

Исследование основных компонентов временных рядов изменения координат станций GNSS и DORIS в Китабе

© Д. Ш. Фазилова¹, С. П. Кузин², М. Д. Махмудов³

¹АИ АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

³ТУИТ, г. Ташкент, Узбекистан

Для дальнейшего построения кинематической опорной системы региона в работе с помощью аддитивной модели выполнены декомпозиция (тренд, сезонный и стохастический компоненты) и построение прогнозных моделей временных рядов координат спутниковых станций КИТЗ (GNSS, Global Navigation Satellite System), КИУВ и КИВС (DORIS, фр. Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) в Китабе. Прогнозная модель временных рядов описывает около 99 % общей вариации уровней временных рядов и подтверждает высокую надежность прогнозирования для плановых координат независимо от периода наблюдения. Однако для высотной составляющей координат пунктов КИТЗ и КИУВ получено согласование лишь на уровне 40 %. Прогнозная модель для высотного компонента временного ряда координат новой станции DORIS КИВС показала уровень достоверности модели порядка 70 % несмотря на короткий интервал наблюдений (1.5 года) и позволяет сделать вывод о возможности проведения дальнейших исследований пункта КИВС совместно с гидрологическими (напр., GRACE, Gravity Recovery And Climate Experiment), сейсмическими, гравиметрическими измерениями для построения детальной геофизической модели опорной станции в Китабе.

Ключевые слова: кинематическая опорная система координат, прогнозная модель временных рядов GNSS и DORIS.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.49.69-77>

Введение

В настоящее время измерения, полученные методами космической геодезии, в сочетании с геологическими и сейсмическими данными используются Международной службой вращения Земли и системы отсчета (IERS) для создания опорной системы координат ITRF (International Terrestrial Reference Frame). На сегодняшний день при интеграции ITRF на региональном уровне определяющим фактором являются геодинамические аспекты. Последняя версия ITRF2014 вычислена на основе моделирования нелинейного движения станций с учетом сезонных сигналов (годовых, полугодовых) и постсейсмической деформации (Post-Seismic deformation, PSD) [1, С. 6109–6131]. Для реализации кинематической опорной системы координат, определяемых на основе спутниковых систем GNSS, DORIS, необходимо решить следующие

задачи: выявить вековой тренд и скрытые периодичности в амплитудно-временных рядах координат станций сети, обосновать и интерпретировать физические причины вековых и периодических изменений координат пунктов. Для каждой эпохи такие данные получаются независимо друг от друга. И при известных условиях момента наблюдения последующие значения временного ряда могут быть предсказаны, то есть возможно построение прогнозной модели ряда. Существует большое число методов анализа временных рядов, такие как регрессионный анализ, методы сезонной декомпозиции, анализ Фурье, различные методы сглаживания. К их общим недостаткам можно отнести необходимость задания явной параметрической модели тренда и требование стационарности остатка.

На протяжении более 25 лет на территории бывшей станции Международной Службы Широты в Китабе успешно функционируют постоянные станции международных геодезических проектов IGS (International GNSS Service, Международная служба ГНСС) и IDS (International DORIS Service, Международная служба DORIS). Ранее авторами было проведено исследование временных рядов координат опорных GNSS-пунктов в Китабе, Ташкенте, Майданаке и Майдантале [2, С. 281–287]. Была предложена аддитивная модель для выделения основных компонент рядов и прогнозирования будущих значений временных рядов. Получено согласие на уровне 98 % для данной модели. Впервые для обозначенной территории были выполнены оценки сезонного годового сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье. Амплитуды годового сигнала составили для широты от 1.73 до 8.76 мм, для долготы — от 0.82 до 11.92 мм, для высоты — от 3.11 до 40.81 мм [3, С. 262–267]. Помимо векового тектонического движения около 3 см в год выявлены также периодические изменения скорости движения станций «Майданак» и «Майдантал». Предварительный анализ стохастического компонента временных рядов координат станций в Китабе DORIS (KIUB) и GNSS (KIT3) показал, что более стабильными являются ряды координат станции DORIS после 2003 г. за счет улучшения точности определения орбит, позиционирования и установки маяка 3-го поколения [2, С. 281–287]. В 2016 г. станция DORIS в Китабе была перенесена на новое место для улучшения видимости вокруг станции. Временные ряды, полученные с нового пункта сети IDS (KIVC), обрабатываются различными аналитическими центрами: CNES/CLS (Centre National D’Etudes Spatiales/Collecte Localisation Satellites), ИНАСАН (Институт астрономии РАН), IGN (Institut Geographique National) и др. с использованием стандартов IERS 2010 [4, С. 1–179] различных моделей коррекции атмосферных и других ошибок измерений. Если учитывать, что модель обработки данных также влияет на стабильность опорных пунктов [5, С. 125–131], представляет практический интерес провести дополнительный сравнительный анализ временных рядов координат станций GNSS и DORIS в Китабе.

Данные и обработка

Геоцентрические координаты станций для проведения анализа получены с сайта геодинамической службы Crustal Dynamics Data Information System (CDDIS) [6]. Данные для станции GNSS/IGS KIT3 (с 21.03.1999 по 10.03.2018)

вычислены с помощью программы EPOS.P8 немецкого центра исследования Земли (German Research Centre for Geosciences GFZ) [7, С. 79–87]. Данные для станции DORIS/IDS KIUB аналитических центров CNES/CLS (grg18wd06) и Института астрономии РАН (ina18wd07) в формате STCD (STation Coordinate Difference) за период 03.06.2001–12.10.2016 получены с помощью пакета программ GINS/DYNAMO [8].

Исходные данные были выражены в локальной опорной системе (Local north, east, up coordinates — *NEU*, север, восток, зенит). Декомпозиция (тренд, сезонный и стохастический компоненты) и вычисление прогнозных моделей временных рядов в данной работе выполнена с помощью аддитивной модели [9, С. 201–208]:

$$S(t_i) = T(t_i) + C(t_i) + P(t_i), \quad (1)$$

в которой каждый компонент ряда $S(t_i)$, полученный в момент наблюдений t_i (где $i = 1, 2, 3, \dots, N$), включает тренд $T(t_i)$ — долгопериодический линейный компонент, изменяющийся во времени; периодическую составляющую $C(t_i)$ — циклические колебания, связанные с сезонными изменениями; стохастическую составляющую $P(t_i)$ — случайные или систематические флуктуации, связанные с внешними воздействиями, ошибками измерений и обработки. Для описания долгопериодического компонента, описывающего собственно движение станции, используют полиномиальную функцию порядка m

$$T(t_i) = \sum_{k=1}^m a_k t_i^{k-1} \quad (2)$$

с a_k -параметром (где $k = 1..m$), зависящим от степени полиномиальной функции (для линейного тренда $m = 2$). Оценка циклического компонента $C(t_i)$ выполняется в полученном после удаления тренда ряде $D(t_i)$ с использованием выражения

$$C(t_i) = \sum_{i=1}^p [A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i)] \quad (3)$$

Здесь $\omega = 2\pi$ рад/год — угловая скорость, A , φ — соответственно амплитуда и фаза периодического годового сигнала, которые оцениваются обычно методом наименьших квадратов или на основе спектрального анализа.

В случае аддитивной модели сезонный индекс S вычисляется усреднением всех значений n временного ряда после удаления тренда $D(t_i)$ для данного месяца (j) по всему ряду:

$$\hat{S}_j = \frac{1}{n_j} \sum D_{j+12(k-1)} \quad (4)$$

Стохастический компонент $P(t_i)$ временного ряда определяется путем простого вычитания тренда и сезонного компонента из исходных данных.

Результаты

Простроение тренда временных рядов координат станции состояло из оценки параметров a_k в уравнении (2) для случая линейной регрессии методом наименьших квадратов. Коэффициент a_2 показывает уменьшение (–) или уве-

личение (+) линейной скорости станции (табл. 1). Соответствие линии тренда (Y_i) фактическим значениям ряда данных (y_i) определялся с помощью коэффициента достоверности аппроксимации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - Y_i)^2}{\sum_i Y_i^2 - \frac{1}{n} \sum_i Y_i^2}$$

Для долгопериодического компонента для плановых координат станций KIT3 и KIUB значение коэффициента корреляции составило порядка 0.99. Для высотного компонента станция GNSS/KIT3 получен более стабильный результат ($R^2 = 0.32$) по сравнению с DORIS данными ($R^2 < 0.1$). Для новой же станции DORIS KIVC данные обоих аналитических центров по всем координатам показали менее стабильный результат в виду короткого периода наблюдений (1.5 года), недостаточного для оценки долгопериодического компонента и собственно скорости станции.

Таблица 1

Тренд, определенный полиномиальной функцией второго порядка $T(t_i) = a_1 + a_2 t_i$, и коэффициент достоверности аппроксимации (R^2) для плановых (T_U) и высотного компонентов временных рядов

Станция	$T_n(t_i)$		$T_E(t_i)$	R_E^2	$T_U(t_i)$	R_U^2
KIT3		0.99	$-627.87 + 0.0145 t_i$	0.99	$162.1 - 0.0038 t_i$	0.32
KIUB/ GRG	$-471.37 + 0.013 t_i$	0.87	$-2708.1 + 0.074 t_i$	0.99	$67.975 - 0.0018 t_i$	0.10
KIUB/ INA	$-416.1 + 0.0114 t_i$	0.70	$-2605.3 + 0.0716 t_i$	0.98	$-6.5707 - 0.00003 t_i$	0.0001
KIVC/ GRG	$-734.61 + 0.0205 t_i$	0.27	$-2456.3 + 0.0684 t_i$	0.74	$-130.7 + 0.003 t_i$	0.008
KIVC/ INA	$-1082.7 + 0.0266 t_i$	0.18		0.44	$-314.09 + 0.007 t_i$	0.02

Авторами выполнено сравнение скоростей станций, вычисленных с помощью сервиса UNAVCO [10] для станции «Китаб» по глобальным тектоническим моделям NNR-NUVEL-1A, GSRM v1.2, GEODVEL2010, ITRF2008 (табл. 2) с данными аддитивной модели (табл. 3). Результаты подтвердили северо-восточное направление движения Китаба со средней скоростью 27 мм/год, большей частью обусловленное долготным дрейфом региона. Скорости станции KIT3/GNSS показывают хорошую сходимость с моделью GEODVEL2010 по долготе и с моделью ITRF2008 по широте. Для станции DORIS результаты по широте согласуются с моделью NUVEL-1A, а по долготе — с моделью ITRF2008. Очевидно, что разброс данных обусловлен недостаточной плотностью спутниковой сети в данном регионе, использованной при построении геодезических моделей.

Значения горизонтальных скоростей (v_N , v_E) станции «Китаб»
по данным глобальных тектонических моделей

Пункт	GEODVEL 2010		ITRF2008		NUVEL 1A		GSRM v1.2	
	v_N мм/год	v_E мм/год	v_N мм/год	v_E мм/год	v_N мм/год	v_E мм/год	v_N мм/год	v_E мм/год
Китаб	2.98	27.67	4.12	28.18	0.24	25.98	3.81	29.71

Таблица 3

Значения горизонтальных скоростей (v_N , v_E) станции «Китаб»
по данным аддитивной модели

Пункт	Аддитивная модель		
	v_N , мм/год	v_E , мм/год	v_U , мм/год
KIT3/GNSS (GFZ)	5.44	27.55	1.39
KIUB/DORIS (GRG)	7.41	26.28	3.25
KIUB/DORIS(INA)	7.84	25.08	3.21
KIVC/DORIS (GRG)	7.48	23.98	4.74
KIVC/DORIS (INA)	7.81	28.83	9.13

Сезонный компонент прогнозной модели вычислен с помощью уравнения (3), а оценка амплитуды и фазы периодического сигнала проводилась с использованием Фурье-преобразования в программе PERIOD04 [11] (табл. 4). Станция KIVC, по причине короткого интервала наблюдений, не включена в анализ периодического компонента.

Таблица 4

Амплитуда A (мм), фаза φ (месяцы) и ошибки σ (мм) годового сигнала

Пункт	Широта (N)				Долгота (E)				Высота (U)			
	A	σ_A	φ	σ_φ	A	σ_A	φ	σ_φ	A	σ_A	φ	σ_φ
KIT3	1.52	0.31	9.0	0.03	4.32	0.57	2.1	0.02	3.27	0.48	7.2	0.02
KIUB	2.67	0.41	4.5	0.03	4.04	0.87	10.5	0.03	3.67	0.47	11.6	0.02

На рис. 1 приведены полученные по аддитивной модели прогнозные модели временных рядов координат станции «Китаб». Для оценки качества построенной модели применяется сумма квадратов полученных абсолютных

ошибок: $z = 1 - \frac{\sum P(t_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$ По данным коэффициента корреляции z исходного

временного ряда и прогнозной модели из табл. 4 имеем, что наиболее надежная модель получена для временных рядов KIT3 и решения ИНАСАН для модернизированной станции KIVC. Прогнозная модель описывает около 99 % вариаций временных рядов для горизонтальных координат и в то же время показывает влияние шумовой компоненты на модель временного ряда изменения высоты станций KIUB и KIT3, обусловленное, как было отмечено ранее, большей частью многопутностью сигнала вокруг этих станций. Следует отметить, что результаты для нового модернизированного пункта KIVC продемонстрировали точность прогнозной модели для высоты порядка 70 % (рис. 2).

Таблица 4

Коэффициент корреляции z между исходным временным рядом и прогнозной аддитивной моделью (%)

Пункт	N	E	U
KIT3/GNSS (GFZ)	99	98	35
KIUB/DORIS (GRG)	86	99	20
KIUB/DORIS(INA)	69	98	12
KIVC/DORIS (GRG)	68	92	59
KIVC/DORIS (INA)	94	83	67

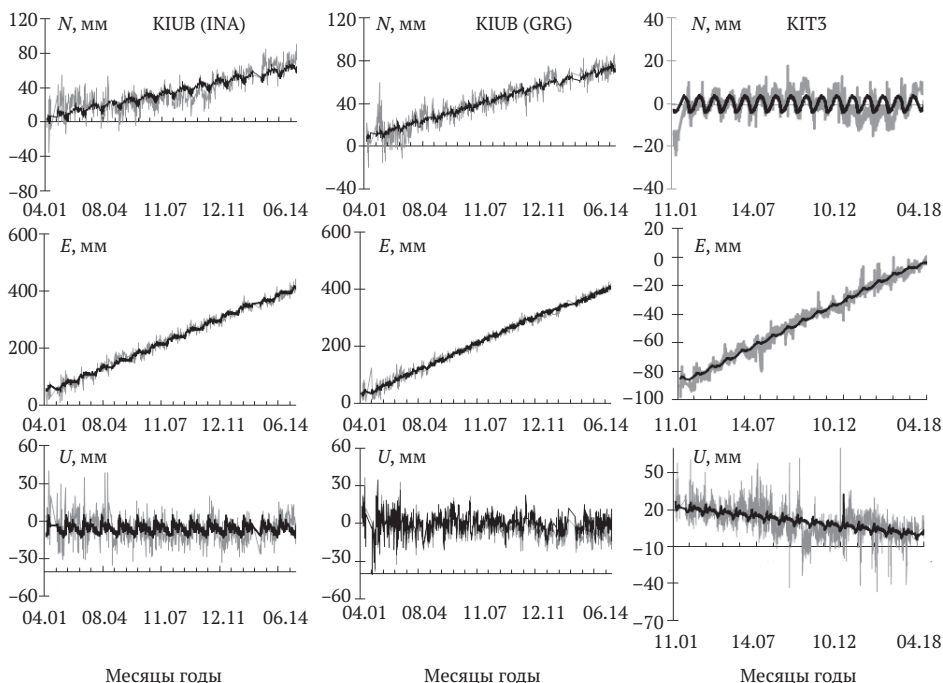


Рис. 1. Временные ряды изменения координат и их прогнозные модели для станций GNSS/KIT3 и DORIS/KIUB по данным центров ИНАСАН (INA) и CNES/CLS(GRG)

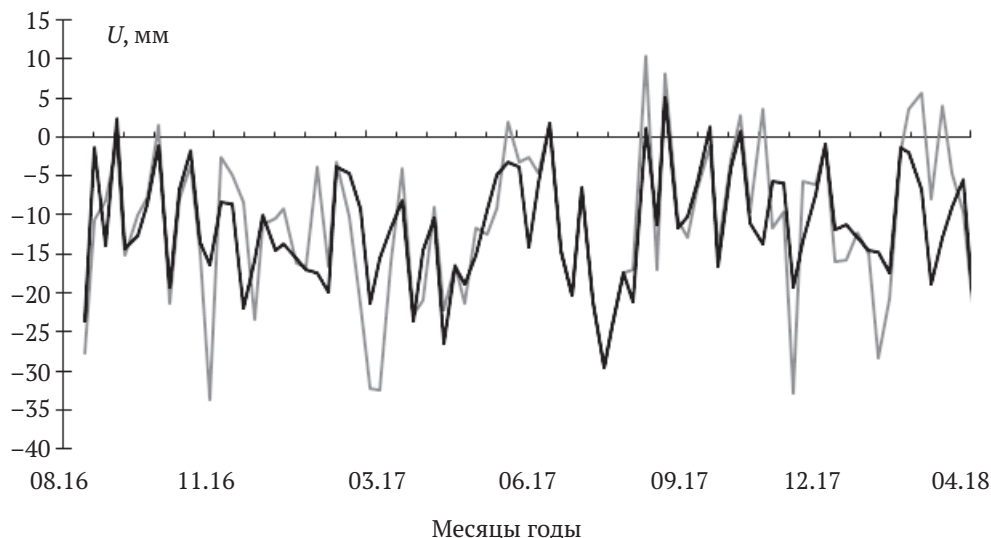


Рис. 2. Временной ряд изменения координат и его прогнозная модель для станции DORIS/KIVC по данным центра ИНАСАН (INA)

Заключение

В работе проведен анализ основных компонентов временных рядов опорной спутниковой станции Китаб, представляющей интерес с точки зрения уникального долгопериодического банка данных — измерений различных систем (GNSS, DORIS). Представлено построение прогнознй модели временного ряда, которая будет использоваться при реализации кинематической опорной системы региона. Декомпозиция (тренд, сезонный и стохастический компоненты) и построение прогнозных моделей временных рядов координат спутниковых станций GNSS (KIT3) и DORIS (KIUB, KIVC) выполнялись с помощью аддитивной модели.

Результаты вычислений скоростей для станций показывают хорошую сходимость с моделями GEODVEL2010 и ITRF2008 в долготном компоненте, в то время как по широте результаты согласуются с моделями NUVEL-1A и ITRF2008. Очевидно, разброс данных обусловлен еще недостаточной плотностью спутниковой сети в регионе, использованной в тектонических моделях. Различные стратегии (программы, решения для орбит и др.), используемые аналитическими центрами при обработке измерений, могли оказать влияние на точность определения локального тренда, вызванного смещением геоцентра и представляющего собой не вертикальное движение относительно геоцентра, а являющегося артефактом конкретного подхода к анализу данных. Амплитуды сезонных годовых сигналов, определенные с помощью спектрального анализа Фурье, составили 1.52 мм, 4.32 мм и 3.27 мм для станции KIT3 и 2.67 мм, 4.04 мм и 3.67 мм для станции KIUB соответственно по широте, долготе и высоте.

Построенная прогнозная модель временных рядов описывает около 99 % общей вариации уровней исходных временных рядов и подтверждает высокую надежность прогнозирования для плановых координат независимо от периода наблюдения. Однако для высотной составляющей получено согласие на уровне 40 % для старых пунктов KIT3 и KIUB. Прогнозная модель для высотного компонента новой станции DORIS KIVC показала уровень достоверности модели порядка 70 %, что позволяет сделать вывод о возможности проведения дальнейших исследований данных нового пункта KIVC совместно с гидрологическими (например, GRACE), сейсмическими, гравиметрическими измерениями для построения детальной геофизической модели станции.

Л и т е р а т у р а

1. *Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modelling nonlinear station motions // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* — 2016. — no. 121. — P. 6109–6131.

2. *Fazilova D., Ehgamberdiev Sh., Kuzin S.* Application of time series modeling to national reference frame realization // *Geodesy and Geodynamics.* — Elsevier: China, 2018. — Vol. 10, no. 4. — P. 281–287.

3. *Фазилова Д. Ш., Эгамбердиев Ш. А., Халикова А. В.* Исследование основных составляющих временных рядов изменения координат Ташкентской станции Глобальной навигационной спутниковой системы // *Узбекский физический журнал.* — Ташкент, 2017. — № 5 (19). — С. 262–267.

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

5. *Bogusz J., Figurski M.* Annual signals observed in regional GPS networks // *Acta Geodyn. Geomater.* — 2014. — Vol. 11, no. 2 (174). — P. 125–131.

6. The Crustal Dynamics Data Information System *CDDIS* [Электронный ресурс]. — URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 10.03.2019).

7. *Gendt G., Dick G., Söhne W.* GFZ Analysis Center of IGS — annual report 1998, in: Gowe, K., Neilan, R., Moore, A. (Eds.), *IGS 1998 Technical Reports.* — Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 1999. — 1999. — P. 79–87.

8. *Marty J. C., Loyer S., Perosanz F., Mercier F., Bracher G., Legresy B., Portier L., Capdeville H., Fund F., Lemoine J. M., Biancale R.* GINS: the CNES/GRGS GNSS scientific software // *3rd International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, ESA Proceedings WPP326.* — Copenhagen: 2011. — Vol. 31. — P. 8–10.

9. *Айвазян С. А.* Прикладная статистика. Основы эконометрики. Том 2. Учебник для вузов в 2 т. — М.: ЮНИТИ, 2001. — 432 с.

10. A non-profit university-governed consortium, facilitates geoscience research and education using geodesy UNAVCO [Электронный ресурс]. - URL: <https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> (дата обращения: 17.03.2019).

11. *Lenz P., Breger M.* Period04. User Guide // *Communications in Asteroseismology.* — 2005. — Vol. 146 — P. 53–136.

Time Series of Changes in the Coordinates of the GNSS and DORIS Stations in Kitab: investigation of the main components

D. Sh. Fazilova, S. P. Kuzin, M. D. Makhmudov

This paper is devoted to our studies of the current kinematic terrestrial reference system in Uzbekistan. The additive model is used to obtain the parameters of the stations' coordinate time series predicted and to investigate ways to construct these time series forecast models in future. The KIT3 (GNSS), KIUB and KIVC (DORIS) Kitab station coordinate time series have been decomposed (in their trend, seasonal and stochastic components), and their forecast models are constructed. The forecast model of the KIT3 and KIUB station coordinate time series explains 99 % of the time series total variation for the horizontal coordinates and about 40 % for the vertical coordinates. The forecast model for the height component of the new DORIS KIVC station has shown a model confidence level of about 70 % which allows us to conclude that it is possible to continue our studies of this station's data in combination with hydrological (for example, GRACE), seismic and gravimetric measurements in order to build a detailed geophysical station model.

Keywords: kinematic reference coordinate system, additive forecast model of GNSS and DORIS time series.