ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

# Аномалии чандлеровского колебания полюса в 2010-е годы

Л. В. Зотов,[1,2,a] Н. С. Сидоренков,[3] К. Бизуар[4]

[1] *Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга (ГАИШ) Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Россия, 119234, Москва, Университетский пр., д. 13*

[2] *Московский институт электроники и математики (МИЭМ), Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики. Россия, 123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34*

[3] *Гидрометцентр России. Россия, 123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д. 13, строение 1*

[4] *SYRTE, Парижская обсерватория, Исследовательский университет PSL, CNRS, Университет Сорбонны, UPMC, Париж 06, Франция*

Поступила в редакцию 05.02.2022, после доработки 07.04.2022, принята к публикации 18.04.2022.

Земля вращается неравномерно: положение полюса дрейфует и описывает круги с годовым и чандлеровским (433 суток) периодами, скорость вращения Земли также меняется. В начале 2000-х годов амплитуда чандлеровского колебания начала убывать и в 2017-2020 гг. достигла исторического минимума, сравнимого лишь с минимумом конца 1920-х годов. Мы выделили чандлеровское колебание различными методами (снятием тренда и годового колебания, фильтрацией Пантелеева и др.) из рядов данных по движению полюса EOP C04 и EOP C01 и показали, что с начала 2010-х годов происходит также изменение его фазы. Подобное изменение фазы происходило в 1920–1940-х годах и составило $\pi$ радиан, в настоящее время оно приближается к 2 радианам. Обсуждаются возможные интерпретации названных явлений, их проявления в спектре движения полюса, вероятные причины.

*Ключевые слова*: вращение Земли, чандлеровское движение полюса.
УДК: 521.93. PACS: 91.10.-v.

## ВВЕДЕНИЕ

Направление мгновенной оси вращения Земли в земной системе координат (ЗСК) меняется в пределах 400 миллисекунд дуги (∼12 м) и определяется двумя координатами полюса $x$, $y$ (рис. 1,*a*). Движение полюса теоретически было предсказано еще Эйлером, его искали астрометристы Бессель, Петерс, Кюстнер и др., но открыл в 1891 г. американский ученый Чандлер [1]. Выяснилось, что полюс колеблется с периодами 365 и 433 суток, которые сейчас носят название годового и чандлеровского. Если первое (вынужденное) колебание вызвано сезонными перераспределениями вещества в оболочках планеты, то чандлеровское колебание считается собственным (свободным) колебанием оси вращения Земли. Отличие его периода в 433-суток от предсказанного Эйлером 305-суточного объяснено Ньюкомбом [2] как следствие упругих свойств Земли: она стремится изменить фигуру и приспособиться к новому положению полюса (полюсный прилив). Позже были учтены также свойства Земных недр и наличие ядра. Важную роль в совершенствовании теории сыграли работы Дж. Дарвина, У. Кельвина, А. Пуанкаре, М. Молоденского, Г. Джеффриса, К. Вилсона и др. В частности, было показано, что наличие вязкости у некоторых оболочек Земли приводит к диссипации энергии, и чандлеровское колебание затухло бы за срок порядка 50 лет, не будь источников, поддерживающих его [3, 4].

Это учтено в линеаризованном уравнении Эйлера–Лиувилля для движения полюса:

$$\frac{i}{\sigma_c}\frac{dp(t)}{dt} + p(t) = \chi(t), \tag{1}$$

здесь комплексная траектория полюса $p = x - iy$ слева определяется входным возбуждением $\chi(t) = \chi_x + i\chi_y$ справа. Резонансная чандлеровская частота $\sigma_c = 2\pi f_c(1 + i/2Q)$ зависит от действительной частоты $f_c \approx 1/433$ суток$^{-1}$ и добротности $Q \approx 100$. Последняя как раз и характеризует скорость диссипации. Мы выбрали значения параметров, лежащие в диапазоне их определений, сделанных в работе [5]. Вышеприведенному уравнению соответствует передаточная функция

$$W(\omega) = \frac{\sigma_c}{\sigma_c - \omega}, \tag{2}$$

видно, что при приближении частоты входного воздействия к чандлеровской, отклик резонансно усиливается. Обратно: значительное резонансное чандлеровское колебание может возбуждаться достаточно незначительным входным воздействием. Подробнее о свойствах уравнения (1) можно узнать в [6], там же приведены оценки входных возбуждений со стороны океана и атмосферы на резонансной частоте, по модулю не превышающие нескольких миллисекунд дуги.

В работах Р. Гросса [7], А. Бжезинского [8], Б. Чао [9] и др. источниками энергии возбуждения $\chi(t)$ чандлеровского движения полюса (ЧДП)

[a] E-mail: wolftempus@gmail.com

на равных были признаны шумоподобные процессы в атмосфере и океане. Хорошие обзоры даны в книгах [10–12]. Никаких особенностей или избытка мощности в спектрах рядов угловых моментов (импульса) океана (УМО) и атмосферы (УМА) на чандлеровской частоте не выявлено.

На частоте один цикл в год в океане и атмосфере присутствует мощный сезонный сигнал, откликом на который является стабильное годовое колебание полюса. На чандлеровской частоте в спектрах УМО и УМА особенностей нет, но резонансный отклик системы 1 приводит к значительному ЧДП, амплитуда которого непостоянна. В 1920-е годы наблюдался ее минимум [13], затем амплитуда ЧДП, возрасла и колебалась на уровне от 100 до 300 мс дуги. В 2000-х годах амплитуда снова стала уменьшаться. Вопрос о причинах непостоянства амплитуды ЧДП обсуждался во многих работах, как приведенных выше авторов, так и наших [14, 15]. Есть сторонники гипотезы, что это чисто случайное явление, которое происходит время от времени вследствие стохастической природы возбуждения [9]. Есть работы, где спад амплитуды ЧДП считается свободным затуханием, когда возбуждение просто отсутствует [16]. Наше мнение, основанное на представленном в [14] решении задачи восстановления чандлеровского возбуждения $\chi(t)$ таково: существует некоторая регулярность в возбуждении, накануне эпохи минимума амплитуды ЧДП возбуждение действует в противофазе, вызывая спад. При росте амплитуды ЧДП возбуждение действует синфазно, раскачивая колебание. Имеются 40 и 80-летние квазициклы роста и спада [6, 17].

Уменьшение амплитуды ЧДП 1920-х годов сопровождалось скачком фазы на $\pi$ радиан, который был замечен еще А. Я. Орловым. Как будет показано ниже, дрейф фазы имеет место и сейчас. Авторы [18] показали, что при наличии такого скачка, появится расщепление чандлеровской спектральной линии, выявленное, к примеру, в [19]. В работе [20] на основе анализа долговременного ряда движения полюса методами сингулярного спектрального анализа (ССА) и Фурье–фильтрации было выявлено три скачка фазы — в 1850-х, 1920-х и 2000-х годах. Хотя идея упомянутой работы верна, на момент ее выхода в 2010 г., как видно по более современным данным, ЧДП лишь начинало затухать, а фаза меняться. То, что это произойдет предсказывалось [21], в том числе и нами в [22].

В представляемой здесь работе на основе последних данных показано, что минимум амплитуды ЧДП достигнут в 2017–2019 гг. когда это колебание почти полностью исчезло, в 2021 г. оно возобновилось. По всей видимости, сейчас также происходит дрейф фазы, совершенно аналогично дрейфу в 1920-е годы.

В разделе 1 мы поясним, из каких данных мы выделяем чандлеровское колебание полюса и сделаем предварительный анализ, в разделе 2 рассмотрим спектр, в разделе 3 методом фильтрации Пантелеева выделим ЧДП и исследуем его амплитуду и фазу. В заключении кратко обсудим полученные результаты.

## 1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ПОЛЮСА

Напомним, что ранние астрометрические определения положения полюса в XIX веке выполнялись на обсерваториях Пулково, Вашингтона и Гринвича. Специально оснащенные для этого зенит–телескопами станции Международной службы широты приступили к работе в 1899 г. Точность определений составляла порядка 0.01 сек. дуги. Примерно с 1980-х гг. определения стали осуществляться на основе данных космической геодезии – глобальных навигационных систем GPS, ГЛОНАСС и др., межконтинентальной радиоинтерферометрии РСДБ, доплеровской орбитографии DORIS, лазерной локации спутников и Луны. Точность современных определений положения полюса возросла в тысячу раз по сравнению с ранними астрометрическими наблюдениями и составляет десятки микросекунд дуги. Международной служба вращения Земли и систем отсчета (МСВЗ) обрабатывает данные со всего мира и сводит их в единые бюллетени центра параметров вращения Земли (ПВЗ) в Парижской обсерватории, доступные в интернете по ссылке http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/.

Траектория движения полюса Земли с 1846 по 2022 гг. по данным бюллетеня EOP C01 центра ПВЗ МСВЗ представлена на рис. 1,*а*. Хорошо видны круги различного радиуса, которые полюс описывает вокруг среднего положения. В настоящий момент круги более гладкие по сравнению с XIX веком, что объясняется возросшей точностью. Кроме того, радиус движений полюса уменьшился из-за уменьшения амплитуды чандлеровского колебания. Красной линией на рис. 1,*а* показан линейный тренд, синей — дрейф полюса, выделенный методом сингулярного спектрального анализа (ССА) [23]. Тренд подробно исследован нами в [24]. На интервале 1846–2022 оценены коэффициенты линейной модели $a(t-t_0)+b$, составившие для $x$: $a = 0.86$, $b = -30.42$; для $y$: $a = -2.99$ мс дуги в год $b = -37.65$ мс дуги, соответственно, $t_0 = 1900$ г.

Для предварительного исследования чандлеровского колебания мы вычли из данных по движению полюса указанную выше модель линейного тренда, а также годовое колебание постоянной амплитуды (рис. 3,*а*), подобранное методом наименьших квадратов (МНК). На рис. 1,*б,в* по отдельности представлены полученные таким образом остаточные изменения $x$ и $y$ координат полюса. В качестве исходных использованы данные нескольких бюллетеней МСВЗ: черным цветом показаны данные бюллетеня EOP C01 с 1846 г. (файл eopc01.iau2000.1846-now), красным — EOP C01 с 1900 г. (eopc01.iau2000.1900-now.dat), синим — EOP C04 с 1962 г. (eopc04_IAU2000.62-now). Будем условно называть их рядами 1, 2, 3. Отметим, что в бюллетене EOP C01 до 1890 г. данные приведены с временным шагом 0.1 года, а после — с шагом 0.05 года. Мы привели данные ряда 1 к шагу 0.05 года на всем интервале линейной интерполяцией. В бюллетене EOP C04 с 1962 г. (ряд 3) данные предоставляются с шагом в сутки, который

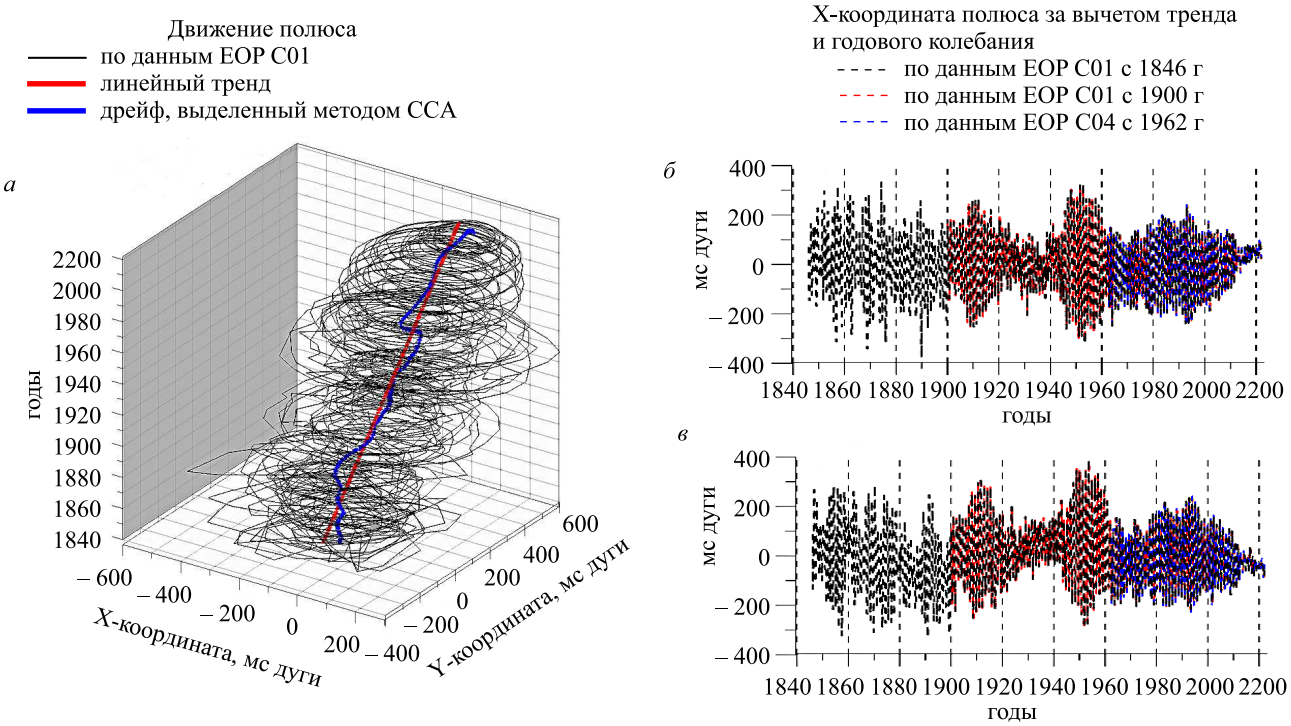


*Рис. 1.* Траектория движения полюса и дрейф полюса (*а*), *x*- и *y*–координаты по отдельности, из которых вычтено годовое колебание и тренд (*б,в*)

мы оставили без изменений. Фактически, все три ряда – это одни и те же комбинированные данные, но разного временного шага и продолжительности.

Нас особенно будут интересовать два интервала наблюдений на которых ЧДП существенно менялось. На рис. 2 слева показаны изменения на интервале с 1915 по 1950 гг., справа — на интервале с 2000 по 2022 гг., сверху — для *x*, снизу — для *y* координаты полюса. Повторим, что представлены остаточные ряды после вычитания тренда и годового колебания те же, что и на рис. 1,*б*, но в увеличенном масштабе. Именно чандлеровское колебание вносит основной вклад в эти остаточные ряды, а шумы, хотя и весьма велики в ранних наблюдениях, скорее носят характер некоррелированных случайных скачков.

В зависимости от того, какой продолжительности исходные данные, результаты определения годового колебания и, как следствие, остаточные движения полюса незначительно различаются. Разберем этот вопрос подробнее. Амплитуда годового колебания подобранного МНК по данным EOP C01 с 1900 г. (ряд 2) и EOP C04 с 1962 г. (ряд 3) составила для x-координаты почти 100 мс дуги, а по данным EOP C01 с 1846 г. (ряд 1) — 88 мс дуги, и оказалась немного отлична по фазе. Эти годовые гармоники представлены на рис. 3,*а* с 2010 по 2022 гг. Видно, что остаточные ряды 2 и 3 совпадают, но отличаются от ряда 1 в пределах 10 мс дуги. Можно заключить: данные до 1890 г. влияют на оценку амплитуды годового колебания и на поведение остаточного ряда. Особенно важно понять, насколько велико влияние в интервале минимальной амплитуды чандлеровского колебания, и будут ли выводы об амплитуде и фазе ЧДП зависеть от указанных разночтений в годовом колебании. Из рис. 2, 3,*а* можно понять, что разногласия между остаточными рядами не превышают 10 мс дуги, что меньше амплитуды ЧДП в 2017, 2018 и 2022 гг., составляющей всего лишь около 30 мс дуги. Таким образом, разночтения не подвергают сомнению тот факт, что с 2018 по 2020 г. чандлеровское колебание полюса практически прекратилось, а в 2021 г. вновь появилось.

Помимо уменьшения амплитуды на рис. 2 для обоих интервалов времени (слева и справа), как для *x* (вверху) так и для *y* (внизу) можно отчетливо проследить и дрейф фазы остаточных рядов в окрестностях 1928 и 2010 гг. Специальными методами он будет вычислен в следующем разделе (рис. 4,*б*), но уже «невооруженным» глазом его можно заметить на рис. 2, сопоставляя максимумы колебаний (наибольшие значения в цикле) с вертикальными штрихованными линиями-отметками, проведенными с шагом 1.2 года (периодом чандлеровского колебания).

Так, если в начале интервала показанного справа, в 2000 г., максимум по *x* приходился практически на штрихованную вертикальную линию сетки, к 2022 г. он сместился так, что на вертикальную отметку пришелся минимум. При внимательном рассмотрении дрейф фазы виден на всех четырех графиках. Фаза плавно дрейфует на протяжении нескольких десятилетий, ускоряясь в самом минимуме амплитуды. Вне этих интервалов фаза ЧДП ведет себя стабильно.

Таким образом, как изменения амплитуды, так и фазы ЧДП очевидны уже в исходных данных по ДП, достаточно лишь устранить из них годовое колебание, амплитуда которого меняется незначительно (по сравнению с исследуемым ЧДП).

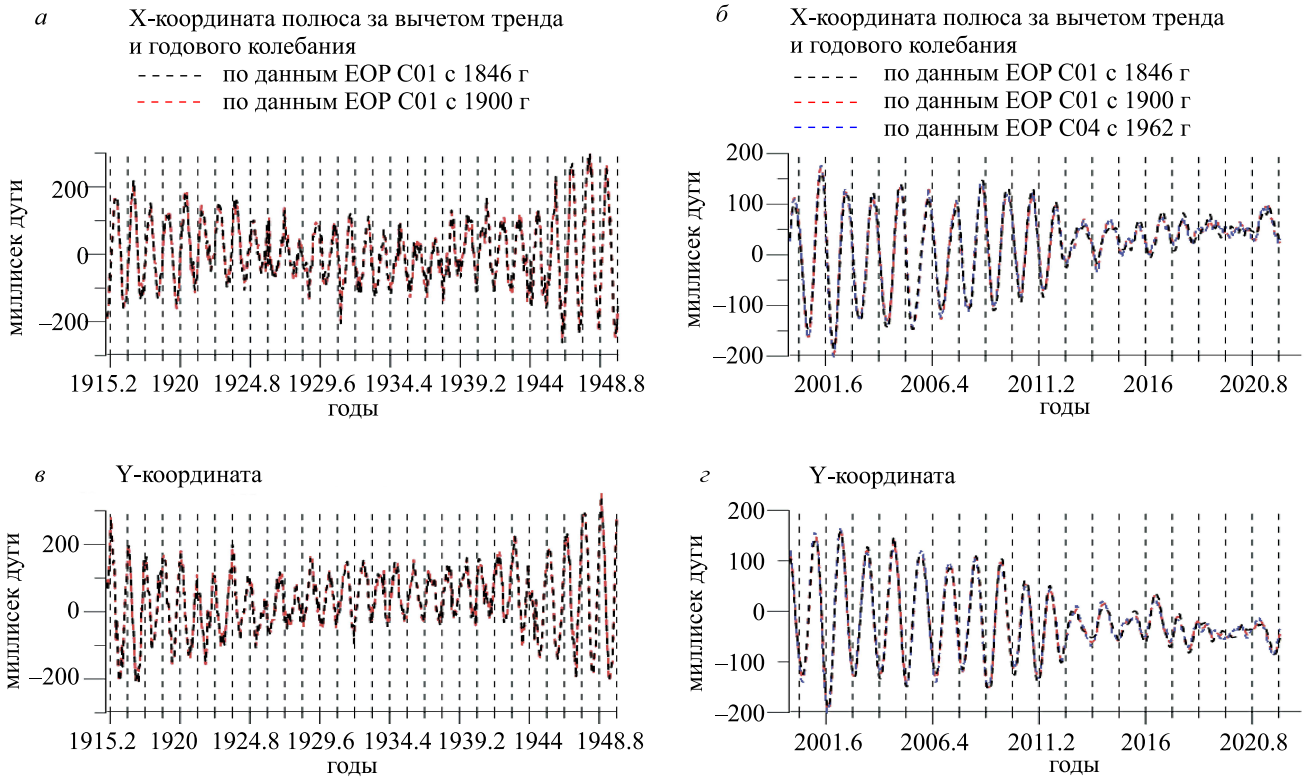


*Рис. 2.* Изменения амплитуды и фазы движения полюса на интервалах 1915–1950 (слева) и 2000–2022 гг. (справа) для $x$ (вверху) и $y$ (внизу) координат полюса. Линии сетки отстоят друг от друга на 1.2 года

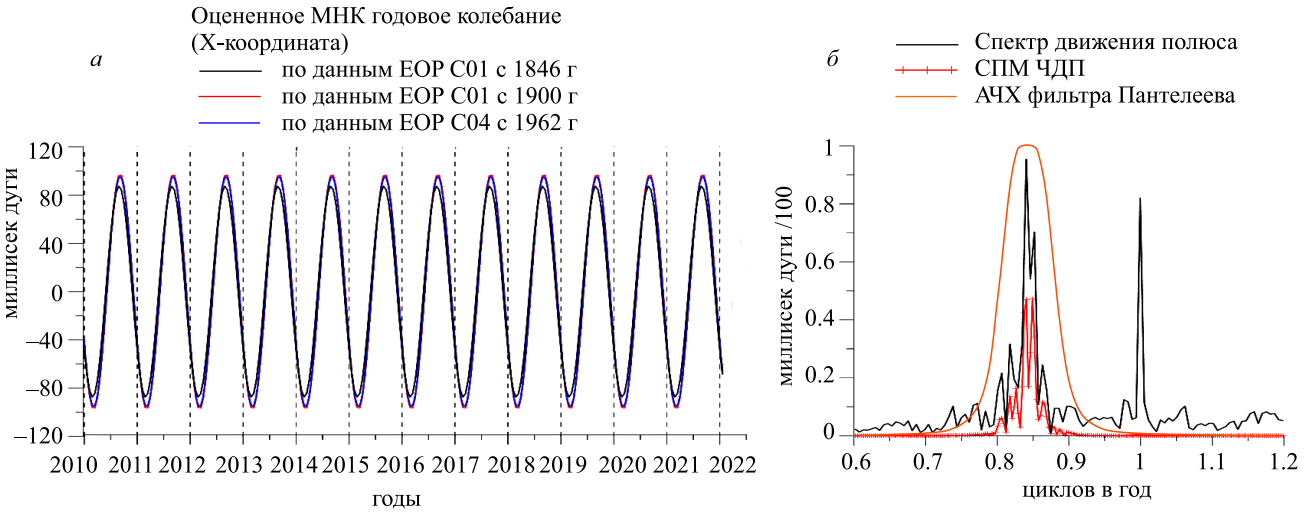


*Рис. 3.* Подобранное МНК годовое колебание (*а*); спектр движения полюса, амплитудно–частотная характеристика фильтра Пантелеева (*б*)

## 2. ПРОЯВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОСТИ ЧАНДЛЕРОВСКОГО КОЛЕБАНИЯ В СПЕКТРЕ

На рис. 3,*б* представлен спектр движения полюса по исходным данным EOP C01 с 1846 г. для положительных частот от 0.6 до 1.2 циклов в год, соответствующих прямым (против часовой стрелки) движениям комплексной траектории $p = x - iy$. Спектр, представленный черной кривой, получен непосредственно быстрым преобразованием Фурье (БПФ) ряда $p$ по данным EOP C01 с 1846 г. В нем хорошо видны линии годового и чандлеровского колебаний. Спектральная линия чандлеровского колебания расщеплена, частоты основных двух пиков составляют примерно 0.84 и 0.85 цикла в год. Расщепление еще лучше прослеживается в показанной красным цветом спектральной плотности мощности (СПМ) чандлеровского колебания, которая получена из остаточного (после вычитания годового колебания и тренда) ряда 1 взятием БПФ от автоковариационной функции. Из каждого значения СПМ извлечен квадратный корень, а сами значения обоих спектров в миллисекундах дуги поделены на 100, чтобы их можно было сопоставить с фильтром Пантелеева, который будет представлен в следующем разделе. Конечно, если сгладить спектр по нескольким точкам, расщепление чандлеровской спектральной

линии будет незаметно. Поскольку длительность исходного ряда EOP C01 составляет 176 лет, спектральное разрешение составляет 0.0057 цикла в год. Уменьшение шага семплинга может лишь увеличить частоту Найквиста, но на спектральное разрешение не влияет. Оба острия расщепленного пика разделены всего парой точек. Однако расщепление чандлеровской спектральной линии есть неизбежное следствие переменности амплитуды и фазы самого чандлеровского колебания.

В работе [19] спектр строился с шагом 0.002 года и расщепление было замечено уже по 70 (с 1891) годам наблюдений. В работе [18] было теоретически доказано, что расщепление в спектре возникает, если в какой-то момент колебание постоянной амплитуды, например синус, меняет знак на противоположный, то есть скачкообразного изменяет фазу на $\pi$. В этом смысле, расщепление пика может и не означать наличия двухчастотного колебания, но являться проявлением переменности фазы гармоники. По всей видимости, реальная фаза ЧДП меняется не мгновенно скачком, а плавно на интервале в $\sim$ 20 лет. Исследование характера этого изменения может пролить свет на его природу. В действительности меняется не только фаза, но и амплитуда ЧДП. При наличии таких изменений единственной гармоникой в спектре представить сигнал не удастся ни при каких условиях, амплитудная модуляция неизбежно приведет к расщеплению в спектре. Поясним это на элементарном примере. Воспользуемся формулой сложения косинусов

$$\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t = 2\cos\frac{(\omega_1-\omega_2)t}{2}\cdot\cos\frac{(\omega_1+\omega_2)t}{2}, \tag{3}$$

видно, что близкие частоты $\omega_1, \omega_2$ дают колебание на промежуточной частоте с амплитудной модуляцией низкой частоты, равной их полуразности. В спектре ЧДП на рис. 3,*а* заметно наличие двух пиков с частотами $\omega_1 = 2\pi\cdot 0.84, \omega_2 = 2\pi\cdot 0.85$, которое дает модуляцию частотой $(\omega_1-\omega_2)/2 \approx 2\cdot\pi\cdot 0.005$, т.е. периодом около 200 лет. При этом половину периода знак модулирущего косинуса будет положительным, половину — отрицательным. Переход амплитуды модуляции через ноль как раз и будет эпохой минимума ЧДП с одновременной сменой фазы на $\pi$.

Вопрос о том, является ли расщепление в спектре результатом наличия двух частот чандлера, следствием особенностей входного возбуждения, амплитудной или фазовой модуляции можно обсуждать, но сам факт наличия такого расщепления, широко известный специалистам и признанный в работах [20, 25, 26], не подлежит сомнению. Конечно, если выбрать для анализа интервал времени, на котором ни амплитуда, ни фаза ЧДП не меняются, расщепление исчезнет, и колебание будет представлено единственной спектральной линией. При рассмотрении короткого промежутка оно также может пропасть. Это было продемонстрировано еще в работе [19]. И, хотя по коротким отдельным рядам данных взятым до 1928 г. либо после и не содержащим ни одной эпохи минимума ЧДП увидеть обе гармоники в спектре затруднительно, длительные данные, включающие эпоху минимума ЧДП, непременно их выявляют. Таким образом, списывать расщепление на ошибки при спектральном анализе случайного процесса нельзя.

## 3. ВЫДЕЛЕНИЕ ЧАНДЛЕРОВСКОГО КОЛЕБАНИЯ ФИЛЬТРОМ ПАНТЕЛЕЕВА

Для более отчетливого выделения ЧДП воспользуемся методом фильтрации Пантелеева, разработанным и подробно описанным в работе [14]. Амплитудно–частотная характеристика (АЧХ) полосового фильтра Пантелеева записывается как

$$L_h(f) = \frac{f_0^4}{(f-f_c)^4 + f_0^4}\ . \tag{4}$$

Здесь $f_0$ — параметр ширины фильтра, выбранный равным 0.04 цикла в год, $f_c$ — центральная частота, равная чандлеровкой 0.843 цикла в год. На рис. 3,*б* АЧХ (4) с этими параметрами показана оранжевым цветом. Такой фильтр выделяет прямые круговые чандлеровские колебания из комплексной траектории полюса $p$ и не вносит фазовых искажений. Для фильтрации во временной области можно воспользоваться также сверткой с комплексной импульсной характеристикой фильтра Пантелеева, где $\omega_0 = 2\pi f_0$:

$$h(t) = \frac{\omega_0}{2\sqrt{2}} e^{-\left(\frac{\omega_0|t|}{\sqrt{2}} - i2\pi f_c t\right)} \left(\cos\frac{\omega_0 t}{\sqrt{2}} + \sin\frac{\omega_0|t|}{\sqrt{2}}\right). \tag{5}$$

На рис. 4,*а* представлено чандлеровское колебание ($x$–координата, для $y$ биения аналогичны), выделенное фильтром Пантелеева (4) из ряда 1 — черным цветом, из ряда 2 — красным, из ряда 3 — синим. Огибающие показаны сплошными кривыми тех же цветов. Фильтр Пантелеева с выбранными параметрами достаточно узкополосный, поэтому предварительное вычитание годового колебания и тренда не обязательно и на результат практически не влияет.

В целом, результаты выделения ЧДП фильтром Пантелеева из рядов 1,2,3 сходны между собой. Хорошо заметны изменения амплитуды с максимумами огибающей примерно в 1871, 1912, 1953 и 1991 годы и минимумами около 1848, 1928 и 2017 годов. Точная датировка здесь затруднительна, условно будем называть их минимумами 1850-х, 1920-х и 2010-х годов. И, хотя по данным фильтрации ряда 2 (красным) и ряда 3 (синим) минимум амплитуды ЧДП оказывается пройден в 2017 г., после чего амплитуда ЧДП нарастает, по данным ряда 1 (черным) амплитуда выходит в минимум в 2018 г. и остается практически нулевой (менее 20 мс дуги) до 2022 г. Результаты фильтрации на краях зависят от многих факторов, и мы будем относиться к ним с некоторой долей условности, понимая, что результаты до фильтрации, представленные на рис. 2, согласно которым ЧДП возобновилось лишь в 2021 г., более наглядны и достоверны.

В качестве еще одного независимого эксперимента мы разделили компоненты движения полюса методом ССА с параметром лага $L = 128$ (6.4 года по 20 точек в год). Дрейф полюса был показан на рис. 1,*а* синим цветом. Годовое колебание на участке 2010–2022 гг. практически совпало с результатами, полученными МНК (рис. 3,*а*) по рядам 2,3.

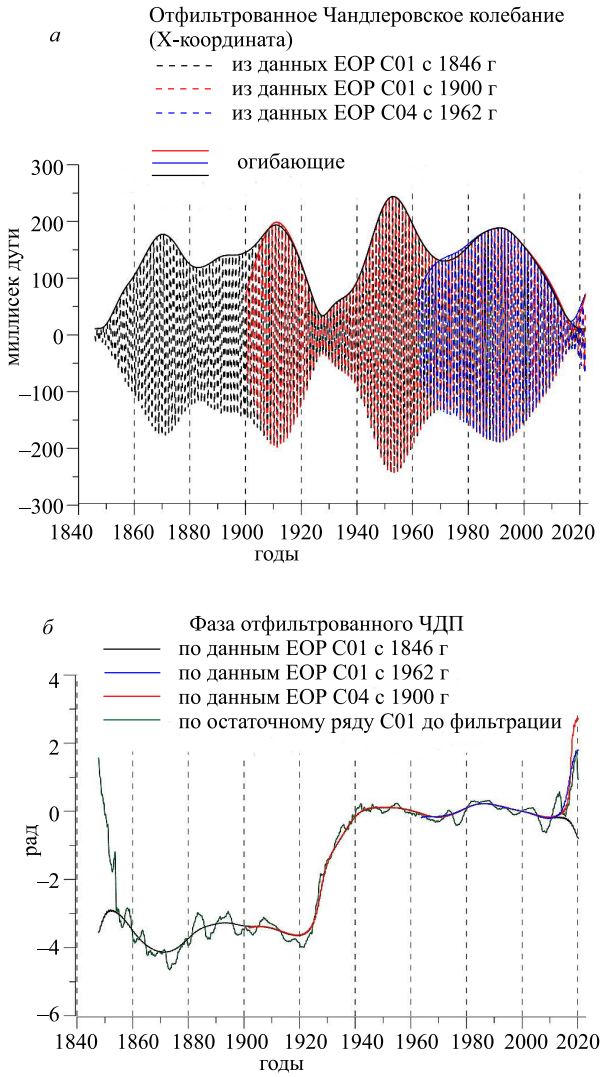


*Рис. 4.* Выделенное чандлеровское колебание, $x$–координата (*а*), и изменения его фазы (*б*)

Выделенное методом ССА чандлеровское колебание (не показано) достигло минимальной амплитуды в 2017 г. и оставалось в минимуме до 2022 года.

Оценивание амплитуды и фазы отфильтрованного ЧДП было осуществлено методом скользящего фильтра наименьших квадратов. Он предложен в [27] и, по сути, заключается в МНК-оценивании амплитуды и фазы определенной гармоники (ЧДП) в скользящем окне. Длительность скользящего окна была взята равной 42 месяцам (трем периодам Чандлера), что, ценой некоторых остаточных колебаний, позволяет достаточно близко подойти к правому концу интервала наблюдений. Процедура оценивания была приспособлена к комплексному ряду $p$, что позволяет не только оценивать амплитуду и фазу, но и эллиптичность колебания, однако на ней мы останавливаться не будем, поскольку использованный фильтр Пантелеева подавляет ретроградные компоненты.

Изменения фазы ЧДП, выделенного фильтром Пантелеева из данных бюллетеней EOP C04 и EOP C01, показаны на рис. 4,*б*. Графики совмещены по вертикали с использованием условия равенства нулю фазы на начало 2000 г. Из всех представленных рядов видно, что при прохождении минимума 1920-х годов чандлеровское колебание изменило фазу на $\pi$.

Из анализа ЧДП, отфильтрованного из рядов 2 и 3 (красным и синим), следует, что увеличение фазы происходит на наших глазах после 2010 г., одновременно с прохождением минимума амплитуды ЧДП. На том же рис. 4, *б* зеленым цветом представлен результат оценивания фазы по остаточному ряду 1 из которого вычтен тренд и годовое колебание (см. рис. 2) до всякой фильтрации. После 2010 г. он также демонстрирует дрейф фазы вверх, как и у синей кривой по ряду 3, но более шероховатое. На левом конце этот остаточный ряд показывает сильный скачок фазы, который мы комментировать не будем. Поведение фазы ЧДП, выделенного методом ССА с лагом $L = 128$, дает сходную картину как на левом, так и на правом концах интервала наблюдений.

Единственный сигнал, который ведет себя иначе — это отфильтрованное ЧДП по ряду 1 с 1846 г. Фаза для него, показанная на рис. 4,*а* черным цветом, на правом конце дрейфует немного вниз. На левом конце, в 1850-е годы, также имеются фазовые изменения. Исключая ранние данные до 1890 г. можно прийти к тому, что после 2010-го года фаза вновь начинает возрастать. Это убеждает нас в том, что ранние данные могут вносить некоторые искажения в результат.

Отметим, что изменения как амплитуды так и фазы ЧДП, выделенного из ряда 1 (черная кривая), схожи с результатами, полученными в работе [20], рис. 3. В названной работе также выявлен перепад фазы в 1850-е годы и ее уменьшение с начала 2000-х годов. В нашем случае незначительное уменьшение фазы начинается в 2010-х.

Обсудим возможность искажения результатов фильтрации краевым эффектом. Представленное на рис. 4,*а* чандлеровское колебание выделялось посредством фильтрации в частотной области перемножением комплексного спектра движения полюса (рис. 3,*б*) на АЧХ фильтра (4). После обратного преобразования Фурье такая методика (теорема о свертке) дает временной ряд чандлеровского колебания на те же моменты времени, что и исходный ряд.

Фильтрация посредством свертки с окном (5) во временно́й области нами не проводилась, она требует отступа от краев на полуширину временно́го окна, которое при выбранном параметре ширины $f_0$ составляет около 20 лет. Отступ необходим, поскольку сглаженную точку мы получаем на середину временного окна, и данные должны присутствовать как слева так и справа от нее. На краю данных не хватает и необходимо сместиться в ту или иную сторону на полуширину фильтра. Под полушириной мы понимаем время спада от максимума в центре временно́го окна до практически нуля на краях. При выполнении фильтрации в частотной области отступа от краев не требуется, поскольку сигнал автоматически периодически продолжается влево и вправо. При этом если левый и правый конец ряда не стыкуются и между ними есть разногласие на частоте пропускания, то возникает скачок,

влияющий на все частоты. Так появляется краевой эффект, колебания Гиббса и т.п. [23]. И, хотя на внутреннем интервале данных результаты частотной и временно́й фильтрации совпадают, результаты на границах, полученные только частотной фильтрацией могут оказаться искажены краевыми эффектами, полностью исключить которые не представляется возможным.

Степень влияния краевого эффекта на амплитуду выделенного ЧДП можно видеть при сравнении огибающих черной (EOP C01 с 1846 г.) и красной (EOP C01 с 1901 г.) кривых на рис. 4,*а*. Амплитуда красной кривой на ее левом конце заметно отличается от поведения черной кривой, полученной на более длительном интервале, для которой график в 1900-е годы оказывается не затронут краевым эффектом. Для минимизации краевых эффектов мы старались совместить значения на левом и правом концах анализируемых рядов.

Сглаживая данные и выделяя частоты именно вблизи чандлеровской, мы как-бы неявно принуждаем результат (выделенное ЧДП) обладать некоторыми наперед заданными свойствами, обусловленными априорным заданием спектрального диапазона. Это, вероятно, сказывается как на поведении фазы, так и амплитуды на краях. К примеру, как уже говорилось, из рис. 4,*а* заметно, что отфильтрованное из рядов 2 и 3 ЧДП достигает минимума в 2017 г. а затем начинает расти, а отфильтрованное из ряда 1 — держится в минимуме с 2018 по 2022 гг. Фаза, наоборот, незначительно спадает для ряда 1 и существенно растет для рядов 2 и 3.

Для того, чтобы более уверенно судить о реально происходящих на краях изменениях, во втором разделе статьи мы предварительно проанализировали ряды рис. 2, полученные без фильтрации и свободные от краевых эффектов. По ним, а также по не представленным здесь результатам ССА, можно сделать вывод, что минимум амплитуды ЧДП в конце 2010-х годов не подлежит сомнению. Изменения фазы ЧДП в конце 2010-х годов также присутствуют. Основываясь на рис. 4, *б* мы оценили изменения фазы с начала 2010 г. по 2022 г. величиной около 2 радиан.

При этом скорость линейного изменения фазы по ряду 3 (EOP C04) дает на интервале с 2010 по 2015 г. величину 0.065 рад в год, а с 2015 по 2022 — уже 0.35 радиан в год. С 1920 по 1940 г. по ряду EOP C01 линейный рост фазы составлял в среднем 0.2 радиана в год. При чем и в 1930-е и в 2010-е происходил именно плавный рост фазы, т.е. смещение максимума 433–суточного колебания влево на рис. 2. Если рост фазы продолжится, через 5–10 лет изменение достигнет $\pi$ радиан. Чтобы более четко удостовериться в том, что скорость изменения фазы растет на минимуме амплитуды ЧДП в 2017–2020 гг., и точнее оценить итоговую величину, освободившись от краевого эффекта, потребуется еще накопить данные.

Удобный способ следить за состоянием ЧДП и его фазой предоставляет портал Центра ПВЗ в разделе EOP series & analysis (https://hpiers.obspm.fr/eop-pc/index.php?index=analysis&lang=en). Достаточно выбрать ряд (к примеру, C01), указать интервал времени (с 1962 г.) и анализируемые параметры ($x$ или $y$-координату полюса), выбрать применение фильтра Пантелеева и его параметры $f_c = 0.843$, $f_0 = 0.04$ цикла в год и нажать Submit. Появятся графики выделенного ЧДП, его огибающей и фазы. Предлагаем читателям самостоятельно следить за ситуацией.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе показано, что второе десятилетие XXI века отмечено выраженными аномалиями в чандлеровском колебании оси вращения Земли. После 2010 г. амплитуда этого 433–суточного колебания начала спадать и в 2017–2020 гг. достигла исторического минимума, сравнимого с минимумом 1928 г. Как и тогда, фаза колебания также начала меняться и, по нашим оценкам, ее изменения уже приближаются к 2 радианам. Почти век назад, в 1920-е годы фаза изменилась на $\pi$. Причина этого явления до сих пор не выяснена, но факт его повторного возникновения должен помочь ее выяснению. Мы склонны воспринимать это как свидетельство наличия некоторой регулярности в поведении чандлеровского колебания. Скачок фазы можно смоделировать переходом огибающей через ноль, то есть сменой знака 90-летней огибающей несущего колебания с положительного на отрицательный согласно формуле (3).

Так или иначе, модуляция амплитуды и изменения фазы приводят к расщеплению чандлеровского пика в частотном спектре движения полюса. Наличие такого расщепления может быть связано с особенностями входного возбуждения чандлеровского колебания, а не изменением самой частоты резонанса. По крайней мере частота самого чандлеровского колебания по наблюдениям стабильна. Если бы она плавно менялась, на графике фазы на рис. 4,*б* наблюдался бы дрейф (наклон) не только в 1920-е и 2010-е годы, но и на всем интервале наблюдений [27]. Теория говорит, что частота резонанса единственна. Резкая перестройка свойств Земли и ее недр, которая могла бы привести к изменениям передаточной функции уравнений Эйлера–Лиувилля (1) видится маловероятной. Вместе с тем известно, что фазово–частотная характеристика системы (2) вблизи резонанса ($\omega = 2\pi f_c$) также меняется на $\pi$ и, если предположить что возбуждение перемещается с частот, расположенных по одну сторону от резонансной $f_c$ на другую, то скачок фазы бы произошел, однако этому сопутствовало бы усиление амплитуды ЧДП, а не уменьшение. Кроме того, так как отклик линейной системы происходит на частотах возбуждения, мы видели бы изменение частоты ЧДП во времени, чего не наблюдается. Одним словом, является ли наблюдаемое явление результатом наличия двух гармоник, дающих биения, либо следствием сложной природы возбуждения или чего-то иного, пока остается не выясненным.

Но та регулярность в поведении амплитуды и фазы чандлеровского колебания, которую мы видим, на наш взгляд, не согласуется с гипотезой, что чисто шумовые случайные процессы в океане и атмосфере являются источниками его возбуждения.

Само понятие случайности для гидродинамических, механических, тепловых процессов таких масштабов есть не следствие индетерминизма, а лишь результат недостаточного понимания причин наблюдаемого сложного явления, затруднений при их выделении на фоне других близких по энергетике процессов. Если же эти причины будут установлены и удастся спрогнозировать поведение амплитуды ЧДП, то это существенно улучшит долгосрочные прогнозы движения полюса.

Мы склонны считать, что искать причину появлений аномалий ЧДП 1920-х и 2010-х годов, следует тщательно исследуя входные возбуждения $\chi$. Возможным объяснением мог бы служить синхронизирующий внешний космический фактор, например, движения Луны [28]. Возможно, какой-то квазирегулярный процесс в недрах, в океане, или лучше сказать, в оболочках Земли, откликаясь на этот фактор, приводит к раскачке оси при одновременном замедлении вращения, либо, наоборот — к затуханию ЧДП при небольшом ускорении вращениия [29, 30].

Отметим, что в 2016 г., после сильного явления Эль–Ниньо началось ускорение во вращении Земли, продолжившееся до 2021 г. В момент написания этой статьи Земля вращается быстрее, чем когда–либо в эпоху точных сравнений и ее скорость сопоставима лишь с максимумом 1930-х годов. Пока еще не известно, прекратится ли ускорение или продолжится. В первом случае тренд длительности суток (LOD) развернется и пойдет вверх, что, кажется уже наметилось в 2022 г. Если же ускорение продолжится, тогда, возможно, придется вычесть секунду из атомной шкалы UTC [31, 32].

Но обозначенные выше вопросы оставим для будущих работ. Задачей же данной работы было показать сам факт аномальных изменений амплитуды и фазы ЧДП в конце 2010-х–начале 2020-х годов.

Работа выполнена при поддержке гранта Национального научного фонда КНР (NSFC) No. B17033, гранта научного фонда НИУ ВШЭ No. 20-04-033, гранта РНФ No. 21-47-00008 и Школы Космос МГУ имени М. В. Ломоносова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chandler S.C.* // Astronomical Journal. 1891. **11**, 248. P. 59.
2. *Newcomb S.* // MNRAS. 1892. **248**. P. 336.
3. *Джеффрис Г.* Земля, ее происхождение, история и строение. М.: Издательство иностранной литературы, 1960.
4. *Yatskiv Y.* // ASP Conference Series. 2000. **208**. P. 383,
5. *Nastula, J., Gross R.* // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2015. **120**, P. 4474.
6. *Зотов Л.В.* Вращение Земли и климатические процессы. Монография. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2022.
7. *Gross R.* Theory of Earth Rotation Variations. VIII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy, 2015.
8. *Brzezinski A., Nastula J.* // Adv. Space Res. 2002. **30**, 2. P. 381.
9. *Chao B.F., Wei-Yung Chung*// J. of Geodynamics. 2012 . **62**. P. 35.
10. *Bizouard Ch.* Geophysical modelling of the polar motion. De Gruyter, 2020.
11. *Dehant V., Mathews P. M.* Precession, Nutation, and Wobble of the Earth. Cambridge University Press, 2015.
12. *Sidorenkov N.S.* The Interaction Between Earth's Rotation and Geophysical Processes. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2009.
13. *Hopfner J.* // STN, 13, SSN 1610-0956, GFZ, Potsdam, 2002.
14. *Zotov L.V., Bizouard C.* // J. Geodyn. 2012. **62**. P. 30.
15. *Zotov, L., Bizouard C., Sidorenkov N.* et al. // Proceedings of Journees. 2020. **2019**. P. 227,
16. *Gross R.* // Poster at IUGG, EGU2015-6194. Prague, 2015.
17. *Zotov L.V., C. Bizouard, N. Sidorenkov* et al. // Proceedings of Journees. 2020. **2019**. P. 249.
18. *Федоров Е.П., Яцкив Я.С.*// Астрономический журнал. 1964. **XLI**, вып. 4. С. 764.
19. *Яшков В.Я.*// Астрономический журнал. 1964. **XLI**, вып. 4. С. 760.
20. *Malkin Z.M., Miller N.* // Earth Planets Space. 2010. **62**, P. 943.
21. *Nastula J., A. Korsun, B. Kolaczeket*et al. // Manuscripta geodaetica. 1993 . N 18 P. 131.
22. *Zotov L., Bizouard C.* // Proceedings of Journees. 2014. P. 198. Pulkovo, Russia.
23. *Зотов Л.* Теория фильтрации и обработка временных рядов, курс лекций. М.: Физический факультет МГУ, 2010.
24. *Zotov L., Ch. Bizouard, C.K. Shum* et al. // Advances in Space Research. 2022. **69**. P. 308.
25. *Яцкив Я.С.* Свободная нутация Земли по данным широтных наблюдений. Докторская диссертация. Киев, 1975.
26. *Guo J.Y., Greiner-Mai, H., Ballani, L.* et al. // J. Geodesy. 2005. **78**, P. 654.
27. *Gubanov V.S.* // Astron. Lett. 2009. **35**, P. 270.
28. *Авсюк Ю. Н.* Приливные силы и природные процессы. М.: ИФЗ им. О.Ю. Шмидта, 1996.
29. *Gorshkov V.L.* // Solar System Research. 2010. **44**, N 6. P. 487.
30. *Zotov L., Bizouard C., Shum C.K.* // Geodesy and Geodynamics. 2016. **7**, Iss. 3. P. 216
31. *Зотов Л., Бизуар К.* // Природа. РАН. 2021. N 3. С. 26.
32. *Zotov L., Bizouard Ch., Sidorenkov N.* et al. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. **1705**. 012002.

## Anomalies of the Chandler Wobble in 2010s

**L. V. Zotov**[1,2a], **N.S. Sidorenkov**[3], **Ch. Bizouard**[4],

[1]*Sternberg Astronomical Institute of Lomonosov Moscow State University. Moscow, 119234, Russia*
[2]*Higher School of Economics, Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Moscow, 123458 Russia*
[3]*Hydrometeorological Center of Russia, Moscow, 123376 Russia*
[4]*SYRTE, Paris Observatory, PSL Research University, CNRS, Sorbonne University, UPMC, Univ. Paris 06*
*E-mail:* [a]*wolftempusi@gmail.com*

The Earth's rotation is nonuniform: the position of the pole drifts and describes circles with the annual and Chandler (433 days) periods; the Earth's rotation velocity also varies. In the beginning of 2000s, the amplitude of the Chandler wobble began to decrease and in 2017–2020 reached a historical low comparable only with the low of late 1920s. We extract the Chandler time series by different methods (removal of the trend and annual oscillation, Panteleev filtering, and others) from series of EOP C04 and EOP C01 data on the polar motion and demonstrate that its phase also varies from early 2010s. Such variation in the phase occurred in the 1920s–1940s and equaled $\pi$ rad; at present, it approaches 2 rad. Possible interpretations of the phenomena, their manifestations in the polar motion spectrum, and probable causes are discussed.

*Keywords*: Earth's rotation, Chandler wobble.
PACS: 91.10.-v.
*Received 05 February 2022.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2022. **77**, No. 3. Pp. 555–563.

**Сведения об авторах**

1. Зотов Леонид Валентинович — доктор физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник; e-mail: wolftempus@gmail.com.
2. Крситиан Бизуар — доктор абилитус, астроном; e-mail: christian.bizouard@obspm.fr.
3. Сидоренков Николай Сергеевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник, доцент; тел.: (499) 795-21-52, e-mail: sidorenkov37@mail.ru.