

## Исследование вариаций в перемещениях северного полюса для повышения точности прогнозов изменений его координат

© В. М. Тиссен, А. С. Толстикова, Г. В. Шувалов

Западно-Сибирский филиал ФГУП «ВНИИФТРИ», г. Новосибирск, Россия

### Реферат

В настоящей статье представлены исследования, касающиеся особенностей перемещения географического северного полюса. Были выявлены главные составляющие этого перемещения, которые условно разделены на три группы. В первую группу включены долгопериодические гармонические компоненты, аппроксимирующие трендовые вариации движения северного полюса. Вторая группа представлена некоторым ограниченным числом незначительных по мощности гармоник с периодами от двух до десяти лет, суперпозицию которых предложено использовать для моделирования квазипериодических вариаций. Третья группа включает наиболее значимые по мощности компоненты, с помощью которых получены модели главных вариаций: свободного чандлеровского и годового периодов. Кроме этого, в графическом виде показана остаточная высокочастотная составляющая движения полюса, имеющая характер белого шума. Особое внимание уделено регулярным вариациям, которые представлены чандлеровским периодом с нестабильными параметрами и годовой волной, природа которой имеет вынужденный характер, и поэтому годовой период носит более стабильный характер в сравнении с другими вариациями. Для аппроксимации перечисленных вариаций предложены гармонические модели, состоящие из групп гармоник подобранных по рассмотренным в статье признакам и критериям. При этом оценка параметров гармонических компонент данных вариаций производилась на различных по продолжительности временных интервалах. Приведен необходимый графический материал, поясняющий характер перечисленных вариаций и суть разработанного авторами метода прогнозирования координат полюса за последние 23 года. Характер вариаций показан в графическом виде на интервале последних 23 лет. К числу интересных результатов выполненных по теме статьи исследований следует отнести полученную модель изменения амплитуды чандлеровского периода за анализируемый период. Так, например, за период с 2006 по 2017 гг. наблюдается постепенное уменьшение амплитуды чандлеровского периода вплоть до нулевого значения, а с 2020 г. по настоящее время происходит аналогичное ее увеличение. Оценка параметров моделей перечисленных вариаций выполнена методами сингулярного спектрального анализа и наименьших квадратов на интервале известных значений координат полюса от 15 до 50 лет в зависимости от типа исследуемой вариации.

Практическая реализация предлагаемого метода выразилась в создании программ прогнозирования координат полюса на любые задаваемые сроки. Точность вычисляемых прогнозов с помощью данных программ по оценкам независимых экспертов превышает точность аналогичных прогнозов, выставляемых на сайте Международной службы вращения Земли.

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

*Контакты для связи: Тиссен Виктор Мартынович (tissen.ksn@yandex.ru).*

**Для цитирования:** Тиссен В. М., Толстикова А. С., Шувалов Г. В. Исследование вариаций в перемещениях северного полюса для повышения точности прогнозов изменений его координат // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 70. С. 3–12.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.3-12>

## Research on Variations in the North Pole Offsets to Improve the Forecasts Accuracy of its Coordinates Changes

V. M. Tissen, A. S. Tolstikova, G. V. Shuvalov

West Siberian branch of FSUE "VNIIFTRI", Novosibirsk, Russia

### Abstract

This paper presents researches concerning the features of the geographical North Pole offset. The main components of this offset have been identified that can be conditionally split into some groups depending on their nature. The first two include aperiodic variations which demonstrate the character of trend changes, and quasi-periodic ones which are the superposition of a certain set of power harmonics with the periods of more than two years. Special attention is paid to regular variations, which are represented by the Chandler period with unstable parameters and the annual wave, whose nature is of a forced character, so its annual period is more stable in comparison other variations. To approximate these variations, harmonic models are proposed, consisting of groups of harmonics selected according to the features and crite-

ria discussed in the paper. At the same time, the parameters of the harmonic components of these variations were evaluated over time intervals of different duration. The necessary graphic material is provided, explaining the nature of the variations listed as well as the essence of the method developed by the authors for predicting the coordinates of the pole over the past 23 years. Among the interesting results of the research carried out on the subject of the paper is the resulting model of the change in the amplitude of the Chandler period for the period analyzed. So, for example, over the period from 2006 to 2017, there is a gradual decrease in the amplitude of the Chandler period up to zero, while from 2020 to the present, there is a similar increase in it. The models parameters of the variations listed were estimated using the method of singular spectral analysis and the least squares method over the known pole coordinates values range from 15 to 50 years, depending on the type of variation under research.

The practical implementation of the method proposed was expressed in developing the programs for predicting the coordinates of the pole for any given time. According to independent experts, the accuracy of the forecasts calculated using these programs, exceeds the accuracy of similar forecasts posted on the website of the International Earth Rotation Service.

**Keywords:** Earth rotation, harmonic model, pole split, analysis, forecasting methods, quasi-periodic variations, Chandler period, trends.

*Contacts: Viktor M. Tissen (tissen.ksn@yandex.ru).*

**For citation:** Tissen V. M., Tolstikov A. S., Shuvalov G. V. Research on variations in the North Pole offsets to improve the forecasts accuracy of its coordinates changes // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 70. P. 3–12. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.70.3-12>

## Введение

История астрономических наблюдений, по которым можно оценивать нестабильности вращения Земли (ВЗ), насчитывает около 370 лет. Из анализа этих наблюдений следует, что угловая скорость ВЗ постепенно уменьшается, что приводит к так называемому «Вековому замедлению ВЗ». Этот процесс происходит под действием тормозящих сил трения, возникающих во время лунно-солнечных приливов в мировом океане и твердом теле Земли. Вековое замедление приводит к увеличению продолжительности суток на 1.5 мс за 100 лет (Полобед, Нестеров, 1975). Кроме этого, в скорости ВЗ, так же как и в перемещениях ее географических полюсов, наблюдается множество вариаций, различающихся по величине и длительности. Наиболее изучены регулярные вариации, вызываемые годовым обращением Земли по орбите и приливными силами в океанах и твердом теле Земли. Менее изучены внезапные изменения тренда, имеющие различную длительность и направленность, что связано с различными геодинамическими и геологическими процессами, происходящими внутри Земли и на ее поверхности, а также с глобальными изменениями климата и циклами солнечной активности.

С появлением 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. Однако, несмотря на бурное развитие средств наблюдений в последние

десятилетия, существенного повышения точности прогнозирования ПВЗ не произошло, что, очевидно, связано со сложной спецификой их изменений. В частности, при использовании статистических методов появляется сильная зависимость оценок параметров прогностических моделей от интервала обучающей выборки, начальной точки прогноза и ряда других установочных параметров и критериев. В численно-аналитических методах, основанных на интегрировании дифференциальных уравнений динамических моделей ВЗ, необходимо знать данные о физических процессах, приводящих к перераспределению масс внутри Земли и в ее атмосфере. Поскольку прямые наблюдения за такими процессами невозможны, а сбор данных производится косвенным путем по результатам измерений скорости распространения сейсмических волн в земных недрах, то получаемая таким образом измерительная информация о распределении масс внутри Земли носит приближенный характер. Поэтому аналитические методы без учета стохастической компоненты не нашли применения для вычисления краткосрочных прогнозов ПВЗ для задач эфемеридно-временного обеспечения (ЭВО) современных ГНСС, поскольку могут давать только сглаженные приближенные результаты.

Таким образом, несмотря на появление и развитие в последние десятилетия многих новых методов исследования и анализа временных рядов, прогнозирование ПВЗ с точностью, удовлетворяющей современным требованиям ГНСС, остается актуальной задачей. Это объясняется сложной динамикой рядов ПВЗ, присутствием в них широкого спектра различной природы периодических и аperiodических изменений, возбуждаемых множеством постоянно действующих на вращающуюся Землю сил консервативного и неконсервативного характера.

В настоящей статье предложен статистический метод создания прогностических моделей сложного вращательно-колебательного движения северного полюса путем его разложения на отдельные составляющие, характеризующие различные особенности этого движения. При этом построение прогностических моделей этих составляющих по отдельности и их дальнейшее объединение в общую модель движения полюса позволяет существенно повысить точность вычисляемых прогнозов координат полюса.

Актуальность проводимых исследований обусловлена принятием новой федерально-целевой программы (ФЦП) развития ГЛОНАСС до 2030 г., в которой выдвинуты повышенные требования к надежности и точности прогнозирования ПВЗ [\(ФЦП в рамках гос. прогн. РФ «Космическая деятельность России», 2021\)](#).

### Движение северного полюса и методы его прогнозирования

Имеющиеся данные измерений за изменяемостью широт обсерваторий насчитывают около 300 лет. Так, на основании анализа нескольких десятков тысяч определений широты с разных обсерваторий, за 200-летний период наблюдений в конце 19 века С. Чандлером были обнаружены регулярные изменения координат северного полюса с периодами в один год и 436 суток. *Период 436 суток, названный впоследствии периодом Чандлера (ЧП), представляет собой сложное квазипериодическое колебание, природа которого связана с периодом свободной нутации Земли. Наличие этого периода теоретически было предсказано Л. Эйлером в 1765 г., в предположении, что Земля является твердым и однородным телом и на нее не действуют внешние силы. На основе решения динамических уравнений для модели твердой Земли Эйлером было показано, что траектория движения северного полюса описывает конус вокруг главной оси инерции Земли с периодом около 305 суток. Несовпадение периодов Чандлера и Эйлера впоследствии было объяснено С. Ньюкомом влиянием упругих деформаций в теле Земли и гидросфере, которые увеличивают период свободной эйлеровской нутации с 10 до 14 месяцев* [\(Бакулин, Блинов, 1968\)](#).

К настоящему времени установлено, что 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 [\(Сидоренков, 2002\)](#). В то время как вращательно-колебательное движение мгновенного полюса, обусловленное наложением годового и чандлеровского

периодов, создает шестилетнюю циклическую картину биений в виде закручивающейся или раскручивающейся спирали с максимальным радиусом до 12 м. В работе [\(Миллер, 2008\)](#) отмечается, что амплитуда и фаза ЧП на протяжении всей истории наблюдений претерпевают существенные изменения. Так, например, в 20-х годах прошедшего столетия амплитуда ЧП уменьшалась практически до нуля с одновременным изменением его фазы на  $180^\circ$ . По результатам анализа данных движения полюса за период 1846–2008.5 гг. в работе [\(Воротков и др., 2002\)](#) указано, что в эпохи, середины которых приходится на 1846, 1925, 2005 гг., наблюдались минимумы амплитуды ЧП с одновременным изменением фазы.

Для достижения требуемой современными задачами КВНО точности прогнозирования ПВЗ и в частности координат полюса необходимо минимизировать влияние стохастической компоненты в движении полюса. Развитие новых методов анализа сложных нестационарных сигналов, наряду с совершенствованием средств вычислительной техники, открыло новые возможности для построения математических моделей различных временных рядов, что позволило уточнить вклады элементарных составляющих и величину шума в общий уровень сигнала. 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, IERS) [\(Горшков, 2004; Горшков, Миллер, 2009; Petit, Luzum, 2010\)](#). Интересными представляются методы, в которых параметры аналитических моделей оцениваются статистическим путем на выбранных интервалах известных значений ПВЗ. Так, например, в работе [\(Пережелкин и др., 2018\)](#) рассмотрен метод численно-аналитического прогнозирования ПВЗ, с помощью которого авторами получены высокоточные прогнозы Всемирного времени и координат полюса как на короткие сроки до (15 дней), так и на длительные (более года).

Нестабильность ЧП, присутствие высокочастотных колебаний, а также внезапные трендовые смещения накладывают естественные ограничения на предельно достижимую точность прогнозирования движения полюса любыми методами. Появляется сильная зависимость результатов вычисления прогнозов от выбора длины обучающей выборки, точки начала прогноза и других расчетных параметров и критериев. Чем сложнее характер изменений прогнозируемого параметра, тем соответственно усложняется процесс построения адекватной математической модели, что приводит к увеличению погрешностей прогнозирования. Поэтому в настоящей статье предложено

сложное движение полюса аппроксимировать с помощью нескольких моделей выделенных вариаций, обладающих выраженными статистическими закономерностями. В первую очередь, к ним относятся регулярные, квазипериодические вариации, а также закономерные изменения тренда. Затем по результатам верификации производится уточнение параметров моделей выделенных вариаций с применением сингулярного спектрального анализа (ССА) и МНК. Тогда модели полных изменений исследуемых временных рядов могут быть получены путем объединения гармонических моделей отдельных вариаций в общий полигармонический ряд.

### Моделирование вариаций в перемещениях северного полюса, их анализ и прогнозирование

Суть разработанного метода прогнозирования заключается в последовательном выравнивании временных рядов координат полюса за трендовые, квазипериодические, чандлеровские и годовые вариации. При этом оценивание параметров гармонических компонент в моделях квазипериодических, регулярных чандлеровских и годовых вариаций выполнялись с помощью МНК по методике, описанной ранее в работе (Тиссен и др., 2020). Для оценивания параметров тренда дополнительно привлекался модифицированный метод сингулярного спектрального анализа (САА), изложенный в работе (Гречкосеев и др., 2020). На приведенных ниже рисунках показаны трендовые, квазипериодические, регулярные и высокочастотные вариации, выделенные из общего движения

северного полюса в различных диапазонах частотного спектра. Построение адекватных моделей этих вариаций создает основу для создания общей модели прогнозирования координат полюса.

В качестве трендовой составляющей была принята гармоническая модель, включающая долгопериодические гармоники с периодами более 20 лет. Для оценки параметров, входящих в трендовую модель гармоник, использовались совместно МНК и метод САА на интервалах известных данных, предшествующих дате начала прогноза длительностью от 55 до 60 лет. На рис. 1–2 жирными линиями показаны трендовые изменения координат полюса  $x_p$  и  $y_p$  на фоне известных данных (черная тонкая линия) с января 2000 по июль 2023 г. с прогнозом линии тренда (оранжевый цвет) до 2033 г.

Показанная на рис. 1 линия тренда аппроксимирована двумя долгопериодическими гармониками с периодами 1000 и 50 лет. Для 1000-летней гармоники, выполняющей роль линейного тренда, найденные методом вариаций значения фазы от начала 2000 г. и амплитуды составили соответственно 0.05 рад. и 0.45 угл. с. Для 50-летней гармоники формирующий изгиб тренда — 4.45 рад. и 20 угл. мс соответственно.

Показанная на рис. 2 линия тренда координаты  $y_p$  по аналогии с линией тренда  $x_p$  аппроксимирована гармониками с периодами 1000 и 50 лет. Для 1000-летней гармоники значение фазы составило 1.4 рад., амплитуды — 1.95 угл. с, для 50-летней гармоники — 2.4 рад. и 8 угл. мс соответственно.

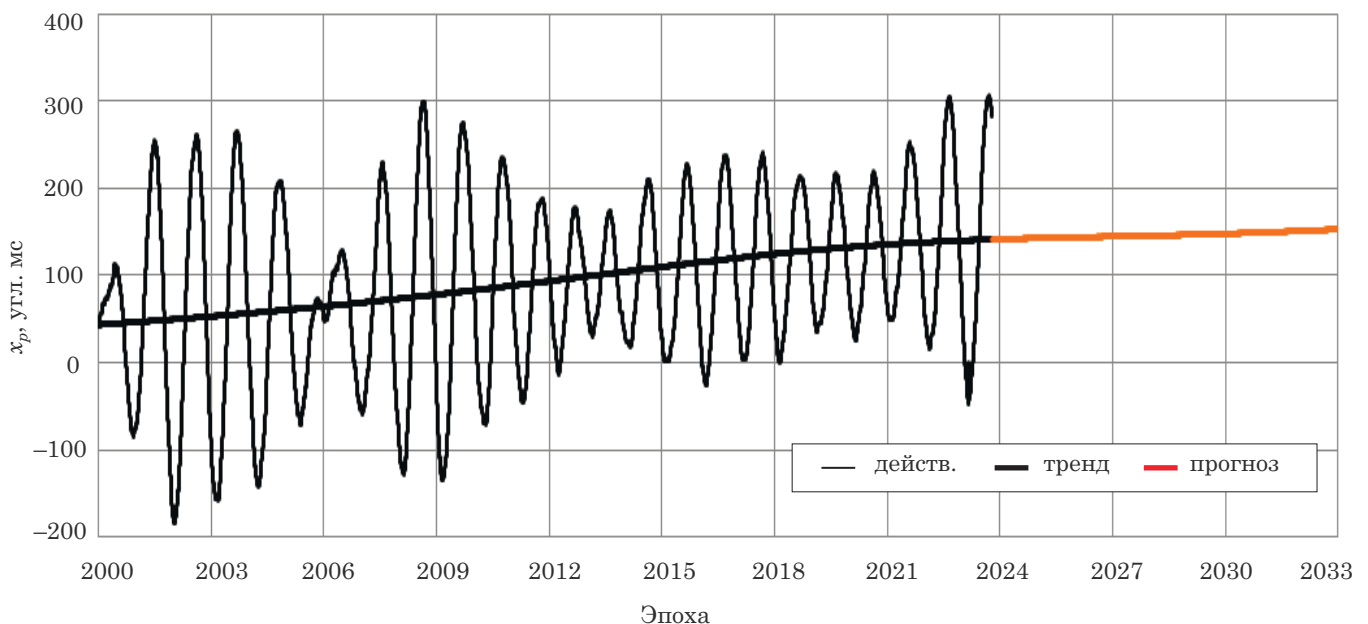


Рис. 1. Линия тренда координаты полюса  $x_p$  с 2000 по июль 2023 г. и ее прогноз до 2033 г.

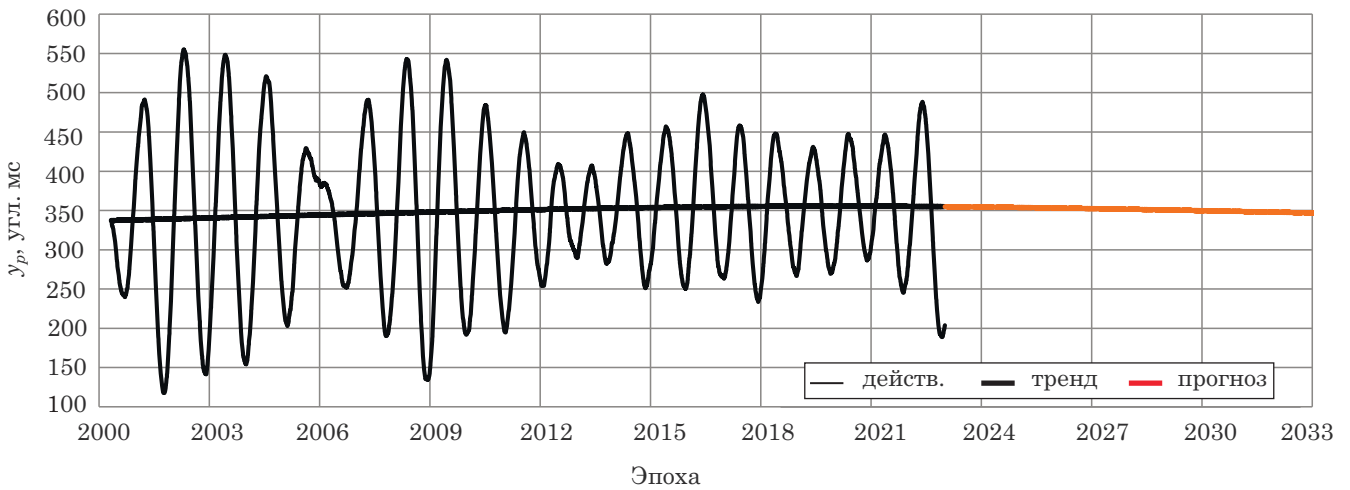


Рис. 2. Линия тренда координаты полюса  $y_p$  с 2000 по июль 2023 г. и ее прогноз до 2033 г.

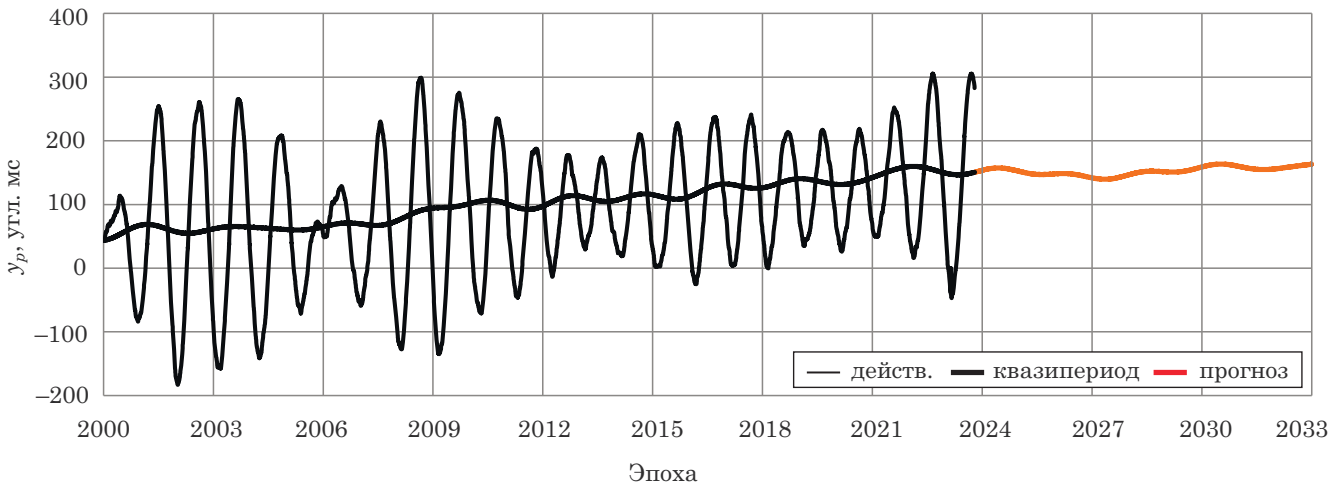


Рис. 3. Квазипериодические вариации координаты полюса  $x_p$  с прогнозом до 2033 г.

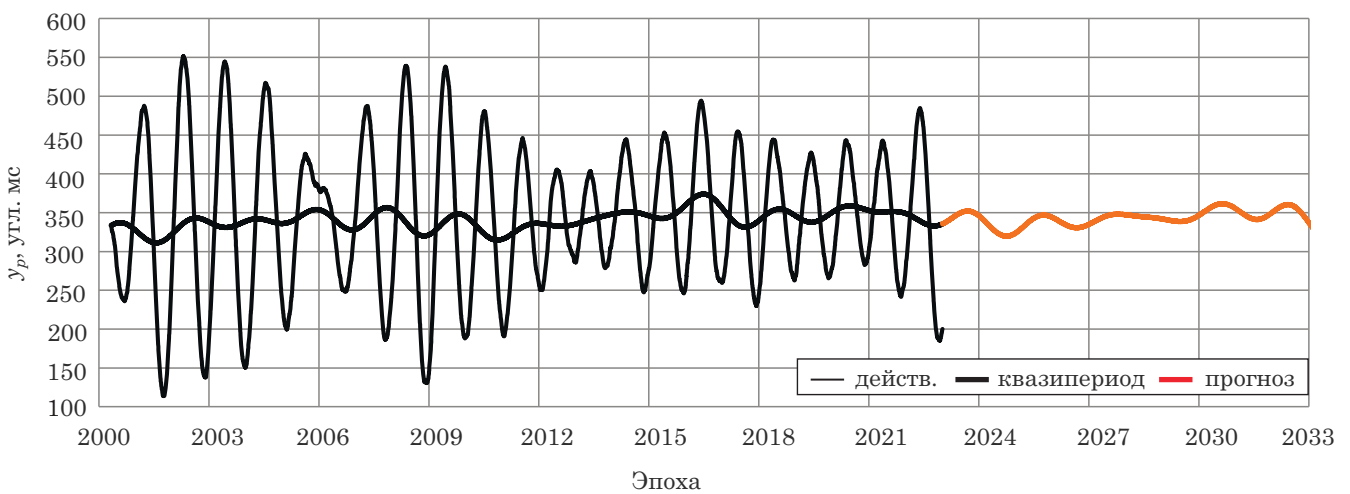


Рис. 4. Квазипериодические вариации координат полюса  $y_p$  с прогнозом до 2033 г.

Таблица 1

Главные компоненты квазипериодических вариаций координат полюса  $x_p$ ,  $y_p$ 

№	$x_p$			$y_p$		
	Период, год	Амплитуда, угл. мс	Фаза, рад.	Период, год	Амплитуда, угл. мс	Фаза, рад.
1	10.10	4.7	0.88	11.50	6.1	4.91
2	6.60	3.5	4.91	8.10	2.9	2.68
3	4.60	2.0	2.48	5.10	2.4	1.81
3	4.20	2.9	6.22	4.30	4.0	2.62
4	2.60	2.7	5.02	2.40	2.5	0.89
5	2.24	2.6	3.71	2.20	6.8	5.12
6	2.00	4.1	4.89	2.00	4.5	0.67

На рис. 3 и 4 жирными волнистыми линиями показаны наложенные на линии тренда квазипериодические вариации координат полюса  $x_p$ ,  $y_p$  с января 2000 по июль 2023 гг. на фоне их действительных изменений с прогнозами до 2033 г. (оранжевый цвет).

Компоненты квазипериодических вариаций включают в себя группу из 15–20 гармоник для каждой координаты полюса, из которых наиболее значимые приведены в табл. 1.

Анализируя данные табл. 1 и вид графиков на рис. 3 и 4, следует отметить различие в характере квазипериодических вариаций между координатами  $x_p$  и  $y_p$ . Так, в координате  $y_p$  в большей степени прослеживаются колебания с периодами, близкими к 2 годам.

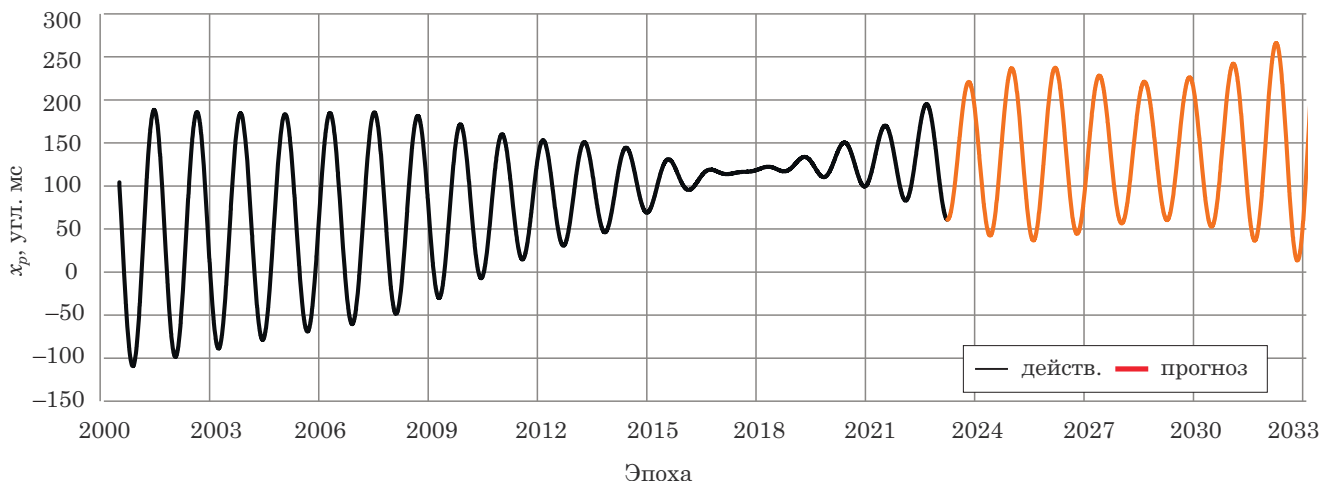
Чандлеровские колебания наиболее значимы в общем частотном спектре движения полюса. Однако их амплитуда весьма неустойчива, поскольку в отдельные эпохи может достигать минимальных значений вплоть до полного исчезновения, как это видно на рис. 5 и 6.

Показанное на рис. 5 и 6 пропорциональное уменьшение амплитуды ЧП после 2006 г. до уровня шумов к началу 2017 г. согласуется с данными, приведенными в работе (Zotov et al., 2020), где авторами с помощью фильтра Пантелеева была выделена динамика ЧП движения полюса за период с 1840 по 2020 гг.

Компоненты ЧП в зависимости от длины интервала, на котором производится оценка их параметров, в общей сложности могут включать в себя от 20 до 40 гармоник.

В табл. 2 приведены параметры наиболее значимых гармоник по обеим координатам оцененные с помощью МНК на интервале 33 лет, предшествующему дате 1 января 2022 г.

В результате анализа данных табл. 2 можно отметить практически полное совпадение параметров гармоник по периоду и амплитуде в обеих координатах для периодов менее 1.5 года. Наблюдаются только незначительные отличия в параметрах гармоник с периодами от 1.5 до 11.5 лет, что свидетельствует о спирально-круговой траектории движения полюса на поверхности Земли.

Рис. 5. Изменение амплитуды ЧП  $x_p$  с 2000 по июль 2023 гг. с прогнозом до 2033 г.

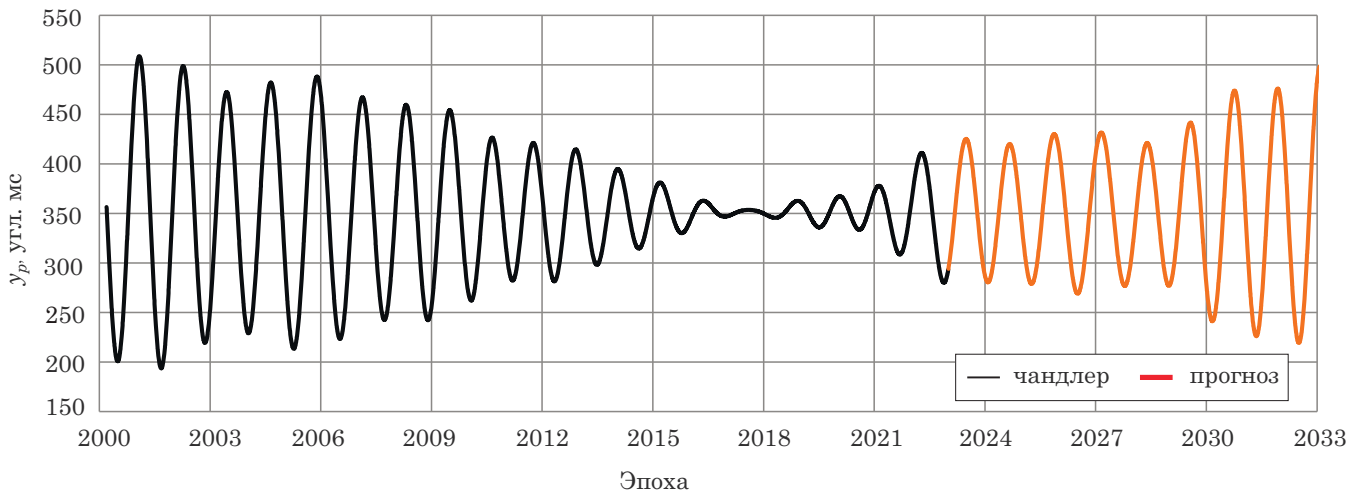
Рис. 6. Изменение амплитуды ЧП  $y_p$  с 2000 по 2023 гг. с прогнозом до 2033 г.

Таблица 2

Компоненты Чандлеровского периода в координатах полюса:  $x_p, y_p$ 

№	$x_p$			$y_p$		
	Период, год	Амплитуда, угл. мс	Фаза, рад.	Период, год	Амплитуда, угл. мс	Фаза, рад.
1	1.84	3.3	4.20	1.81	5.3	6.00
2	1.72	3.0	3.22	1.67	3.0	3.68
3	1.59	4.0	1.07	1.58	4.0	3.06
4	1.36	2.6	3.40	1.49	4.5	3.23
5	1.33	14.0	3.21	1.33	14.0	4.74
6	1.26	13.6	2.84	1.26	13.5	4.53
7	1.22	55.0	5.90	1.22	55.0	1.22
8	1.19	108.0	0.43	1.19	107.0	2.01
9	1.16	37.0	1.15	1.16	38.0	2.64
10	1.10	12.0	1.96	1.95	11.6	3.63
11	1.07	7.0	5.63	1.07	7.0	1.02
12	1.04	15.0	5.39	1.04	14.5	0.66

Следует отметить, что данные табл. 2 частично коррелируют с результатами других авторов. Так, в работе (Воротков и др., 2002) приведены параметры чандлеровских гармоник из пяти близких частот с периодами: 1.194; 1.111; 1.239; 1.067 и 1.286 года.

Годовые вариации координат  $x_p$  и  $y_p$ , показанные на рис. 7 и 8, в сравнении с чандлеровскими более стабильны на всем периоде наблюдений.

Сравнивая приведенные на рис. 4 графики, можно отметить, что вариации амплитуды по координатам  $x_p$  и  $y_p$  коррелированы между собой от года к году. Это объясняется тем, что годовые колебания проявляются в движении полюса по кругу с небольшими вариациями диаметра от года

к году. В модели годовых вариаций помимо основной годовой гармонике с амплитудой около 90 угл. мс были дополнительно включены порядка 20–30 гармоник, одна из которых имеет период 1.015 года, остальные — менее года. Среди них наиболее значимыми являются гармонике с периодами: 0.98; 0.95; 0.90; 0.85 0.80; 0.66; 0.063 и 0.5 года. Остальная группа гармоник с периодами менее 0.5 года была отнесена к высокочастотным вариациям, моделирующим непрогнозируемые изменения координат полюса.

На рис. 9 показан характер высокочастотных (шумовых) вариаций по координате  $x_p$  за анализируемый период с 2000 по 2023 гг.

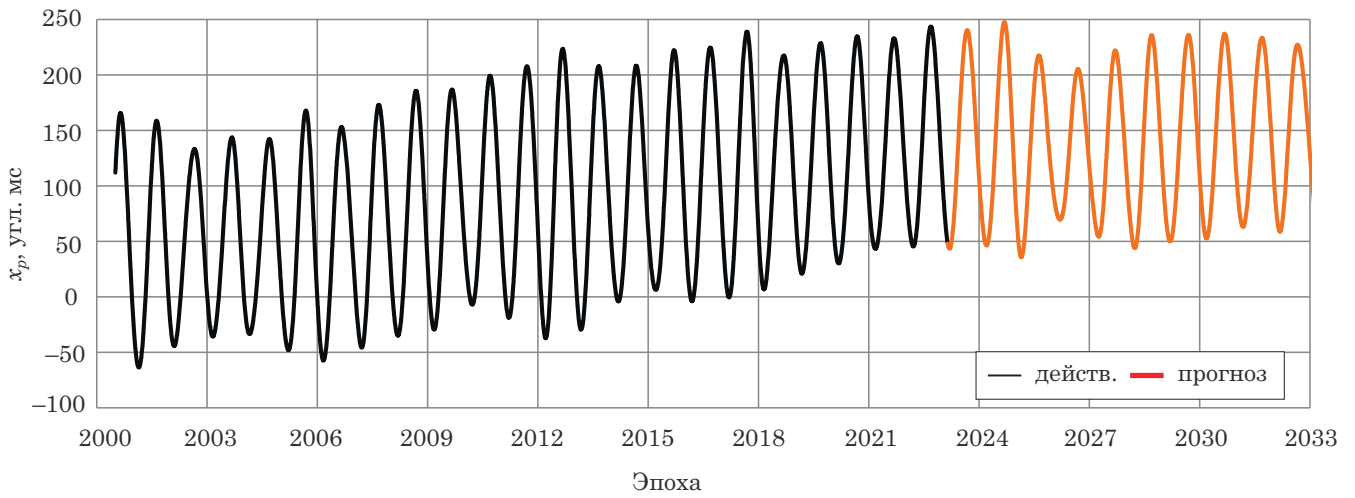


Рис. 7. Годовые вариации координат  $x_p$  за период: 2000–2023 гг.

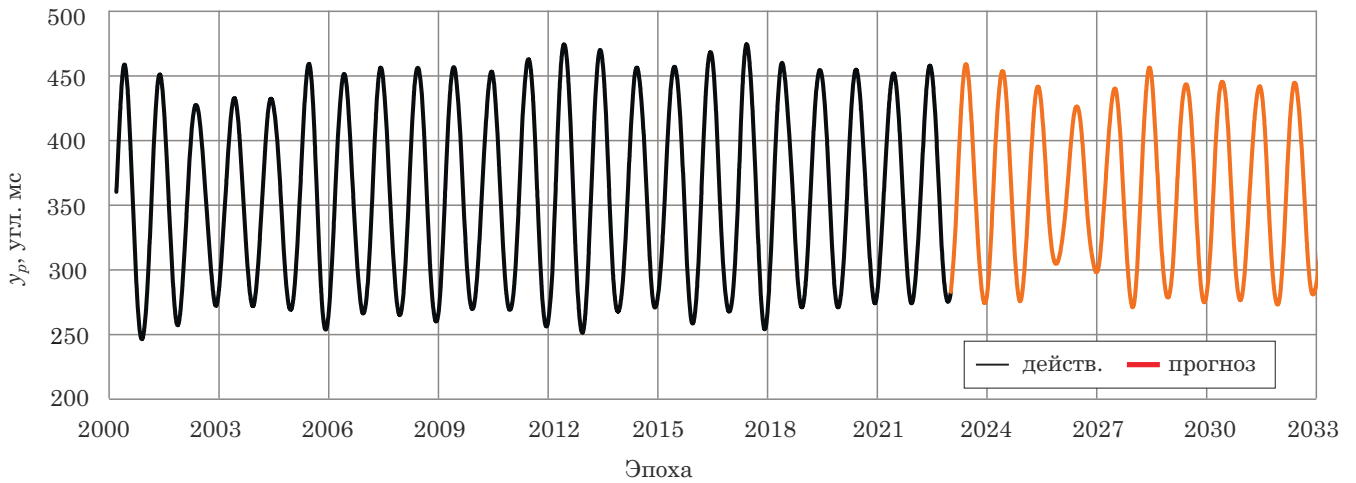


Рис. 8. Годовые вариации координаты  $y_p$  за период: 2000–2023 гг. и их прогноз до 2033 г.

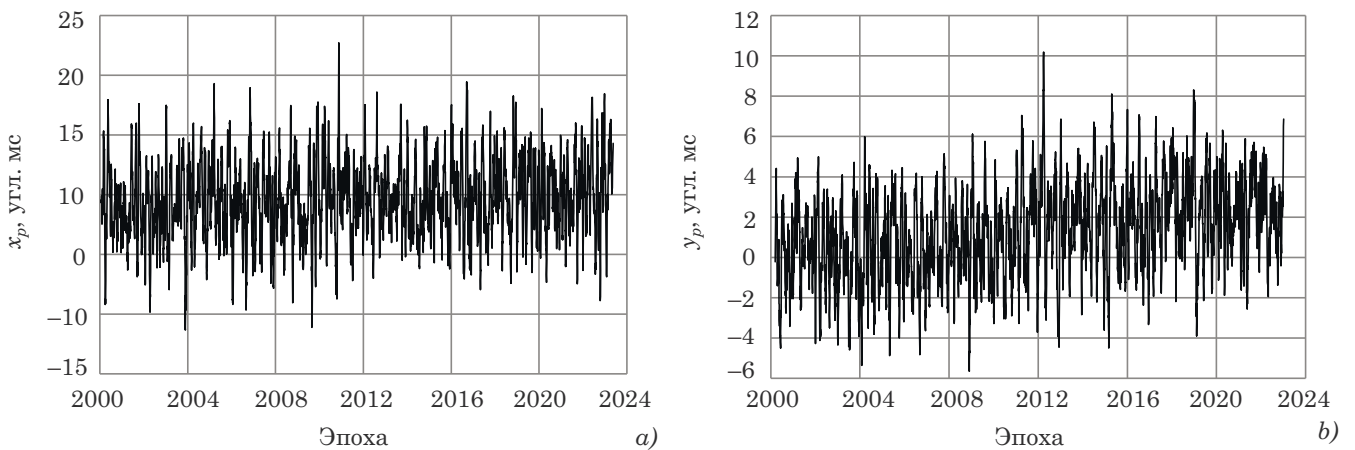


Рис. 9. Высокочастотные вариации полюса по координатам  $x_p$ ,  $y_p$



Показанные на рис. 9а и 9б высокочастотные вариации имеют характер, близкий к белому шуму с максимальным размахом около 15 угл. мс по оси  $x_p$  и 10 угл. мс по оси  $y_p$ . Эти значения показывают потенциальную точность прогнозирования движения полюса на годовые интервалы.

### Выводы и результаты

Полная модель движения полюса получена путем суперпозиции гармонических моделей рассмотренных выше вариаций. При этом объединение моделей производилось поэтапно. На первом этапе, на интервале известных данных в 60 лет, методами ССА и МНК оценивались параметры гармоник, задающие трендовые изменения в координатах полюса. Затем они уточнялись по отклонениям прогнозных значений координат полюса на сроки от трех до десяти лет от их действительных данных. Дальнейшее объединение уточненных та-

ким образом моделей перечисленных вариаций в полную модель движения полюса выполнялось аналогичным образом.

На рис. 10 приведены графики полных изменений координат полюса  $x_p$  и  $y_p$  (черный цвет) за период с 2000 по ноябрь 2022 г. с прогнозами до 2033 г. (оранжевый цвет), полученные с помощью программы, разработанной по предлагаемой методике, частично опубликованной в работах (Тиссен, 2011; Тиссен и др., 2020).

Из сравнения картины вариаций  $x_p$ ,  $y_p$  на рис. 10 и 11 видно, что в координате  $x_p$  имеется тренд в сторону положительного значения оси. Отсюда следует, что за анализируемый период с 2000 г. по настоящее время перемещение среднего полюса происходит преимущественно в направлении Европейского континента.

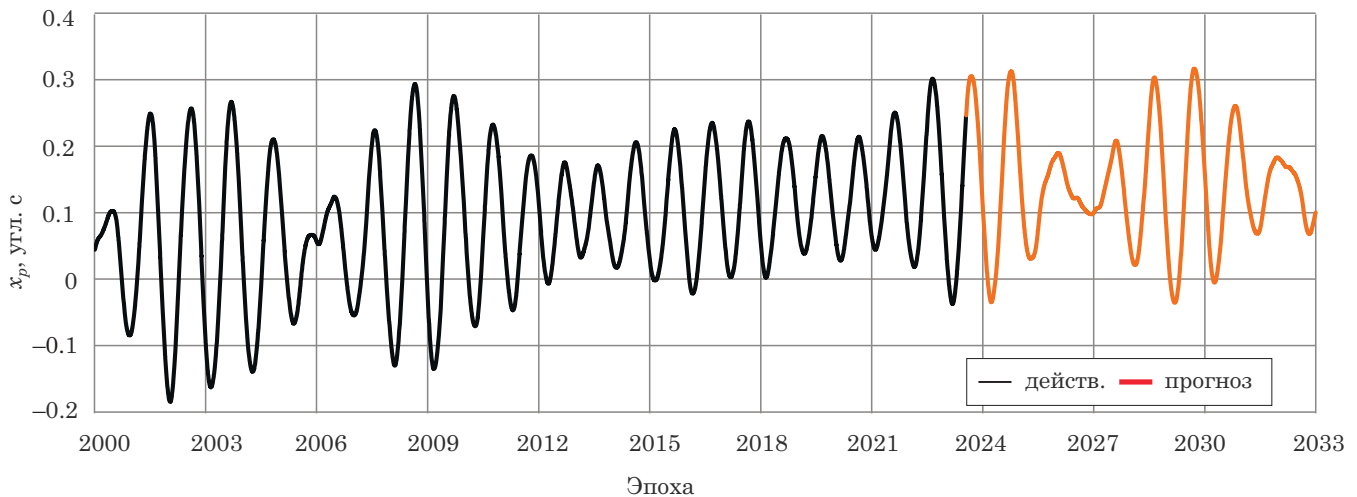


Рис. 10. Изменения координаты полюса  $x_p$  и ее прогноз до 2033 г.

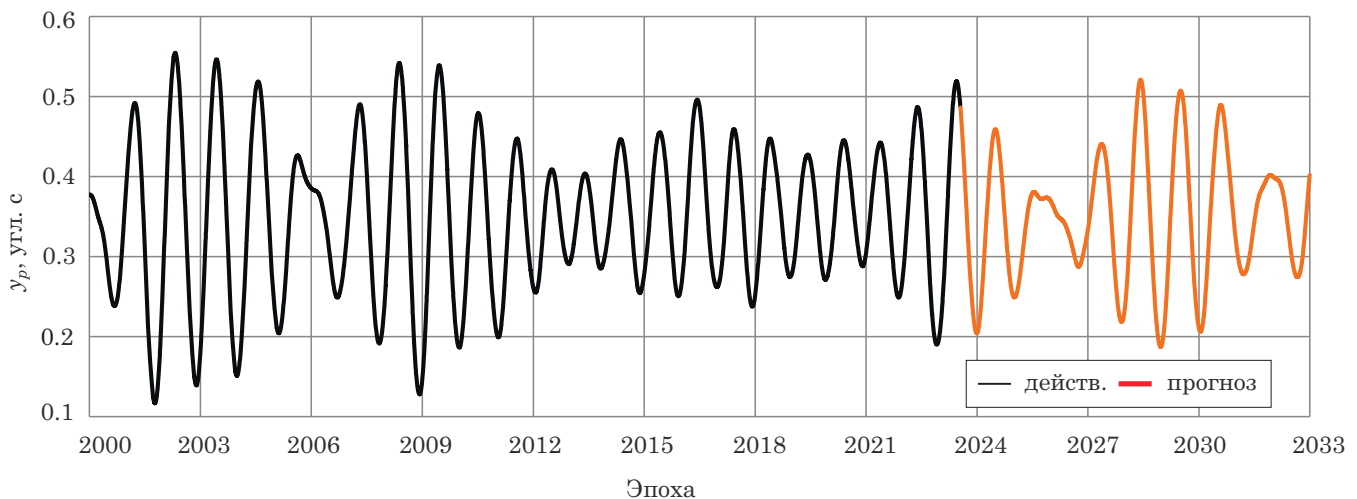


Рис. 11. Изменения координаты полюса  $y_p$  и ее прогноз до 2033 г.

Сравнение СКП прогнозов  $x_p$ ,  $y_p$  USNO и авторских (ЗСФ «ВНИИФТРИ») за 2022–2023 гг.

Параметр ВЗ	Дни					
	Методы	1	10	30	60	90
СКП $y_p$ , mas	ЗСФ «ВНИИФТРИ»	0.32	3.60	9.25	10.50	14.05
	USNO	0.35	3.80	13.00	20.20	25.50
СКП $x_p$ , mas	ЗСФ «ВНИИФТРИ»	0.26	2.75	7.85	13.70	21.40
	USNO	0.25	3.35	10.55	16.55	29.30

Обоснованность разработанного в ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» метода прогнозирования координат полюса подтверждается результатами, полученными с его помощью за период с января 2022 г. по апрель 2023 г., а также результатами, которые были представлены в международном пилотном проекте ЕОРСРРР, проходившем под эгидой IERS с сентября 2011 по июль 2015 гг. (Тиссен, 2015).

В табл. 3 приведены оценки СКП прогнозов координат полюса  $x_p$ ,  $y_p$ , ежедневно выставляемых на сайтах IERS и вычисляемых в ЗСФ ФГУП «ВНИИФТРИ» на аналогичные даты.

### Заключение

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

1. Получены модели трендовых, квазипериодических и регулярных вариаций, на основе которых разработан новый метод прогнозирования временных рядов координат полюса.

2. При моделировании ЧП на интервале известных значений координат полюса с 1990 по 2023 гг. выявлены наиболее значимые компоненты, периоды которых составляют: 1.188 года (434 сут), 1.221 года (446 сут) и 1.163 года (425 сут).

3. Аппроксимация ЧП в виде суперпозиции из 15–20 гармоник с периодами от 1.04 г. до 1.84 г. показывает, что с 2006 г. по настоящее время его амплитуда постепенно уменьшается до уровня шумов к 2017 г., а с 2019 г. вновь постоянно возрастает.

Отработка моделей отдельных вариаций на известных данных различной длительности и их последующее объединение в полную модель движения полюса позволило достигнуть точности прогнозирования координат полюса, как это следует из данных табл. 3, до уровня выше мирового.

### Литература

Бакулин П. И., Блинов Н. С. Служба точного времени. М.: Наука, 1968. 320 с.

Воротков М. В., Горшков В. Л., Миллер Н. О., Прудникова Е. Я. Исследование основных составляющих в движении полюса Земли // Изв. ГАО АН. 2002. № 216. С. 406–414.

Горшков В. Л. О методах прогнозирования в геодинاميке // Известия ГАО РАН. 2004. № 214. С. 313–335.

Горшков В. Л., Миллер Н. О. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью сингулярного спектрального анализа. Известия ГАО РАН. 2009. № 219(1). С. 91–100.

Гречкосеев А. К., Толстиков А. С., Тиссен В. М. и др. Модификация базового метода сингулярного спектрального анализа для повышения точности прогнозирования неравномерности вращения Земли. Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. № 3. С. 54–65.

Миллер Н. О. Об изменении амплитуды и фазы Чандлеровского движения полюса // Изв. ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 48–49.

Переёлкин В. В., Филиппова А. С., Вэй Ян Сое Уточненная модель долгосрочного прогноза движения земного полюса // Космонавтика и ракетостроение. 2018. Т. 100. № 1. С. 143–149.

Подобед В. В., Нестеров В. В. // Общая астрометрия. М.: Наука, 1975. 551 с.

Сидоренков Н. С. Физика нестабильностей вращения Земли. М.: Физматлит, 2002. С. 385.

Тиссен В. М. СНИИМ – СГГА в Международном проекте ЕОРСРРР (Earth orientation parameters combination of prediction pilot project) // Вестник СГГА. 2011. Вып. 1 (14). С. 97–104.

Тиссен В. М. Сравнение методов прогнозирования ПВЗ по результатам соревновательного проекта МСВЗ // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 5. № 3. С. 3–7.

Тиссен В. М., Толстиков А. С., Симонова Г. В. Прогнозирование параметров вращения Земли с помощью адаптивных гармонических моделей. Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2020. Т. 25. № 4. С. 238–245.

Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2021–2030 годы» в рамках государственной программы Российской Федерации «Космическая деятельность России».

Petit G., Luzum B. (eds.) IERS Conventions (2010). IERS Technical Note No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie: Frankfurt am Main, 2010.

Zotov L., Bizouard C., Sidorenkov N., et al. On the variability of the Chandler wobble // Proceedings of the Journées 2019. 2020. P. 249–254.