

Мониторинг движения геоцентра по измерениям систем ГНСС, ДОРИС и лазерной локации спутников

© С. П. Кузин, К. В. Эбауэр

ИНАСАН, г. Москва, Россия

В статье представлены результаты определения движения геоцентра, полученные в ИНАСАН в результате обработки измерений различных спутниковых технологий (глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), системы ДОРИС и лазерной локации спутников). Наблюдения глобальных навигационных спутниковых систем с 54 станций Международной сети ГНСС (IGS), оснащенных двухсистемными (GPS + ГЛОНАСС) приемниками, обработаны на временном интервале 2008.0–2016.0, используя метод precise point positioning (PPP). ДОРИС наблюдения охватывают интервал 1993.0 – 2017.0 со всех работающих станций Международной службы ДОРИС (IDS). Лазерные измерения двух высокоорбитальных спутников LAGEOS-1/LAGEOS-2 и трех низкоорбитальных ИСЗ Stella/Starlette/AJISAI были обработаны на интервале 1993.0 – 2015.6 со всех станций Международной сети лазерных наблюдений (ILRS).

Временные ряды движения геоцентра получены с помощью геометрического метода для ГНСС и ДОРИС-измерений, в то время как для лазерных наблюдений использовался метод оценки коэффициентов первой степени гравитационного потенциала Земли. Амплитуды и фазы годовых периодичностей рядов движения геоцентра оценивались с помощью программы FAMOUS (CNES, France). Полученные спутниковые результаты вариаций геоцентра сравнивались с оценками движения геоцентра, полученными с помощью геофизических моделей и результатами других центров анализа. Все значения рядов движения геоцентра выражены в системе координат ITRF2008.

Ключевые слова: движение геоцентра, глобальные навигационные спутниковые системы, система ДОРИС, лазерная локация спутников, временные ряды движения геоцентра.

Введение

Геоцентр определяется как центр масс общей земной системы, состоящей из твердой Земли и ее различных оболочек (атмосферы, криосферы, водных поверхностей, континентальной гидрологии и т. д.) [1]. Геоцентр одновременно является точкой, описывающей движение Земли в инерциальном космическом пространстве, так и началом, относительно которого происходит вращение всех искусственных спутников Земли (ИСЗ). В данной работе под термином «движение геоцентра» понимается движение центра масс Земли (СМ) относительно центра фигуры твердой поверхности Земли (СФ) [2], на которой располагается измерительная аппаратура различных спутниковых технологий. Движение геоцентра обусловлено перемещением масс различного происхождения (изменение уровня морей, таяние ледников, перемещения воздушных масс, поверхностных стоков) в приповерхностном земном пространстве, а также движением масс в недрах Земли. Движение геоцентра также зависит от эластичных и вязкоупругих свойств твердой Земли и эффектов поверхностных нагрузок. Движение геоцентра может быть смоделировано с применением геофизических, климатических и поверхностногидрологических подходов [3]. Движение геоцентра также может быть непосредственно измерено как с помощью различных современных спутниковых технологий, так и с помощью измерений деформаций первой степени [4]. В данной работе исследуются вариации движения геоцентра, полученные путем обработки измерений различных спутниковых технологий.

Обработка измерений различных спутниковых технологий

В данной работе анализируются ряды движения геоцентра, полученные путем обработки измерений различных спутниковых систем: ГНСС (GPS+ГЛОНАСС), ДОРИС и лазерных измерений. Все значения рядов движения геоцентра получены в системе координат ITRF2008.

Лазерные измерения

Лазерные измерения были обработаны на интервале 1993.0–2015.6 гг. с использованием программного комплекса геодинамических исследований (ГеоИС), разработанного в 2015 г. в ИНАСАН, реализующего самые современные и высокоточные алгоритмы и модели, применяемые при обработке спутниковых измере-

ний [5]. Для обработки лазерных измерений использовался динамический метод с оценкой трех коэффициентов геопотенциала первой степени \tilde{N}_{11} , S_{11} , C_{10} , которые пропорциональны компонентам смещения геоцентра X, Y и Z, соответственно. Недельные временные ряды движения геоцентра для лазерных наблюдений были получены посредством обработки измерений дальности спутников LAGEOS-1/LAGEOS-2 совместно с наблюдениями низкоорбитальных ИСЗ Stella/Starlette/AJISAI со всех станций сети ILRS. Благодаря комбинации высоко- и низкоорбитальных спутников в одном решении удалось существенно снизить корреляционные зависимости между некоторыми определяемыми параметрами и повысить точность их определения, а также чувствительность решения к коэффициентам гравитационного поля Земли третьей и четвертой степени. Полученные по лазерным измерениям недельные временные ряды компонентов геоцентра приведены на рис. 1.

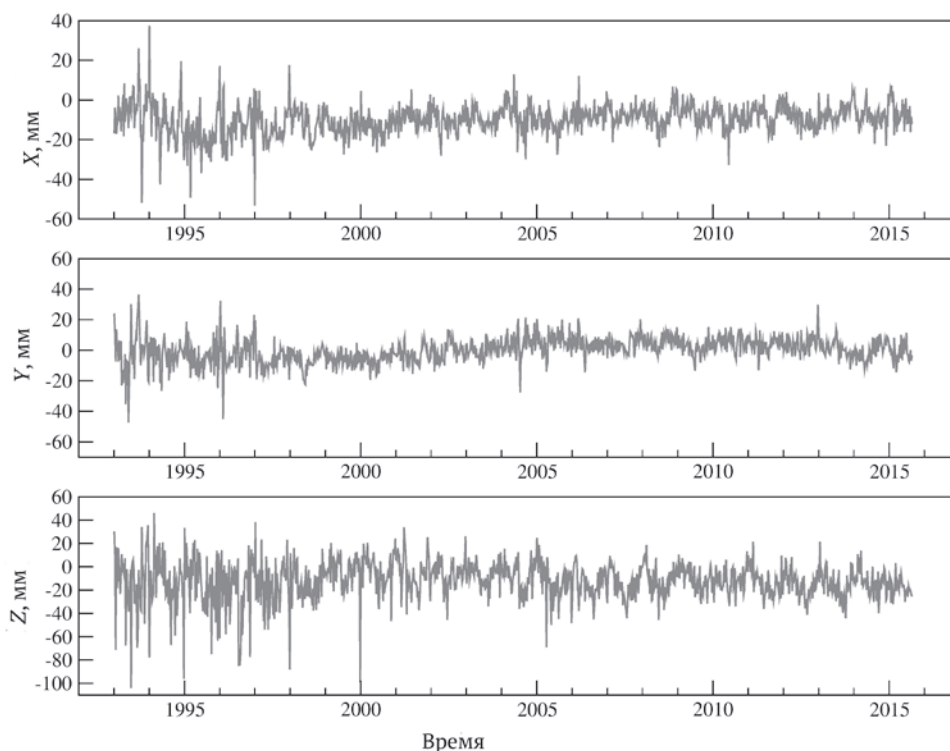


Рис. 1. Недельные ряды координат геоцентра, полученные в результате обработки лазерных измерений

Измерения системы ДОРИС

ДОРИС-измерения были обработаны на временном интервале 1993.0 — 2017.0 гг. Обработка была выполнена с использованием программного пакета GIPSY-OASIS II (JPL, USA) [6], на использование которого у ИНАСАН имеется лицензия. Для получения рядов движения геоцентра использовался геометрический метод, имеющий название «network shift approach», суть которого заключается в том, что сначала определяются координаты всех станций сети (так называемые «свободные» решения («free network solutions»)) с априорными неопределенностями координат порядка 1 м. Затем получаемые «свободные» решения преобразуются в хорошо-определенную систему координат (например, Международную Земную Систему Координат (ITRF)) с использованием параметров трансформации Гельмерта. Детальное описание методов, применяемых для обработки ДОРИС-данных в ИНАСАН, может быть найдено в работе [7]. Недельные временные ряды, полученные в результате обработки ДОРИС-данных, показаны на рис. 2.

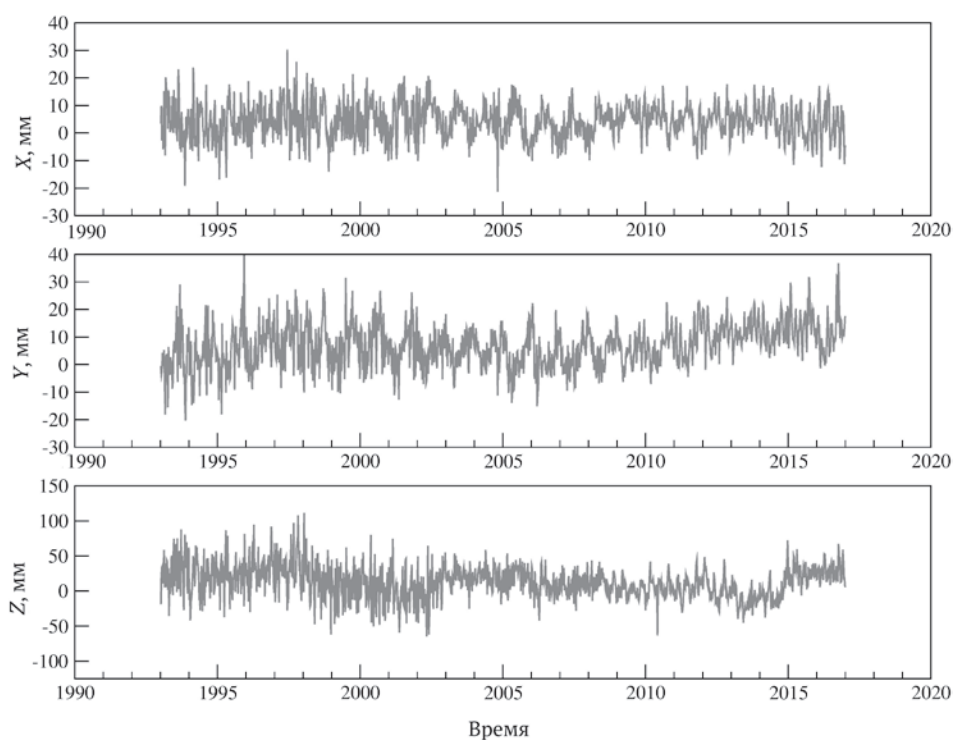


Рис. 2. Недельные ряды координат геоцентра, полученные в результате обработки измерений системы ДОРИС

Обработка измерений глобальных навигационных спутниковых систем (GPS+ГЛОНАСС)

Данные ГНСС были обработаны на интервале 2008.0–2016.0 гг. (GPS) и 2010.3–2016.0 гг. (ГЛОНАСС). Данные были обработаны от 54 станций сети IGS, на которых установлены совмещенные двухсистемные (GPS + ГЛОНАСС) приемники. Были обработаны измерения следующих станций сети: alic, alrt, artu, auck, bjfc, bogt, braz, brew, bfrt, brst, cagz, chti, chur, coco, cro1, darw, eprr, guam, gua0, hob2, hofn, iisc, ispa, ista, joz2, mac1, mana, mas1, maw1, mdvj, mkea, nklg, nril, nvsk, nyal, parc, pert, pie1, pimo, qiki, rabt, ramo, reso, reun, shao, stjo, sutm, tehn, tixi, tow2, usn3, vesl, whit, yell. При выборе станций мы руководствовались следующими соображениями: 1) станции должны иметь историю измерений не менее 3-х лет и 2) располагаться равномерно по территории Земли. Обработка ГНСС-измерений была выполнена с использованием программного пакета GIPSY-OASIS II. Для обработки как GPS, так и ГЛОНАСС измерений использовался метод «precise point positioning» [6], при котором координаты станций определялись

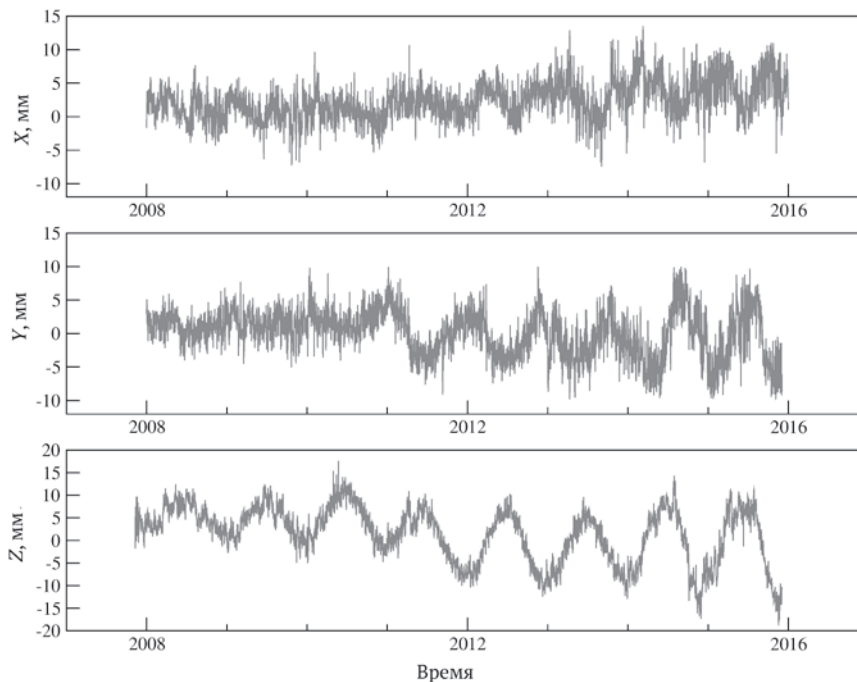


Рис. 3. Суточные ряды координат геоцентра, полученные в результате обработки измерений системы GPS

отдельно для каждой станции в «свободной сети» (см. подраздел обработки ДОРИС-измерений) с использованием заранее оцененных орбит и часов спутников. Затем «свободные» решения каждой станции объединялись в суточные комбинированные решения для всех станций и трансформировались в систему координат ITRF2008. По трудозатратам это был самый объемный компонент вычислений. Суточные временные ряды, полученные в результате обработки ГНСС данных, показаны на рис. 3 (GPS) и рис. 4 (ГЛОНАСС).

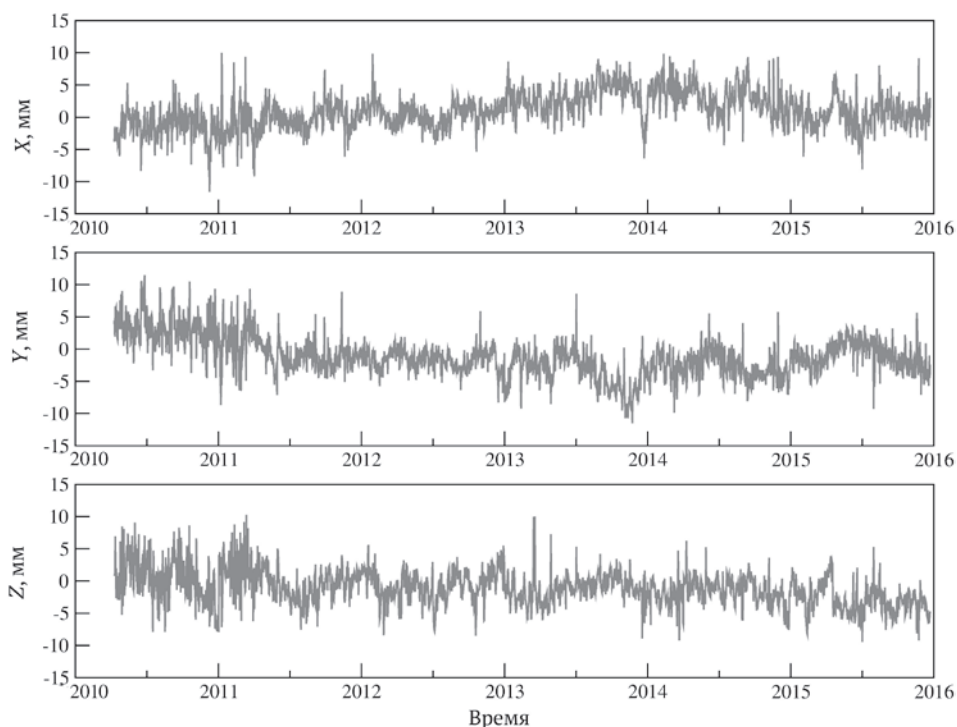


Рис. 4. Суточные ряды координат геоцентра, полученные в результате обработки измерений системы ГЛОНАСС

Анализ периодичности полученных рядов движения геоцентра

Для анализа периодичностей полученных временных рядов движения геоцентра использовался программный пакет FAMOUS, разработанный F. Mignard (CNES, Франция, <ftp://ftp.obs-nice.fr/pub/mignard/Famous>). Данная программа позволяет выполнять спектральный анализ временных рядов, заданных с любой дискретностью. Исследуемые ряды аппроксимировались следующим выражением:

$$y(t) = A_k \cdot \cos[(\omega_k \cdot t) + \varphi_k], \quad (1)$$

где A_k — амплитуда искомой периодичности; ω_k — угловая частота искомой периодичности; φ_k — начальная фаза искомой периодичности; t — время.

Таблица

Годовые периодичности гармонического анализа временных рядов движения геоцентра различных спутниковых технологий и их сравнение с геофизическими моделями и результатами, полученными другими группами анализа спутниковых измерений

Решение (модель)	Тип	X (годовая)		Y (годовая)		Z (годовая)		Период
		A, mm	φ , °	A, mm	φ , °	A, mm	φ , °	
ДОРИС, недельные (ИНАСАН)	ДОРИС-измерения	3.2 ± 0.1	211 ± 6	4.4 ± 0.1	55 ± 5	3.0 ± 0.8	271 ± 24	1993.0–2017.0
SLR, недельные (ИНАСАН)	SLR-измерения	2.6 ± 0.5	330 ± 4	2.5 ± 0.1	47 ± 11	7.8 ± 1.3	324 ± 2	1993.0–2015.6
SLR, месячные (ИНАСАН)	SLR-измерения	2.5 ± 0.5	321 ± 2	2.1 ± 0.1	50 ± 19	8.2 ± 1.2	312 ± 1	1993.0–2015.6
GPS, суточные (ИНАСАН)	GPS-измерения	1.3 ± 0.1	227 ± 3	1.9 ± 0.1	327 ± 1	6.3 ± 0.1	151 ± 1	2008.0–2016.0
ГЛОНАСС, суточные (ИНАСАН)	ГЛОНАСС-измерения	0.4 ± 0.1	252 ± 11	0.9 ± 0.1	207 ± 13	0.7 ± 0.1	183 ± 18	2010.3–2016.0
Dong et al., 2003 [8]	Геофизическая модель	4.2	314	3.2	69	3.5	325	1992.0–1995.0
Robishung et al., 2013 [9]	GPS-измерения	2.9	2	3.2	46	3.0	194	1997.0–2009.0
Collilieux et al., 2009 [10]	Геофизическая модель	2.1 ± 0.1	332 ± 2	2.1 ± 0.1	23 ± 2	2.7 ± 0.1	312 ± 2	1993.0–2006.0
Cheng et al., 2013 [11]	SLR, кинемат. метод	3.2 ± 0.4	329 ± 5	2.6 ± 0.4	59 ± 5	4.3 ± 0.3	329 ± 5	2002.0–2010.6
ITRF2014, Altamimi et al., 2016 [12]	ILRS, комбинир. решение	2.6 ± 0.1	314 ± 3	2.9 ± 0.1	40 ± 2	5.7 ± 0.2	332 ± 52	1993.0–2015.0

Найденные амплитуды и фазы годовых периодичностей временных рядов движения геоцентра с использованием выражения (1) приведены в таблице. Годовые компоненты временных рядов движения геоцентра являются наиболее значимыми по амплитуде по сравнению с амплитудами других найденных периодичностей, рассмотрение которых не входит в задачи данного исследования.

Заключение

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

– годовые амплитуды компонент движения геоцентра, полученные из обработки лазерных, ДОРИС и ГНСС измерений варьируются в пределах 0.4–3.2 мм, 0.9–4.4 мм и 0.7–8.2 мм для X , Y и Z компонент, соответственно;

– наименьшие значения имеют годовые компоненты, полученные по измерениям ГЛОНАСС;

– ГЛОНАСС годовые периодичности определяются хуже по сравнению с другими космическими технологиями с использованием предложенной методики;

– оцененные фазы компонент движения геоцентра хорошо согласуются между собой (за исключением ГНСС решений);

– амплитуды и фазы оцененных годовых компонент движения геоцентра довольно хорошо согласуются с оценками геодезических моделей и результатами анализа других центров геофизических исследований (за исключением ГНСС решений).

Исследования, проведенные в данной работе, были частично поддержаны грантом РФФИ № 15-05-03349.

Литература

1. *Petit G., Luzum B.* (Eds.) IERS Conventions (2010) // IERS Technical Note 36. — Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main. — 2010. — P. 179.

2. *Ray J.* (Ed.) IERS Analysis Campaign to Investigate Motions of the Geocenter // IERS Technical Note 25. — Central Bureau of IERS, Paris, France — 1999. — P. 121.

3. *Wu X., Ray J.* Tonie van Dam Geocenter motion and its geodetic and geophysical implications // Journal of Geodynamics. — 2012. — Vol. 58. — P. 44–61.

4. *Blewitt G., Lavallée D., Clarke P., Nurutdinov K.* A new global mode of Earth deformation: seasonal cycle detected // Science. — 2001. — Vol. 294 (5550). — P. 2342–2345.

5. Эбауэр К. В. Совместное определение координат станций, параметров вращения Земли и коэффициентов гравитационного поля из комбинированной обработки лазерных наблюдений ИСЗ. Теоретические и практические аспекты // Геодезия и Картография. — 2016. — № 1. — С. 12–20.

6. Zumberge J. F., Heflin M. B., Jefferson D. C., et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks // J. Geophys. Res. — 1997. — Vol. 102 (B3). — P. 5005–5017.

7. Kuzin S. P., Tatevian S. K., Valeev S. G., Fashutdinova V. A. Studies of the geocenter movements by 16 years of DORIS data // Adv. Space Res. — 2010. — Vol. 46 (10). — P. 1292–1298.

8. Dong D., Yunck T., Heflin M. Origin of the International Terrestrial Reference Frame // Journal of Geophysical Research. — 2003. — Vol. 108. — No. B4. — P. ETG 8–1 – ETG 8–10.

9. Rebischung P., Garayt B. Recent results from the IGS terrestrial frame combinations // International Association of Geodesy Symposia. 2013. — Vol. 138. — P. 69–74.

10. Collilieux X., Altamimi Z., Ray J., et al. Effect of the satellite laser ranging network distribution on geocenter motion estimation // J. Geophys. Res. — 2009. — Vol. 114. — Art. No. B04402.

11. Cheng M., Ries J., Tapley B. Geocenter variations from analysis of SLR data // International Association of Geodesy Symposia. — 2013. — Vol. 138. — P. 19–25.

12. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L. and Collilieux X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // J. Geophys. Res. Solid Earth. — 2016. — Vol. 121. — P. 6109–6131.

Geocenter Motion Monitoring Using GNSS, DORIS and SLR Measurements

S. P. Kuzin, K. V. Ebauer

This article presents the geocenter motion obtained in the Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences (INASAN) as a result of processing measurements made by various space geodesy techniques (GNSS, DORIS and SLR). GNSS data were processed for the time period from 2008 to 2016 using measurements from 54 stations of the IGS network equipped by the dual-system GPS+GLONASS receivers. PPP method was used for the GNSS data processing. DORIS data were processed for the time interval from 1993 to 2017 for all working IDS stations. SLR measurements from 2 high-orbit LAGEOS-1/LAGEOS-2 satellites and 3 low-orbit Stella/Starlette/AJISAI satellites were processed for the time period from 1993 to 2015 using data from all stations of the SLR network. Time series of the geocenter motion were derived from the GNSS and DORIS data using a ge-

ometrical method (so-called “network shift approach”), while an estimation of the first degree coefficient of the Earth gravity field was used for the SLR data. Amplitudes, periods and phases of the geocenter variations were estimated using the software FAMOUS (CNES, France). Amplitudes and phases of annual geocenter variations derived in the INASAN from the satellite method are in a good agreement with those obtained by other space geodesy groups and geophysical models. All time series of the geocenter motion are expressed in ITRF2008.

Keywords: geocenter motion, GNSS, DORIS, SLR, time series of the geocenter motion.