

УДК 528.91

DOI 10.33764/2411-1759-2023-28-4-150-157

Анализ вариаций в движении Северного полюса для повышения точности координатно-временных определений

В. М. Тиссен¹, Г. В. Шувалов¹, Г. В. Симонова^{2}*

¹ Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Новосибирск,
Российская Федерация

² Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация

* e-mail: simgal@list.ru

Аннотация. В настоящей статье рассмотрен метод прогнозирования координат Северного полюса, учитывающий влияние трендовых, квазипериодических, регулярных и высокочастотных вариаций. Приведен необходимый графический материал, иллюстрирующий картину перечисленных вариаций с 2000 г. по настоящее время. В частности, показано закономерное изменение амплитуды чандлеровского периода (ЧП). Так, с 2006 по 2017 г. амплитуда ЧП равномерно уменьшается с максимума до нулевого значения, а с 2020 г. и по настоящее время равномерно увеличивается. На основании анализа поведения трендовых изменений координат полюса показано, что в настоящее время движение среднего полюса направлено в сторону меридиана Гринвича, а не в сторону Северной Америки, как это приведено в ряде литературных источников. Практическая реализация предлагаемого метода выразилась в создании программ прогнозирования координат полюса и Всемирного времени на сроки от одного до 90 дней. При этом точность вычисляемых прогнозов с помощью данных программ превышает точность аналогичных прогнозов, выставляемых на сайте Международной службы вращения Земли. Проблема высокоточного прогнозирования координат полюса и Всемирного времени в настоящее время приобрела особую актуальность, особенно в свете принятой федеральной целевой программой (ФЦП) развития ГЛОНАСС до 2030 г. в области повышения точности эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО).

Ключевые слова: вращение Земли, гармоническая модель, перемещения полюса, анализ, методы прогнозирования, вариации, чандлеровский период, тренды

Введение

История астрономических наблюдений за изменчивостью широт обсерваторий насчитывает не менее 300 лет. В конце XIX в. С. Чандлером на основании анализа нескольких десятков тысяч определений широты с разных обсерваторий за 200-летний период наблюдений были обнаружены регулярные изменения положения Северного географического полюса с периодами 365 и порядка 436 суток [1]. Период 436 суток, названный впоследствии пе-

риодом Чандлера (ЧП), обусловлен явлением свободной нутации – движением текущего положения полюса. Теоретически это явление было предсказано еще в 1765 г. Эйлером на основе решения динамических уравнений для случая модели твердой Земли при условии несовпадения мгновенной оси вращения Земли с осью ее главного момента инерции. Вычисленный Эйлером период свободного движения полюса (свободной нутации) оказался равным 305 суткам [2]. Впоследствии С. Ньюкомом было показано, что упругие де-

формации Земли и гидросферы увеличивают период свободной эйлеровской нутации с 10 до 14 месяцев [3].

С появлением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и других новых методов космической геодезии точность определений параметров вращения Земли (ПВЗ) возросла на порядки в сравнении с эпохой астрометрических наблюдений. В движении географических полюсов Земли и неравномерностях ее вращения стали различимы тонкие эффекты, несущие информацию о разнообразных процессах в земных недрах и атмосфере. Развитие средств вычислительной техники привело к широким возможностям в создании и развитии новых методов исследования и анализа временных рядов. Тем не менее существенного повышения точности прогнозирования ПВЗ не произошло, что, очевидно, связано с отсутствием надежных прогностических моделей сложных процессов статистическими методами. Для решения этой проблемы в настоящей статье предложен метод, состоящий в преобразовании сложных временных рядов ПВЗ на группу более простых, имеющих явные статистические закономерности.

Актуальность проводимых исследований обусловлена принятием новой ФЦП развития ГЛОНАСС до 2030 г., в которой выдвинуты повышенные требования к надежности и точности прогнозирования ПВЗ [4].

Методы и материалы

В первом приближении движение Северного полюса состоит из двух независимых составляющих: нерегулярного перемещения условного среднего полюса и регулярного циклического перемещения мгновенного полюса. Перемещение среднего полюса происходит по сложной извилистой линии в сторону Северной Америки со скоростью порядка 10 см в год [5]. Движение мгновенного полюса в основном обусловлено наложением годового и чандлеровского периодов, что создает шестилетнюю циклическую картину биений в виде закручивающейся или раскручивающейся спирали с максимальным радиусом до 12 м. В работах [6, 7] отмеча-

ется, что амплитуда и фаза ЧП на протяжении всей истории наблюдений претерпевают существенные изменения. Так, например, в 1020-х гг. прошедшего столетия амплитуда ЧП уменьшалась практически до нуля с одновременным изменением его фазы на 180° . В работе [8] по результатам анализа данных движения полюса за 1846–2008 гг. было обнаружено, что в эпохи, середины которых приходятся на 1846, 1925, 2005 гг. наблюдались минимумы амплитуды ЧП. В работах [9, 10] показано наличие изменения фазы ЧП в эти эпохи.

Развитие новых методов анализа сложных нестационарных сигналов методами компьютерного моделирования позволило уточнить вклады элементарных составляющих в общий уровень сигнала и оценить величину шума. При исследовании рядов ПВЗ широкое распространение получили методы динамического спектрального и вейвлет-анализа, сингулярного спектрального анализа, нейронные сети, а также детерминированные модели, применяемые, в частности, в международной службе вращения Земли (МСВЗ) [11–15]. Однако нестабильность ЧП приводит к затруднениям при создании моделей движения, полюса и параметры которых сильно зависят от начальных условий расчета. Чем сложнее характер изменений рядов ПВЗ, тем больше возникает погрешностей в их прогнозировании. Поэтому нами предложен путь решения данной проблемы, состоящий в упрощении динамики рядов ПВЗ путем их разложения на отдельные вариации, аппроксимирующие трендовые, регулярные и квазипериодические вариации. Для этого из частотного спектра изменений ПВЗ были выделены полосы, в границах которых строилась модель перечисленных вариаций. Дальнейшее уточнение параметров гармонических компонент этих моделей выполнялась с применением сингулярного спектрального анализа (ССА) и метода наименьших квадратов [16–18] по результатам прогнозирования на известные данные. Модели полных изменений ПВЗ, таким образом, могут быть получены путем объединения гармоник моделей отдельных вариаций в общий полигармонический ряд.

Результаты

На рис. 1 жирными линиями показаны трендовые изменения координат полюса x_p (синий) и y_p (зеленый) на фоне известных данных с января 2000 г. по ноябрь 2022 г. с прогнозом (пунктирная линия) тренда до 2030 г.

Показанные на рис. 1 трендовые вариации включают в себя долгопериодические гармо-

ники с периодами 36,0; 18,5; 11,5 и 8,5 лет и амплитудами 450,0; 22,0; 2,5; 3,2; 3,5 угл. мс.

На рис. 2 показаны квазипериодические вариации координат полюса на фоне с января 2000 г. по декабрь 2022 г. с прогнозами до января 2030 г. Компоненты этих вариаций включают в себя группу из 8–10 гармоник, из которых наиболее значимые имеют периоды 2,0; 2,2; 2,5; 3,0 и 4 года.

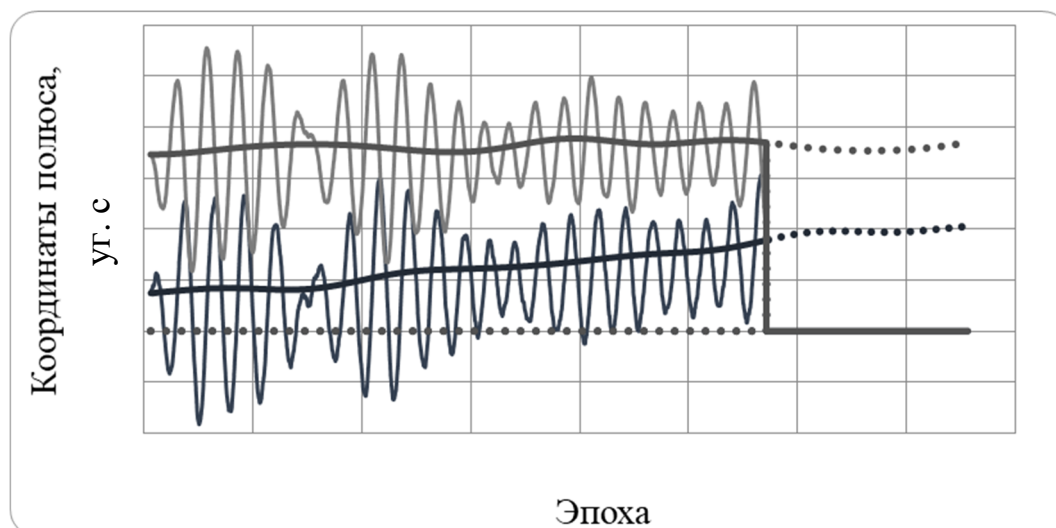


Рис. 1. Трендовые изменения координат полюса x_p , y_p

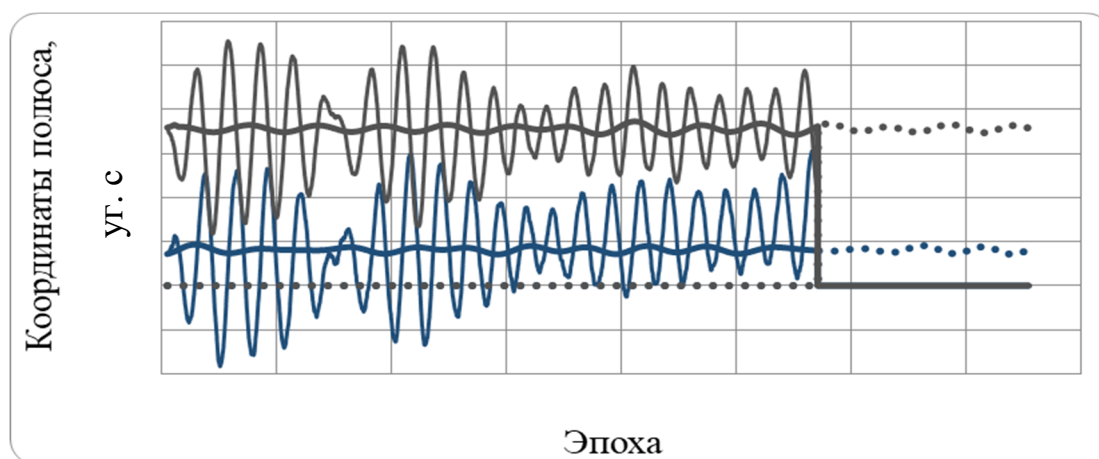


Рис. 2. Квазипериодические вариации координат полюса x_p , y_p

Из поведения графиков на рис. 2 видно, что в квазипериодических вариациях (жирные линии) в большей степени прослеживаются колебания с периодами порядка 2 лет.

Чандлеровские вариации наиболее значимы в общем частотном спектре движения полюса. Однако это бывает не всегда, поскольку их амплитуда в отдельные эпохи мо-

жет достигать минимальных значений вплоть до полного исчезновения, как это показано на рис. 3.

Наблюдаемое постоянное уменьшение амплитуды ЧП после 2006 г. до уровня шумов к началу 2018 г. не согласуется с данными, приведенными в работах [8, 9], из которых следует, что такой минимум приходился на 2005 г.

По результатам расчетов главными компонентами ЧП являются гармоники с периодами: 1,182 г. (432 суток), 1,169 г. (427 суток), 1,220 г. (445 суток), с амплитудами порядка 140 и по 50 угл. мс соответственно.

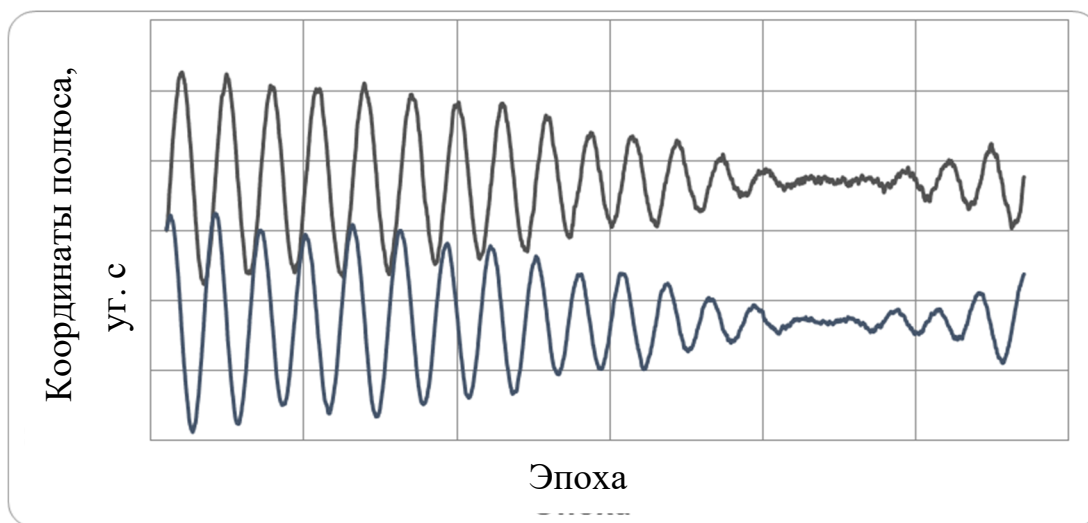


Рис. 3. Изменение амплитуды ЧП x_p, y_p с 2000 по 2023 г.

Также проявляют себя компоненты с периодами: 1,10; 1,15; 1,29 и 1,35 г. с амплитудами от 12 до 14 угл. мс. Приведенные значения согласуются с данными других исследователей. Так, в работе [7] приведены параметры чандлеровских гармоник из пяти близких частот с периодами: 1,194; 1,111; 1,239; 1,067 и 1,286 г.

Годовые вариации, приведенные на рис. 4, заметно более стабильны на всем периоде наблюдений в сравнении с чандлеровскими.

Модели годовых вариаций помимо основной гармоники с периодом 1 год дополни-

тельно могут содержать от 10 до 20 гармоник с периодами менее года до полугода. Среди них наиболее значимыми являются гармоники с периодами: 0,95; 0,83; 0,63 и 0,5 г.

Сравнивая приведенные на рис. 4 графики, можно отметить, что вариации амплитуды по координате y_p несколько меньше, чем по координате x_p .

Высокочастотные вариации содержат все гармоники с периодами менее полугода. На рис. 5 показан характер высокочастотных (шумовых) вариаций по координате x_p за анализируемый период с 2000 по 2023 г.

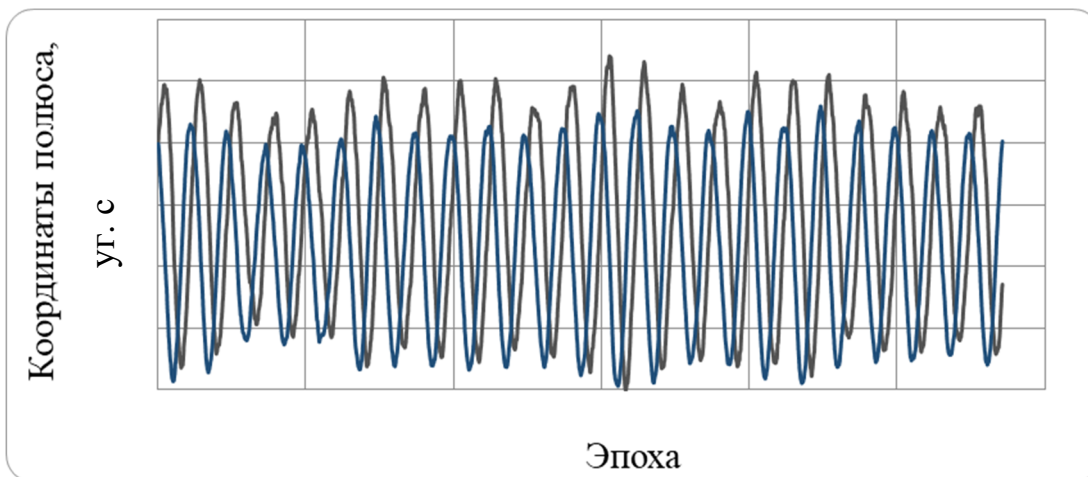


Рис. 4. Годовые вариации координат x_p, y_p за период 2000–2023 гг.

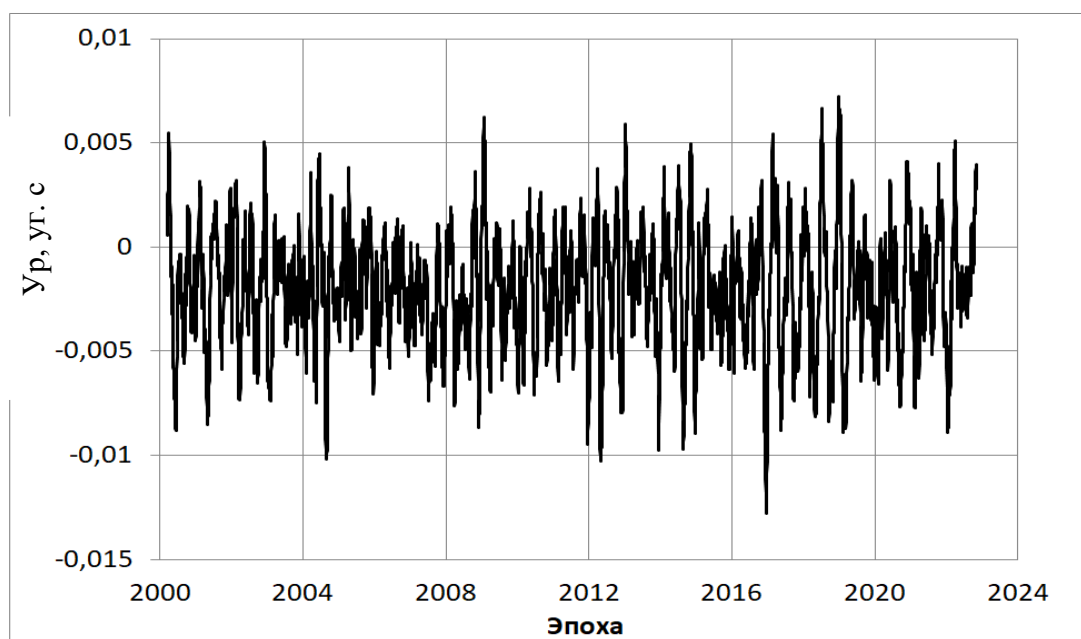


Рис. 5. Высокочастотные вариации полюса по координате x_p, y_p

Вид графика на рис. 5 имеет характер, близкий к белому шуму с амплитудой в пределах 15 угл. мс, что ограничивает потенциальную точность прогнозирования движения полюса.

На рис. 6 приведены графики полных изменений координат полюса x_p (синий) и y_p (зеленый) за период с 2000 г. по ноябрь 2022 г. с про-

гнозами до 2030 г. (пунктир), полученные с помощью программы, разработанной по алгоритмам, приведенным в [17, 18].

Из сравнения картины вариаций x_p, y_p на рис. 6 видно, что в координате x_p имеется тренд в сторону положительного значения оси.

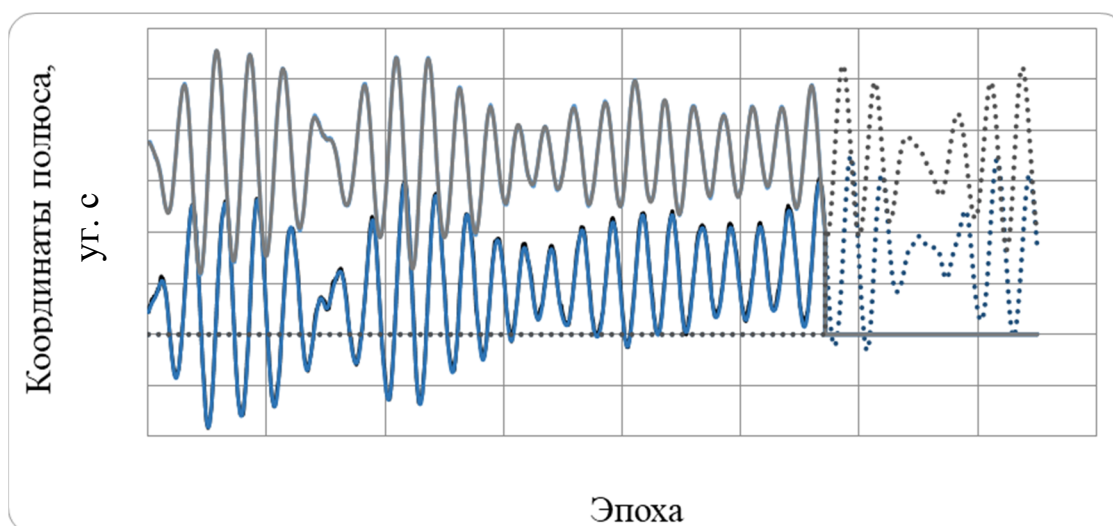


Рис. 6. Изменения координат полюса x_p, y_p и их прогноз до 2030 г.

Отсюда следует, что за анализируемый период с 2000 г. по настоящее время перемещение среднего полюса происходит преимущественно в направлении Европейского континента. Обоснованность предлагаемого метода прогнозирования координат полюса подтвер-

ждается результатами, показанными за время его апробирования на протяжении 2022 г.

В таблице приведены оценки СКП прогнозов координат полюса x_p, y_p , вычисляемых в МСВЗ (USNO) с применением программ, разработанных по предлагаемому методу.

СКП прогнозов x_p, y_p разными методами за 2022 г.

Параметр ВЗ	Методы	Дни				
		1	10	30	60	90
СКП x_p, mas	авторский	0,33	3,60	9,25	9,90	10,05
	USNO	0,37	3,80	13,00	20,20	26,50
СКП y_p, mas	авторский	0,25	2,50	7,65	13,70	18,45
	USNO	0,27	3,10	10,25	16,55	29,30

Заключение

По результатам проведенных модельных исследований получены новые сведения о перемещении Северного географического полюса, главные из которых перечислены ниже:

- получены модели трендовых, квазипериодических и регулярных вариаций, на основе которых разработан новый метод прогнозирования временных рядов координат полюса;
- в чандлеровском колебании полюса выделены три главные компоненты с периодами: 1,182 года (432 суток); 1,210 года (445 суток) и 1,169 года (427 суток);

– аппроксимация чандлеровского колебания в виде суперпозиции из 10 и более гармоник с периодами от 1,09 года до 2 лет показывает, что начиная с 2006 г. и по настоящее время его амплитуда постепенно уменьшается до уровня шумов к 2018 г.

Отработка моделей отдельных вариаций на известных данных для временных отрезков различной длительности и их последующее объединение в полную модель движения полюса позволило получить точность прогнозирования координат полюса, как это следует из данных таблицы, существенно выше мирового уровня.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chandler S. C. On a new component of the polar motion // *Astronomical Journal*. – 1901. – No 494. – P. 109–112.
2. Подобед В. В., Нестеров В. В. *Общая астрометрия*. – М.: Наука, 1975. – 551 с.
3. Бакулин П. И., Блинов Н. С. *Служба точного времени*. – М.: Наука, 1968. – 320 с.
4. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития / под ред. А. И. Перова. – М.: Радиотехника, 2020. – 1072 с.
5. Курбасова Г. С., Рыхлова Л. В. Стационарные колебания амплитуды чандлеровской составляющей движения полюса Земли // *Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века: тезисы конференции*. – 2000. – С. 98–99.
6. Воротков М. В., Горшков В. Л., Миллер Н. О., Прудникова Е. Я. Исследование основных составляющих в движении полюса Земли // *Изв. ГАО РАН*. – 2002. – № 216. – С. 406–414.
7. Schuh N., Nagel S., Seitz T. Linear drift and periodic variations observed in long time series in polar motion // *Journal of Geodesy*. – 2001. – Vol. 74 (10). – P. 701–710. – DOI 10.1007/s001900000133.
8. Миллер Н. О., Прудникова Е. А. Ранние пулковские наблюдения широты // *Кинематика и физика небесных тел*. – 2010. – Т. 27, № 1. – С. 40–52.
9. Миллер Н. О. Об изменении амплитуды и фазы Чандлеровского движения полюса // *Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. – 2008. – № 5. – С. 48–49.
10. Акуленко Л. Д., Кумакшев С. А., Марков Ю. Г., Рыхлова Л. В. Прогноз движения полюса деформируемой Земли // *Астрономический журнал*. – 2002. – № 10. – С. 952–960.
11. Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинимике // *Известия ГАО РАН*. – 2004. – № 214. – С. 313–335.
12. Горшков В. Л., Миллер Н. О. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью сингулярного спектрального анализа // *Известия ГАО РАН*. – 2009. – № 219 (1). – С. 91–100.
13. Голяндина Н. Э. *Метод «Гусеница»–SSA: прогноз временных рядов: учеб. пособие*. – СПб.: СПбГУ, 2004. – 52 с.
14. Kaufman M. N., Pasyok S. L. Russian state time and Earth rotation servise: observation, EOP series, prediction // *Artificial Satellites*. – 2010. – Vol. 45, No 2. – P. 81–86.

15. McCarthy D. D., Petit G. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. – Frankfurt am Main, 2003, IERS Conventions // IERS Technical Note. – 2004. – No. 32. – 127 p.

16. Гречкосеев А. К., Толстикова А. С., Тиссен В. М., Карманов В. С., Ваганова А. И. Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 54–65.

17. Тиссен В. М. Методика высокоточного прогнозирования неравномерностей вращения Земли // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 2. – С. 44–50.

18. Тиссен В. М., Толстикова А. С., Симонова Г. В. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью адаптивных гармонических моделей // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 238–245.

Об авторах

Виктор Мартынович Тиссен – кандидат технических наук, ст. научный сотрудник службы времени и частоты.

Геннадий Владимирович Шувалов – кандидат технических наук.

Галина Вячеславна Симонова – кандидат технических наук, доцент кафедры специальных устройств, инноватики и метрологии.

Получено 05.12.2022

© В. М. Тиссен, Г. В. Шувалов, Г. В. Симонова, 2023

Analysis of variations in the movement of the north pole to improve accuracy of coordinate-time definitions

V. M. Tissen¹, G. V. Shuvalov¹, G. V. Simonova^{2}*

¹ West-Siberian branch of Federal State Unitary Enterprise "Russian Scientific Research Institute Physico-technical and Radio Measurements", Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: simgal@list.ru

Abstract. This article considers a method for predicting the coordinates of the north pole, taking into account the influence of trend, quasi-periodic, regular and high-frequency variations. The necessary graphic material is given, illustrating the picture of the listed variations from 2000 to the present. In particular, a regular change in the amplitude of the Chandler period (CP) is shown. So, from 2006 to 2017, the amplitude of the CP gradually decreases from the maximum to zero, and from 2020 to the present, it has been steadily increasing. Based on the analysis of the behavior of trend changes in the pole coordinates, it is shown that at present the movement of the average pole is directed towards the Greenwich meridian, and not towards North America, as it is given in a number of literary sources. The practical implementation of the proposed method resulted in the creation of programs for predicting the coordinates of the pole and Universal Time for periods from one to 90 days. At the same time, the accuracy of forecasts calculated using these programs exceeds the accuracy of similar forecasts posted on the website of the International Earth Rotation Service. The problem of high-precision prediction of the coordinates of the pole and the Universal Time has now acquired particular relevance, especially in the light of the adopted Federal Target Program for the development of GLONASS up to 2030. In the field of improving the accuracy of ephemeris-time support (ETS).

Keywords: Earth rotation, harmonic model, pole displacements, analysis, forecasting methods, variations, Chandler period, trends

REFERENCES

1. Chandler, S. C. (1901). On a new component of the polar motion. *Astronomical Journal*, 494, 109–112.
2. Podobed, V. V., & Nesterov, V. V. (1975). *Obshchaia astrometriia [General astrometry]*. Moscow: Nauka Publ., 551 p. [in Russian].

3. Bakulin, P. I., & Blinov, N. S. (1968). *Sluzhba tochnogo vremeni [Time service]*. Moscow: Nauka Publ., 320 p. [in Russian].
4. Perov, A. I. (Ed.). (2020). GLONASS. Modernizatsiia i perspektivy razvitiia [GLONASS. Modernization and development prospects]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 1072 p. [in Russian].
5. Kurbasova, G. S., & Rykhlova, L. V. (2000). Stationary oscillations of the amplitude of the Chandler component of the motion of the Earth's pole. In *Tezisy konferentsii: Astrometriia, geodinamika i nebesnaia mekhanika na poroge XXI veka [Abstracts of the Conference: Astrometry, Geodynamics and Celestial Mechanics on the Threshold of the XXI Century]* (pp. 98–99) [in Russian].
6. Vorotkov, M. V., Gorshkov, V. L., Miller, N. O., & Prudnikova, E. Ya. (2002). Study of the main components in the motion of the Earth's pole. *Izvestiya GAO RAN [Proceedings of the Main Astronomical Observatory in Pulkovo]*, 216, 406–414 [in Russian].
7. Schuh, H., Nagel, S., & Seitz T. (2001). Linear drift and periodic variations observed in long time series in polar motion. *Journal of Geodesy*, 74(10), 701–710. DOI 10.1007/s00190000013.
8. Miller, N. O., & Prudnikova, E. A. (2010). Early Pulkovo observations of latitude. *Kinematika i fizika nebesnykh tel [Kinematics and Physics of Celestial Bodies]*, 27(1), 40–52.
9. Miller, N. O. (2008). On the change in the amplitude and phase of the Chandler motion of the pole. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 5, 48–49 [in Russian].
10. Akulenko, L. D., Kumakshev, S. A., Markov, Yu. G., & Rykhlova, L. V. (2002). Forecast of the movement of the pole of the deformable Earth. *Astronomicheskii zhurnal [Astronomical Journal]*, 10, 952–960 [in Russian].
11. Gorshkov, V. L. (2004). On methods of forecasting in geodynamics. *Izvestiya GAO RAN [Proceedings of the Main Astronomical Observatory in Pulkovo]*, 214, 313–335 [in Russian].
12. Gorshkov, V. L., & Miller, N. O. (2009). Predicting the parameters of the Earth's rotation using singular spectral analysis. *Izvestiya GAO RAN [Proceedings of the Main Astronomical Observatory in Pulkovo]*, 219(1), 91–100.
13. Golyandina, N. E. (2004). *Metod "Gusenitsa"–SSA: prognoz vremennykh ryadov [Caterpillar-SSA method: time series forecasting]*. St. Petersburg: St. Petersburg State University Publ., 52 p. [in Russian].
14. Kaufman, M. N., & Pasynok, S. L. (2010). Russian state time and Earth rotation service: observation, EOP series, prediction. *Artificial Satellites*, 45(2), 81–86.
15. McCarthy, D. D., & Petit, G. (2004). Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie. – Frankfurt am Main, 2003, IERS Conventions. *IERS Technical Note*, 32, 127 p.
16. Grechkoseev, A. K., Tolstikov, A. S., Tissen, V. M., Karmanov, V. S., & Vaganova, A. I. (2020). Modification of the basic method of singular spectral analysis to improve the accuracy of predicting the irregularity of the Earth's rotation. *Vychislitel'nye tekhnologii [Computing Technologies]*, 25(3), 54–65 [in Russian].
17. Tissen, V. M. (2014). A technique for high-precision forecasting of irregularities in the Earth's rotation. *Izvestia vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 2, 44–50 [in Russian].
18. Tissen, V. M., Tolstikov, A. S., & Simonova, G. V. (2020). Prediction of the Earth's rotation parameters using adaptive harmonic models. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(4), 238–245 [in Russian].

Author details

Viktor M. Tissen – Ph. D., Senior Researcher, Laboratory of Kinetics of Combustion Processes.

Gennadiy V. Shuvalov – Ph. D.

Galina V. Simonova – Ph. D., Associate Professor, Department of Special-Purpose Devices, Innovatics and Metrology.

Received 05.12.2022

© V. M. Tissen, G. V. Shuvalov, G. V. Simonova, 2023