

УДК 528.28

Поправки к деформациям поверхности Земли РСДБ-станции “Симеиз”

А.Е. Вольвач, Г.С. Курбасова, Л.Н. Вольвач

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
volvach@craocrimea.ru

Поступила в редакцию 15 ноября 2017 г.

Аннотация. Радиотелескоп РТ-22 в п. Кацивели (Крым) активно участвует в международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе. Один из таких проектов разработан в отделе исследований Германии (Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG) с целью предоставления квазиинерциальной системы отсчета, реализованной согласованным положением квазара и земной системы отсчета на основе общего набора параметров и, в частности, на трех однородных геофизических моделях: “Океан”, “Атмосфера”, “Гидрология”. Для анализа вертикальных деформаций Земли в пункте Кацивели (Крым) нами использованы данные о поправках к вертикальным деформациям Земли, вычисленные по модели “Атмосфера”. Основным результатом анализа является выделение и аналитическое описание периодического тренда. При этом амплитуда обнаруженной годовой волны составляет 3.3 ± 0.5 мм.

CORRECTIONS TO DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE BY THE VLBI STATION SIMEIZ, *by A.E. Volvach, G.S. Kurbasova, L.N. Volvach.* The RT-22 radio telescope in Katsiveli (Crimea) actively participates in the international projects on the support of space-time reference systems for the monitoring of global changes and precise navigation in space. One of such projects has been elaborated at the Department for Investigations in Germany (Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG) with the aim of providing a quasi-inertial reference system realized by the coordinated position of a quasar and terrestrial reference frame based on the general set of parameters and, particularly, on homogeneous geophysical models “Ocean”, “Atmosphere” and “Hydrology”. For the analysis of vertical deformations of the Earth in Katsiveli (Crimea) we used data about corrections to vertical deformations of the Earth calculated according to the model “Atmosphere”. The basic result of the analysis is an extraction and analytical description of the periodic trend. The amplitude of the detected annual wave is 3.3 ± 0.5 mm.

Ключевые слова: геодинамика, координаты, Земля, РСДБ

1 Введение

Изучение Земли в настоящее время немыслимо без современной космической геодезии – науки об определении геометрии, гравитационного поля и вращения Земли и их эволюции во времени. Изменения в форме Земли (включая поверхность воды и ледников) являются результатом динамических процессов в твердой и жидкой оболочках Земли, влияющих на распределения масс и углового момента и, таким образом, на изменения гравитационного поля и вращения Земли.

Для обеспечения возможности сравнения различных результатов наблюдений требуется общая система координат. В настоящее время принята Международная земная система координат (International Terrestrial Reference System – ITRS) и ее практическая реализация – Международная земная система отсчета (International Terrestrial Reference Frame – ITRF). Она реализуется в виде координат и скоростей некоторого набора глобально распределенных станций наблюдений. Наиболее точную реализацию этой системы предоставляет Международная служба вращения Земли (International Earth Rotation and Reference Systems Service – IERS). Параметры этой системы вычисляются как комбинация многих глобальных и региональных решений, полученных с помощью различных методов космической геодезии: радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, Very Long Baseline Interferometry – VLBI), лунных и спутниковых лазерных локаций (ЛЛЛ и ЛЛС, Lunar and Satellite Laser Ranging – LLR and SLR), Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС, Global Navigation Satellite System – GNSS) и навигационной системы доплеровской орбитографии и спутниковой радиолокации (Дорис, Doppler Orbitography Radio-positioning Integrated by Satellite – DORIS).

В настоящее время технология радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами широко используется в международных и национальных проектах для решения очень многих фундаментальных и прикладных задач и в первую очередь для решения задач эфемеридного и координатно-временного обеспечения. Базовой системой фундаментального координатно-временного обеспечения России является единственный постоянно действующий радиоинтерферометрический комплекс “Квазар-КВО”.

22-м радиотелескоп РТ-22 Крымской астрофизической обсерватории участвовал в самых первых межконтинентальных РСДБ-наблюдениях в сентябре 1969 года. В 1994 году РТ-22 был модернизирован в рамках сотрудничества между Украиной (КРАО и ГАО НАНУ), США (NASA/GSFC) и Россией (ИКИ РАН и ИПА РАН) с целью создания постоянно действующей геодинамической РСДБ-станции и продолжения астрофизических исследований структуры и динамики внегалактических объектов с более высокой чувствительностью. Получены первые научные результаты – абсолютная и относительная (относительно Евразийской тектонической плиты) скорости движения РСДБ-станции “Симеиз” (Петров и др., 2001; Вольвач и др., 2003, 2008, 2009).

В дополнение к приливным моментам, оказываемым Луной, Солнцем и планетами, изменения параметров ориентации Земли могут быть вызваны также возбуждениями атмосферы и гидросферы (Вондрак и Рон, 2015). Транспортировка масс в глобальных геофизических жидких оболочках Земли (атмосфера, океаны, приливы, мантия, ядро) влияет на изменения параметров вращения Земли, вызывает изменения гравитационного поля и смещения геоцентра. В настоящее время благодаря высокоточным РСДБ-наблюдениям появилась возможность отслеживать и учитывать эти изменения.

Радиотелескоп РТ-22 в п. Кацивели (Крым) активно участвует в Международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе. Один из таких проектов разработан в отделе исследований Германии (Deutsche Forschungsgemeinschaft – DFG) (Сейц и др., 2016).

Целью этого проекта является предоставление квазиинерциальной системы отсчета, реализованной согласованным положением квазара и земной системы отсчета на основе общего набора параметров и, в частности, на трех однородных геофизических моделях: “Океан”, “Атмосфера”, “Гидрология”.

2 Характеристики исходных данных и методы анализа

Нами использовались данные службы IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service: Geophysical Fluids data)¹. Исходные данные представлены в виде трех временных рядов дополнений dUp (вертикальные), dN (северные), dE (восточные) с интервалами между отсчетами 0.25 суток. На рис. 1 приведены графики анализируемых данных.

Приведем результаты выполненного нами анализа данных о дополнениях к деформациям Земли dUp, dN, dE в пункте Кацивели (станция “Симеиз”), вычисленных по модели “Атмосфера” в отделе исследований DFG на основе наблюдений в сети РСДБ с участием РТ-22.

¹ <https://www.iers.org/IERS/EN/Organization/About/about.html>

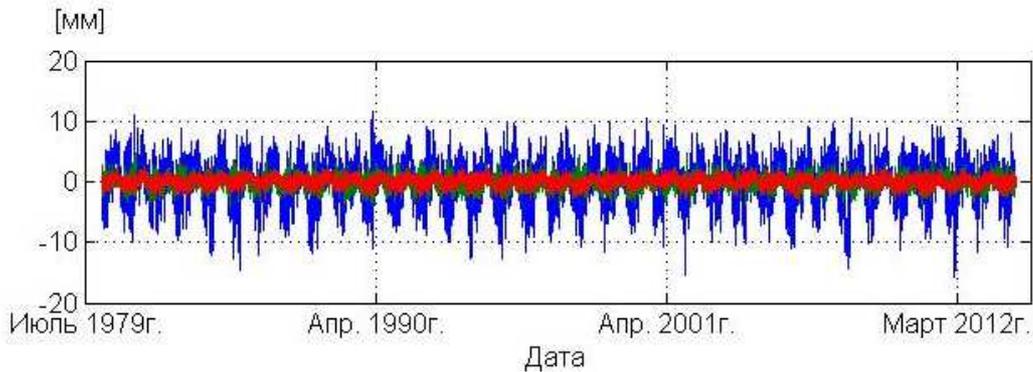


Рис. 1. Графики дополнений к деформациям (модель “Атмосфера”) поверхности земли РСДБ-станции “Симеиз”: вертикальные (dUp) – синий цвет, северные (dN) – зеленый цвет, восточные (dE) – красный цвет

2.1 Статистические характеристики данных

В таблице 1 содержится информация о статистических характеристиках данных dUp, dN, dE после удаления шума (dUp0, dN0, dE0). Характеристики белого шума ненормированного

Таблица 1. Статистические характеристики данных о величинах dUp, dN, dE по РСДБ-наблюдениям (станция “Симеиз”, модель “Атмосфера”)

Наименование данных	\bar{x}	M	M_0	X_{max}	X_{min}	R	σ
dUp0	-0.01091	0.3315	1.092	11.53	-15.69	27.22	3.768
dUpS1	0	-0.00042	-0.02397	2.253	-3.183	5.436	0.1355
dUpS2	0	-0.00040	-0.01803	0.9014	-0.9014	1.803	0.07525
dN0	$-1.4 \cdot 10^{-10}$	-0.02044	-0.1434	4.755	-4.151	8.906	1.197
dNS1	0	$3.82 \cdot 10^{-5}$	-0.0069	0.3515	-0.3512	0.7027	0.06151
dNS2	0	$6.8 \cdot 10^{-5}$	-0.00476	0.241	-0.261	0.502	0.05652
dE0	$-4.4 \cdot 10^{-10}$	0.3476	0.1357	2.312	-2.911	5.223	0.7535
dES1	0	0.00033	0.00015	0.350	-0.264	0.614	0.06315
dES2	0	0.00033	0.00524	0.2669	-0.2268	0.4937	0.05924

(dUpS1, dNS1, dNS1) и нормированного (dUpS2, dNS2, dES2) содержатся в соответствующих строках. В столбцах таблицы последовательно указаны: наименования данных, \bar{x} – среднее, M – медиана, M_0 – мода, X_{max} – максимальное отклонение, X_{min} – минимальное отклонение, R – ранг, σ – стандартное отклонение.

Данные в табл. 1 демонстрируют существенное превышение полезного сигнала над уровнем белого шума. Более того, проведенное нами тестирование с помощью статистического теста gunstest (MATLAB, Statistics Toolbox) показало, что с вероятностью 95 % порядок следования данных в трех сериях не случайный.

2.2 Изучение структуры данных и непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ

Для трех серий данных нами вычислены линейные тренды, исходя из глобальной модели вида

$$T(x) = p_1 \cdot x + p_2, \tag{1}$$

где p_1 и p_2 – коэффициенты полинома первой степени, время $x = x_i - x_0$, x_0 – начальная дата серии данных.

Величины коэффициентов (с 95 % доверительными интервалами), вычисленных по модели (1) для каждой серии данных, приведены ниже:

$$\begin{aligned}
 & dUp0 : \\
 & p_1 = 1.06 \cdot e^{-007}(-8.879 \cdot e^{-006}, 9.091 \cdot e^{-006}), \\
 & p_2 = -0.01158(-0.07673, 0.05357); \\
 & dN0 : \\
 & p_1 = -2.021 \cdot e^{-008}(-2.856 \cdot e^{-006}, 2.815 \cdot e^{-006}), \\
 & p_2 = 0.0001269(-0.02043, 0.02069); \\
 & dE0 : \\
 & p_1 = 1.218 \cdot e^{-009}(-1.816 \cdot e^{-006}, 1.819 \cdot e^{-006}), \\
 & p_2 = -7.646 \cdot e^{-006}(-0.01319, 0.01317).
 \end{aligned}$$

Сопоставляя величины коэффициентов линейных трендов (1) с характеристиками шума для каждой серии данных (см. табл. 1), приходим к выводу о незначимости линейных трендов, и дальнейший анализ посвящается выявлению периодических колебаний.

Выбор метода частотно-временного анализа данных обусловлен изменчивостью природных процессов на различных интервалах времени. В качестве подходящего в этом случае метода нами выбран непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ.

Непрерывный частотно-временной вейвлет-анализ основан на сопоставлении масштабных коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования с частотой Фурье.

Таблица 2. Коэффициенты моделей деформаций dUp0 с 95 % доверительными границами

Модель	a, мм	$P = \frac{2 \cdot \pi}{b}$, сут	C, рад
sin1	a1 = 3.368 (3.331, 3.404) a2 = 3.331 (3.236, 3.426)	P1 = 365.30 (365.30, 65.09)	c1 = -1.432 (-1.453, -1.41)
sin2	a1 = 0.197 (0.1023, 0.2917) a2 = 3.331 (3.236, 3.426)	P1=370.47 (373.33, 367.88) P2 = 365.09 (365.30, 365.09)	c1 = 1.362 (0.2736, 2.451) c2 = 4.792 (4.727, 4.857)
sin3	a1 = 0.2443 (0.07782, 0.4108) a2 = 3.283 (3.116, 3.45) a3 = -0.2372 (-0.2734, -0.201)	P1 = 365.6 (372.45, 366.79) P2 = 365.09 (365.30, 364.88) P3 = 510.83 (512.49, 509.17)	c1 = 0.92 (-0.2813, 2.121) c2 = 4.763 (4.673, 4.852) c3 = 2.959 (2.654, 3.263)

Результаты вычислений параметров трех моделей (2) приведены в табл. 2 и 3. В табл. 2 приведены параметры синусоидальных колебаний по модели (2) в данных dUp0 с 95 % доверительными границами. Нами выбрана глобальная модель приближения периодических колебаний, которая соответствует периодическим функциям и задается формулой

$$y = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(b_i x + c_i), \quad (2)$$

где a – амплитуда, b – частота, c – фазовая постоянная для каждого синусоидального члена, n – количество членов ряда. Это уравнение тесно связано с рядом Фурье.

С достоверностью 0.95 простая модель ($n = 1$) описывает колебание с периодом 365.3 сут и амплитудой, равной 3.368 мм.

Таблица 3. Коэффициенты моделей деформаций dE0 с 95 % доверительными границами

Модель	a, мм	$P = \frac{2\pi}{b}$, сут	C, рад
sin1	a1 = 0.506 (0.498, 0.514)	P1 = 364.66 (364.66, 364.66)	c1 = -1.657 (-1.689, -1.625)
sin2	a1 = 0.5086 (0.1023, 0.2917) a2 = 0.03192 (0.02298, 0.04086)	P1 = 364.88 (364.88, 364.66) P2 = 353.38 (355.38, 351.41)	c1 = -1.61 (-1.657, -1.577) c2 = 1.87 (1.231, 2.51)
sin3	a1 = 0.5111 (0.5026, 0.5195) a2 = 0.03037 (0.02198, 0.03876) a3 = 0.1748 (0.1667, 0.1828)	P1 = 364.66 (364.88, 364.66) P2 = 352.59 (354.38, 350.62) P3 = 182.7 (182.8, 182.6)	c1 = -1.624 (-1.66, -1.588) c2 = 1.688 (1.075, 2.302) c3 = 0.996 (0.9035, 1.088)

3 Заключение

Квазиинерциальная система отсчета, реализованная в отделе исследований DFG, включает поправки к деформациям Земли, вычисленные с помощью однородных геофизических моделей “Океан”, “Атмосфера” и “Гидрология”. С помощью анализа трех временных рядов поправок к деформациям Земли станции РСДБ “Симеиз”, вычисленных по модели “Атмосфера” за период 1980–2014 гг., обнаружено существенное колебание с периодом 1 год в восточной и вертикальной составляющих. Параметры этого колебания для каждой составляющей поправок устойчивы к изменению порядка n синусоидальной модели (см. табл. 2, 3). Кроме годовой волны, модель (2) при n = 2 и n = 3 содержит колебания с периодами около 370, 353 и 182 суток. В северной составляющей отсутствуют непрерывные периодические колебания в рассматриваемом интервале частот.

Литература

- Вольвач и др. (Volvach A., Sokolova Yu., Shabalina O.) // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. 2003. Greenbelt, MD 20771 USA. P. 83.
- Вольвач и др. (Volvach A.E., Gor’kavyi N.N., Dmytrotsa A.I., Levitskii L.S.) // Bull. Crim. Astrophys. Observ. 2008. V. 104. Issue 1. P. 145.
- Вольвач и др. (Volvach A.E., Gor’kavyi N.N., Dmitrotsa A.I., and Levitsky L.S.) // Bull. Crim. Astrophys. Observ. 2009. V. 105. P. 150.
- Вондрак и Рон (Vondrak J. and Ron C.) // Serb. Astron. J. 2015. № 191. P. 59. DOI: 10.2V
- Петров и др. (Petrov L., Volvach A., Nesterov N.) // Kinem. Phys. Celest. Bodies. 2001. V. 17. № 5. P. 424.
- Сейц и др. (Seitz M., Blossfeld M., Angermann D., et al.) // in Deutsches Geodatisches Forschungsinstitut. Munich. 2016. DOI:10.1594/PANGAEA.864046.