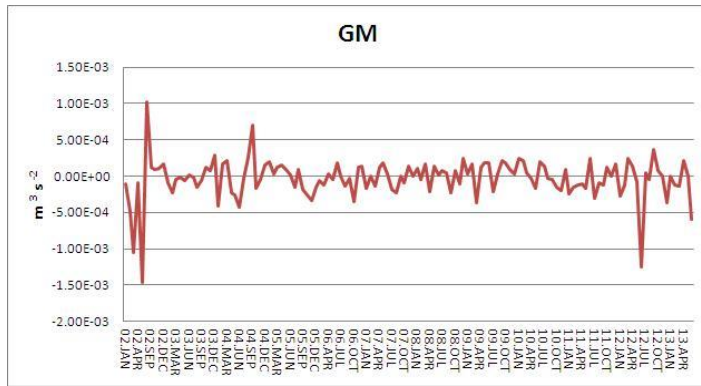
## 4.2. Резултати

Резултатите от обработката и анализа на месечните решения са илюстрирани на фиг. 1 – 4.

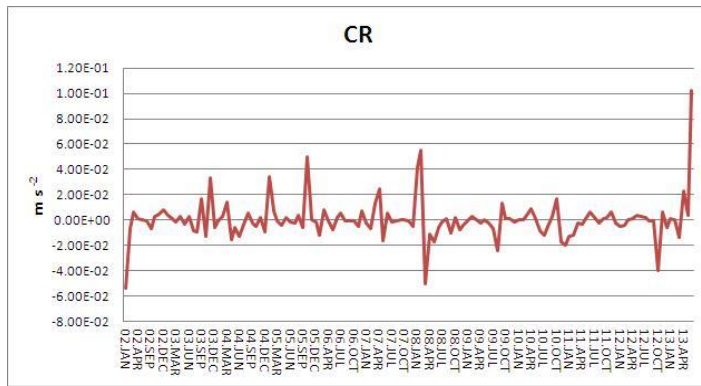


**Фиг. 1. Средна квадратна грешка (фит) на месечните решения за периода 2002 – 2013 година**

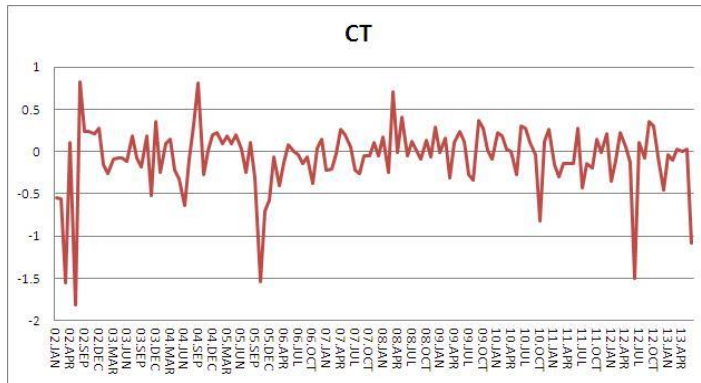
За всяко месечно решение получените стойности за геоцентричната гравитационна константа  $GM$  са дадени на фиг. 2, коефициентът на радиационното налягане  $C_R$  – на фиг. 3, и коефициентът на емпирично ускорение  $C_T$  – на фиг. 4.



**Фиг. 2. Стойности на геоцентричната гравитационна константа  $GM$ , получени от месечните решения за периода 2002 – 2013 година**

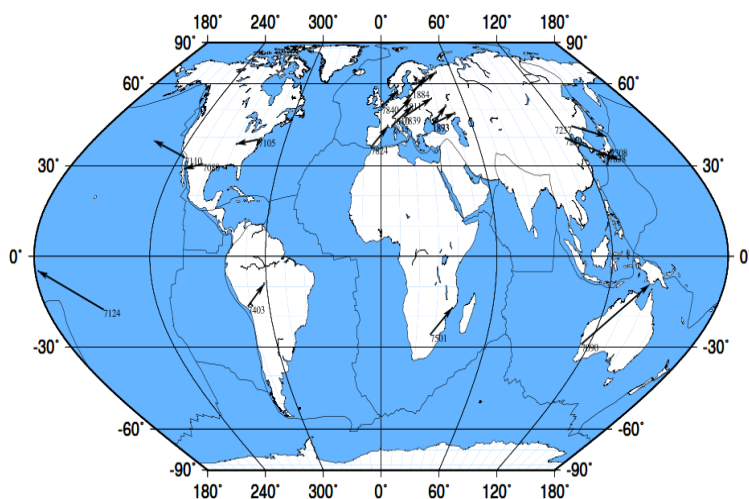


**Фиг. 3. Стойности на коефициента на радиационното налягане, получени от месечните решения за периода 2002 – 2013 година**



**Фиг. 4. Стойности на коефициента на емпиричното ускорение, получени от месечните решения за периода 2002 – 2013 година**

Чрез последователно оценяване е получено многогодишно решение за глобалните параметри за периода 2002 – 2013 година. Получените хоризонтални скорости са показани на фиг. 5.



Фиг. 5. Скорости на точките

### 4.3. Анализ на резултатите

Получените резултати показват надеждността на месечните и на многогодишното глобално решение и демонстрират възможностите на разработения нов модул за оценяване на параметри – SLR\_ESTIM 1.0. Стойността на средната квадратна грешка на месечните решения (орбиталния фит), от порядъка на 15 cm, е напълно удовлетворителна, като се има пред вид броя на лазерните станции, подбрани за тестовите при обработката. Временните редове с месечните решения за параметрите, които отчитат немоделираните ефекти при определяне на орбитата на спътника Lageos 1 – коефициентите на емпирично ускорение  $C_T$  (фиг. 5) в посока на орбитата и радиалното ускорение показват стойности, близки до номиналната и сравними с други решения (вж. напр. [2, 5, 6]). Същото се отнася и за коефициента на радиационно налягане  $C_R$  (фиг. 3). Особено показателни са получените от многогодишното решение хоризонтални скорости на наблюдателните станции (фиг. 5). Оценките им са в съгласие с полето на скоростите от реализацията на координатната система ITRS – ITRF2000.

## 5. Заключение

Разработеният в Департамент Геодезия софтуер за оценяване на параметри – SLR\_ESTIM 1.0 по метода на най-малките квадрати, позволява лесно и гъвкаво третиране и комбиниране на наблюдателните уравнения и нормалните матрици при обработка и анализ на лазерни наблюдения на ИСЗ – от елиминирането на неизвестни до последователно оценяване, без ограничения за дължината на орбиталната дъга – от няколко денонощия до месец. Софтуерът позволява получаване на временни редове с оценки на различни параметри, както и многогодишно решение за глобалните параметри.

Численият пример, при който са обработени лазерни измервания на геодинамичния спътник Lageos 1 за периода 2002 – 2013 година, общо 148 639 лазерни наблюдения от 20 следящи станции, показва резултати, които успешно могат да се използват за геодезически и геофизични изследвания на динамичната система Земя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Chapanov, Ya., Georgiev, I.* Data structure in the processing of satellite laser ranging by the program SLRP 4.1. Proc. Int. Symp. Space Information-Technologies, Acquisition, Processing and Effective Application, 7-8 November 2002, Sofia, p. 240-247, 2002.
2. *Georgiev, I., Shanov, S., Chapanov, J.* A contribution in the estimation of tectonic plate motion from the CLG98 SLR solution – *Geologica Balcanica*. 30, 3-4, Sofia, 89-100, 2001.
3. *McCarthy, J. J., Pavlis, D., Marshall, J. A., Luthcke, S. B., Tsaoussi, L. S., Rowton, S. C., Williams, D. A.* GEODYN II system description. Vol. 1, STX Corp., Greenbelt, MD, 1991.
4. <https://ilrs.cddis.eosdis.nasa.gov/>.
5. *Georgiev, I., Chapanov, Ya.* Analysis of laser ranging data to the geodynamic satellites Lageos 1 and Lageos 2 for the period 1984 – 2000. *Bulgarian Geophysical Journal*, 2002, V. 28, 1-4, p. 43-57, 2003.
6. *Chapanov, Ya., Georgiev, I.* Strategy for parameter evaluation in the SLRP software complex. *Geodesy* 21, ISSN 0324-1114, 2008, 87-104, 2008.

## CONTEMPORARY TECTONICS OF CONTINENTAL PLATES FROM ESTIMATION AND ANALYSIS OF THE GEODYNAMIC SATELLITE LAGEOS-1

N. Dimitrov<sup>1</sup>, I. Georgiev<sup>2</sup>

*Keywords: satellite laser ranging, sequential estimation, global tectonics*

### ABSTRACT

Satellite laser ranging measurements of the geodynamic satellite LAGEOS-1 for the period January 2002 – June 2013 are processed and analyzed. The analyses are carried out with the Satellite Laser Ranging Processor (SLRP) software developed in the Department of Geodesy of the National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography at BAS. A new module for parameter estimation using the least squares method is developed to allow flexible treatment and combination of observational equations – from elimination of parameters to sequential estimation. Through sequential estimation, using the observational equations obtained by the SLRP software, total number of 148 369, coordinates and the velocities of 20 stations located on the main tectonic plates are estimated. Except for the site's coordinates and velocities, LAGEOS-1 satellite orbital parameters for each orbital arc and geogravitational parameter GM are determined. The root mean square errors of the monthly orbital arcs are in the order of 15 cm. The results obtained are contribution to the monitoring of recent tectonics of the continental plates.

---

<sup>1</sup> Nikolay Dimitrov, Assoc. Prof. Dr, National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – BAS, e-mail: ndimitrov@geophys.nail.bg

<sup>2</sup> Ivan Georgiev, Prof. DScTech., National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – BAS, e-mail: ivan@bas.bg