

Апробирование метода исключения медленного тренда из измерений параметров вращения Земли с помощью двойного вейвлет-преобразования

© С. Л. Пасынок

ФГУП «ВНИИФТРИ», пос. Менделеево, Моск. обл., Россия

Реферат

При изучении вариаций параметров вращения Земли необходимо корректно исключить из результатов измерений медленный тренд. Как правило, это осуществляется применением соответствующего фильтра или прямого вейвлет-преобразования. Однако результат такой операции зависит от формы фильтра или применяемых базисных функций (в случае вейвлета) и не однозначен.

В настоящей статье рассматриваются результаты апробирования одного из методов исключения тренда — метода двойного вейвлет-преобразования, который позволяет исключить медленный тренд (состоящий как из вековой, так и из долгопериодической части) из результатов измерений без значительного искажения формы высокочастотной части исходного сигнала. Этот метод был применен для исключения медленного тренда из наблюдаемых значений параметров вращения Земли (координат земного полюса и вариаций угловой скорости вращения Земли) и последующего уточнения коэффициентов осредненных моделей сезонных вариаций угловой скорости вращения Земли, всемирного времени и движения земного полюса. В качестве измерительных данных использовались данные о параметрах вращения Земли Международной службы вращения Земли и опорных систем. После исключения тренда был проведен анализ остатков с помощью метода наименьших квадратов, в результате которого были уточнены коэффициенты усредненных моделей сезонных составляющих этих вариаций.

Качество построенных моделей оценивалось по остаточным невязкам с применением метода быстрого преобразования Фурье. Результаты показали эффективность метода и высокое качество моделей с уточненными коэффициентами.

Ключевые слова: UT1, движение земного полюса, вейвлет, тренд.

Контакты для связи: Пасынок Сергей Леонидович (pasynok@vniiftri.ru).

Для цитирования: Пасынок С. Л. Апробирование метода исключения медленного тренда из измерений параметров вращения Земли с помощью двойного вейвлет-преобразования // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 66. С. 29–36. <https://doi.org/10.32876/ApplAstron.66.29-36>

Testing a Method for Excluding a Slow Trend from Measurements of the Earth's Orientation Parameters Using a Double Wavelet Transform

S. L. Pasynok

FSUE «VNIIFTRI», Mendeleevo, Moscow reg., Russia

Abstract

When studying variations in the parameters of the Earth's rotation, it is necessary to correctly exclude a slow trend from the measurement results. As a rule, this is done by applying the appropriate filter or direct wavelet transform. However, the result of such an operation depends on the shape of the filter or the basis functions used (in the case of a wavelet) and is not unambiguous.

This article discusses the results of testing one of the methods for excluding a trend – the double wavelet transform method, which allows you to exclude a slow trend (consisting of both the secular and long-period parts) from the measurement results without significant distortion of the shape of the high-frequency part of the original signal. This method was applied to exclude the slow trend from the observed values of the Earth's orientation parameters (coordinates of the terrestrial polar motion and variation of the Earth's angular velocity) and to further refine the coefficients of the averaged models of seasonal variations in the angular velocity of the Earth's rotation, universal time and terrestrial polar motion. The Earth's orientation parameters data of International Earth Rotation Service and Reference Systems were used for analysis as measurement data. After the trend was eliminated, the residuals were analyzed using the least squares method, as a result of which the coefficients of the averaged models of the seasonal components of these variations were refined.

The quality of the constructed models was evaluated by residual residuals using the fast Fourier transform method. The results showed the effectiveness of the method and the high quality of models with refined coefficients.

Keywords: UT1, polar motion, wavelet, trend.

Contacts: Sergey L. Pasynok (pasynok@vniiftri.ru).

For citation: Pasyuk S. L. Testing a method for excluding a slowly trend from measurements of the Earth's orientation parameters using a double wavelet transform // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 66. P. 29–36. <https://doi.org/10.32876/AplAstron.66.29-36>

Введение

Поскольку вариации угловой скорости вращения Земли и движение земного полюса включают в свой состав большие по амплитуде гармонические и квазигармонические составляющие, то задача выделения тренда, снятие которого позволило бы построить или уточнить модели гармонических составляющих и изучать поведение квазигармонических составляющих не является такой тривиальной, как может показаться на первый взгляд.

Одним из первых подходов для решения этой задачи было применение преобразования Фурье в скользящем окне (Windowed Fourier Transform, WFT). Однако оказалось, что этот подход обладает недостаточно высокими точностными характеристиками. Причиной этого является то, что часть высокочастотных и среднечастотных составляющих не попадает в состав частот скользящего окна (Torrence, Compo, 1998). Другое традиционное решение этой задачи основано на применении низкочастотного фильтра (Vondrak, Cepek, 2000). В последнее время для этой цели все чаще используют вейвлет-анализ (Torrence, Compo, 1998; Vondrak, Cepek, 2000; Курбасова, Рыхлова, 2021). Однако, поскольку результат такой операции зависит от формы фильтра или применяемых базисных функций (в случае вейвлета), то он не является однозначным.

В настоящей статье рассматриваются результаты использования для этой цели метода двойного вейвлет-преобразования. Он основан на том факте, что последовательное прямое и обратное вейвлет-преобразования сигнала (построение вейвлет-образа и последующее восстановление) с определенными параметрами, рекомендованными в (Matlab users guide, 2016), восстанавливают только часть сигнала, не содержащую медленного тренда и сдвинутую на некоторую постоянную относительно нуля. Постоянный сдвиг может быть определен усреднением полученных смещенных данных и удален. Вычитая результат из исходных данных и проводя усреднение с помощью скользящего среднего, чтобы сгладить незначительные остаточные вариации (на уровне погрешностей измерений), получим трендовую составляющую. Вычитая теперь трендовую составляющую из исходного сигнала, получим высокочастотную часть.

Для проведения вычислений был выбран один из самых популярных вейвлетов — аналитический вейвлет Морле (Курбасова, Рыхлова, 2021) (его еще часто называют вейвлетом Габора), описываемый следующей формулой в частотной области:

$$\hat{\Psi}(s\omega) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp\left\{-\frac{(s\omega-\omega_0)^2}{2}\right\} \theta(s\omega), \quad (1)$$

где: $\theta(s\omega)$ — ступенчатая функция Хэвисайда. Этот вейвлет обладает тем свойством, что для него существует обратное вейвлет-преобразование. В результате применения последовательных прямого и обратного вейвлет-преобразований с применением алгоритма быстрого Фурье-преобразования восстанавливается сигнал без тренда, но смещенный на некоторую постоянную величину. Определяя эту величину усреднением данных восстановленного сигнала и вычитая ее из них, получим сигнал без тренда. Поскольку производятся последовательное прямое и обратное вейвлет-преобразования, то влияние формы вейвлета сказывается только в освобождении сигнала от медленного тренда (с точностью до постоянной).

1. Данные измерений

Поскольку роль принятых опорных данных играют окончательные данные Международной службы вращения Земли и опорных систем (МСВЗ), то именно они должны использоваться для высокоточных апостериорных определений. Для периода с 1962 по 2022 гг. включительно были использованы данные серии EOP 14 C04 МСВЗ (EOP 14 C04 IERS), полученные по результатам измерений методами космической геодезии:

- радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами — РСДБ (VLBI);
- лазерной дальнометрии спутников и Луны — СЛД (SLR) и ЛЛД (LLR);
- методом приема сигналов космических навигационных систем ГНСС (GNSS);
- доплеровской системы спутниковой орбитографии (DORIS). Для данных до 1962 г. использовался ряд EOPC01 МСВЗ, полученный по данным наземных астрооптических измерений. Его общая с рядом EOPC04 часть использовалась для устранения систематических отклонений данных наземных астрооптических измерений от высокоточных данных космической геодезии. Для обеспечения равномерного разрешения данные астрооптических измерений были интерполированы на необходимые моменты времени.

Таким образом подготовленные данные использовались для последующих вычислений.

2. Снятие тренда

Для уточнения модели усредненных вариаций угловой скорости вращения Земли из данных UT1 – UTC серии EOP 14 C04 был удален вклад в вариации UT1 – UTC от зональных приливов

в твердом теле Земли по рекомендованной МСВЗ модели (Table 8.1, [IERS Conventions, 2010](#)). Поскольку серия EOP 14 C04 свободна от внутрисуточных приливных вариаций, то последние в этих расчетах никак не учитывались. Далее, к значениям UT1 – UTC были добавлены значения UTC – TAI и произведено численное дифференцирование. После этого результат был поделен на $\Omega_0 = 7.2921151467064 \cdot 10^{-5}$ рад/с — номинальное значение угловой скорости вращения Земли, установленное МСВЗ (IERS). В результате был получен ряд значений безразмерных вариаций угловой скорости вращения Земли (они практически равны безразмерным вариациям длительности суток (LOD) со знаком «минус»).

После этого были произведены прямое и обратное вейвлет-преобразование и с помощью метода наименьших квадратов (МНК) определено и удалено среднее смещение полученного в результате ряда. На рис. 1 красным цветом изображены безразмерные вариации угловой скорости вращения Земли, полученные в результате вычитания из преобразованных вышеописанным образом значений серии EOPC04 (с исключенными зональными приливами). Синим цветом изображен результат исключения тренда из этих данных по вышеописанному алгоритму.

На рис. 2 показан результат Фурье-преобразования полученного сигнала. Видно, что максимальной амплитудой обладают составляющие на периодах сезонных вариаций (0.5 года и 1 год). На спектре не отмечена амплитуда на периоде четверть года так как ее величина настолько мала, что её включение в модель усредненных сезонных вариаций нецелесообразно.

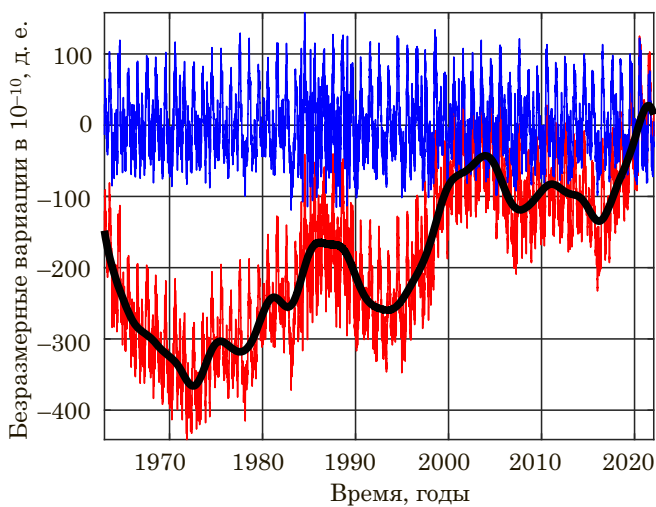


Рис. 1. Безразмерная вариация угловой скорости вращения Земли со снятой моделью зональных приливов (красный цвет) и результат разложения ее на тренд (черная кривая) и высокочастотную составляющую (синяя кривая)

Другой период, на который следует обратить внимание, — 0.03739 лет (13.65 суток), амплитуда которого приведена для оценки масштаба Фурье-спектра тех же данных после вычитания уточненной в настоящей статье модели сезонных вариаций, который будет приведен ниже, для оценки качества уточненной модели.

Для уточнения сезонной модели вариаций координат земного полюса использовался синтетический ряд, подготовленный по алгоритму, описанному в первом разделе настоящей статьи. На рис. 3 изображены красным цветом значения координат земного полюса до исключения тренда, а синим — после исключения тренда по вышеописанному алгоритму.

На рис. 4 изображен спектр мощности преобразования Фурье от координат земного полюса x и y после удаления тренда, по которому следует сделать одно важное замечание. На Фурье-спектре участок спектра вблизи частоты Чандлерового движения полюса (далее — ЧДП), вблизи периода 1.2 года, расщепляется на несколько линий. Происходит это из-за того, что на самом деле ЧДП изменяет свою амплитуду в больших пределах и иногда фазу на протяжении длинного ряда измерений. Изменение амплитуды иллюстрирует изображенная на рис. 5 скалограмма, построенная по значениям координаты y земного полюса, из которой удалены тренд и модель усредненной сезонной составляющей с уточненными в этой работе коэффициентами.

Поэтому хотелось бы еще раз подчеркнуть, что расщепления по частоте (во всяком случае, на уровне, показанном на рис. 4) у ЧДП нет. Поскольку в данной работе исследуются сезонные

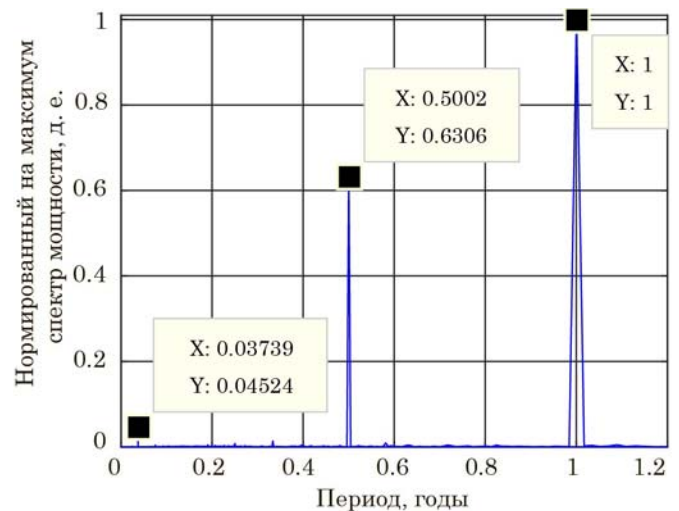


Рис. 2. Нормированный на максимум спектр мощности преобразования Фурье высокочастотной составляющей безразмерной вариации угловой скорости вращения Земли со снятой моделью зональных приливов

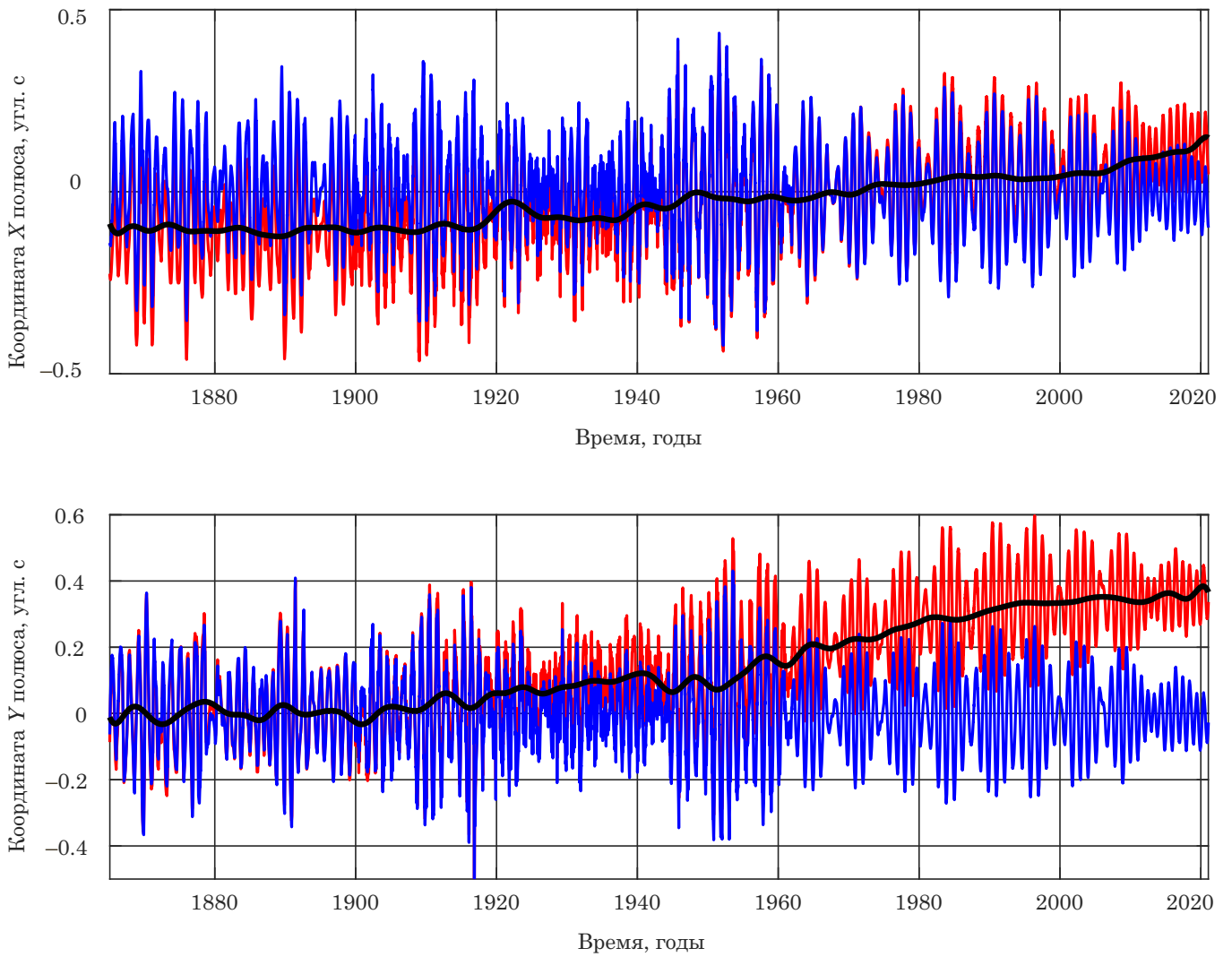


Рис. 3. Значения координат земного полюса x (а) и y (б) изображены красным цветом до исключения тренда, а синим цветом — после исключения тренда. Черной толстой линией изображен тренд

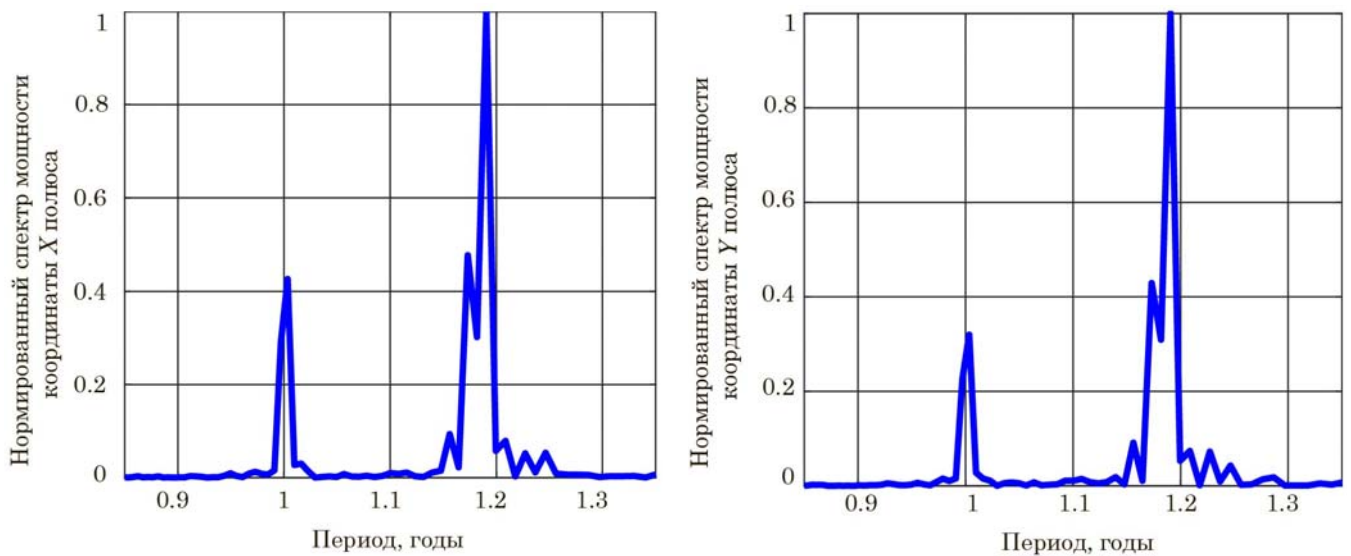


Рис. 4. Участки нормированных спектров мощности данных координат земного полюса, полученных после удаления тренда из данных МСВЗ

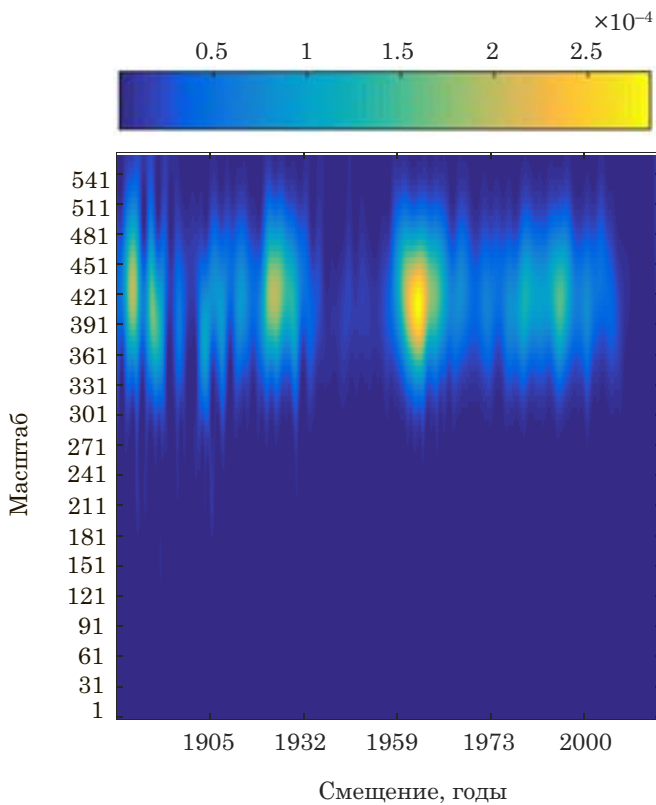


Рис. 5. Скалограмма вейвлет-преобразования значений координаты у земного полюса, из которой удалены тренд и модель усредненной сезонной составляющей

вариации, а не ЧДП, то это не влияет на результаты настоящей работы. Но все же решено было привести и эту часть спектра как пример последствий применения Фурье-преобразования к нестационарным сигналам, для анализа которых оно не подходит, в отличие от сезонных вариаций.

3. Уточнение коэффициентов моделей сезонных вариаций ПВЗ

Данные, обработанные в соответствии с п. 2, использовались для уточнения коэффициентов усредненных моделей сезонных вариаций угловой скорости вращения Земли (коэффициенты годовой и полугодовой волны) и координат полюса (коэффициенты годовой волны).

Модель сезонных вариаций угловой скорости вращения Земли и UT1–UTC строилась двумя способами.

Первый способ (усреднение + МНК): усреднение в скользящем годовом окне, затем определение коэффициентов амплитуд при синусах и косинусах методом наименьших квадратов (рис. 6).

Второй способ (МНК + усреднение): МНК определение коэффициентов амплитуд при синусах и косинусах для каждого годового интервала и последующее их усреднение.

В таблице приведены результаты определения коэффициентов для безразмерной угловой скорости вращения Земли обоими из этих способов в 10^{-10} , а также коэффициенты модели МСВЗ.

Погрешность (СКО) средних значений составляет около $0.01 \cdot 10^{-10}$. Временная переменная модели выражена в Юлианских годах, прошедших с полночи 2000 г.:

$$t = \frac{MJD - 51544.0}{365.2422} \quad (2)$$

Второй способ (МНК + усреднение) показал более высокие точностные характеристики. Результат вычитания уточненной осредненной модели сезонных вариаций из освобожденных от тренда и зональных приливов измерений показан на рис. 7 зеленой сплошной линией.

Амплитуды рекомендованной модели усредненных сезонных вариаций безразмерной угловой скорости вращения Земли получены из амплитуд рекомендованной модели для значений UT1 – UTC путем ее дифференцирования и деления на Ω_0 .

Амплитуды модели усредненных сезонных вариаций значений UT1 – UTC получены из амплитуд модели усредненных сезонных вариаций безразмерной угловой скорости вращения Земли умножением ее на Ω_0 и последующим интегрированием по времени.

На рис. 8 изображен участок Фурье-спектра данных для безразмерной угловой скорости вращения Земли после исключения модели зональных приливов, тренда и модели сезонных вариаций. Видно, что вычитание усредненной сезонной модели в среднем практически полностью убирает гармоники с периодами 0.5 года и 1 год.

Таблица

Модель	Амплитуда гармоники при множителе в 10^{-10}				СКО после вычитания модели
	$\sin(2\pi t)$	$\cos(2\pi t)$	$\sin(4\pi t)$	$\cos(4\pi t)$	
	годовые		полугодовые		
МСВЗ					
Рекомендованная	-23.82753075	-43.68380638	27.79878588	23.82753075	24.1910
Эта статья					
1. Усреднение + МНК	-22.59069202	-34.02724668	28.72318302	13.58780790	22.3628
2. МНК + усреднение	-21.96943664	-34.14003501	28.72190634	14.30177483	22.3386

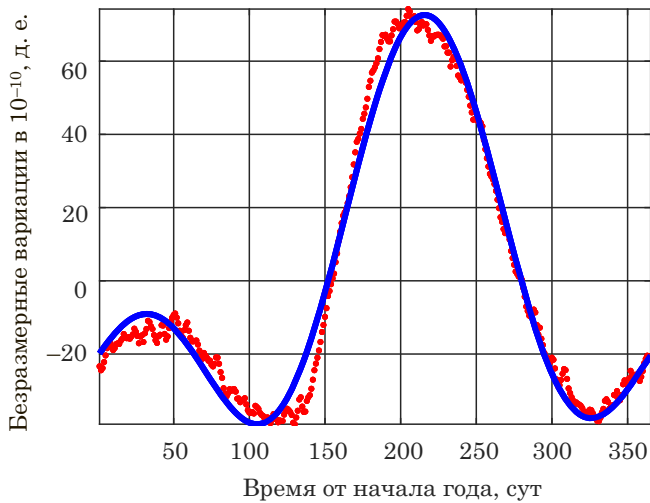


Рис. 6. Усредненные в скользящем годовом окне значения (красные точки) и результат их МНК-аппроксимации сезонной моделью

Для оценки масштаба отмечена гармоника с периодом 0.03739 лет (13.65 сут), чтобы проиллюстрировать, насколько на самом деле малы остающиеся части.

Для координат земного полюса опустим результаты метода Усреднение + МНК и сразу перейдем к методу МНК + усреднение, поскольку он показал лучшие результаты. На рис. 9 красным цветом показаны измеренные значения координат земного полюса, а синим цветом — координаты земного полюса, за вычетом уточненной здесь сезонной модели.

На рис. 10 изображен диапазон периодов вблизи годового, на котором изображен нормированный спектр мощности координат земного полюса за вычетом усредненной сезонной модели и тренда. Видно, что применение сезонной модели, в среднем, практически полностью убирает годовую гармонику.

Заключение

В результате проведенной работы было установлено, что метод двойного вейвлет-преобразования может эффективно применяться для исключения тренда из данных о ПВЗ.

Метод был успешно применен для уточнения коэффициентов усредненных сезонных моделей вариаций угловой скорости вращения Земли и всемирного времени, а также координат земного полюса, и показал хорошее согласие с измерениями как в сравнении с рекомендованной МСВЗ моделью, так и в сравнении с моделями, которые получены рассмотренными здесь двумя различными методами.

Автор пока не проводил общих теоретических исследований преимуществ и недостатков предложенного метода в сравнении с другими метода-

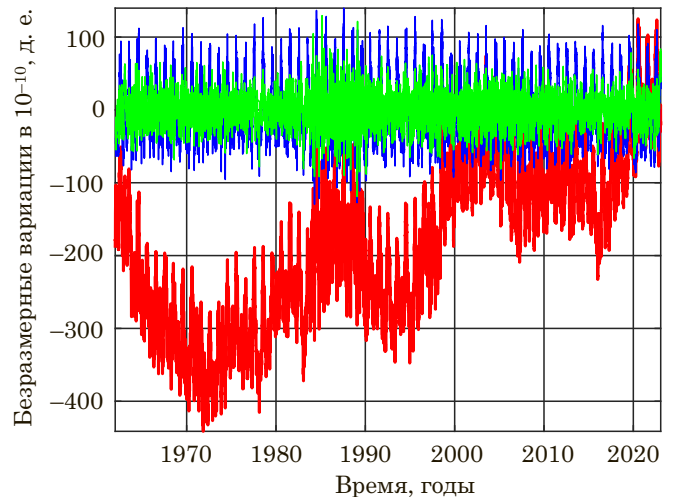


Рис. 7. Результат исключения модели зональных приливов, тренда и уточненной модели сезонных вариаций из данных о вариациях безразмерной угловой скорости вращения Земли серии ЕОРС04 МСВЗ (зеленый цвет). Красным цветом изображены значения вариации безразмерной угловой скорости вращения Земли, освобожденные от зональных приливов; а синим цветом — те же данные, освобожденные от тренда

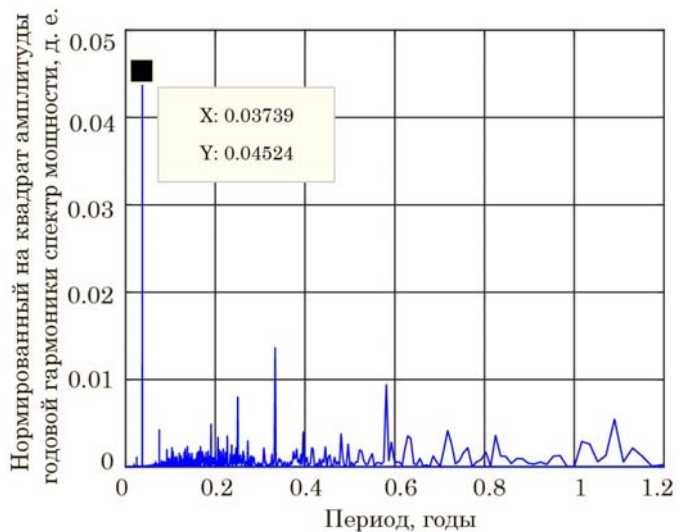


Рис. 8. Спектр мощности, полученный по данным безразмерной вариации угловой скорости вращения Земли после исключения зональных приливов, тренда и уточненной модели сезонных вариаций

ми, а также оптимальности рекомендованных значений параметров вейвлета. Однако построенная с использованием этого метода модель усредненных сезонных вариаций показала, что она согласуется с результатами измерений не хуже, чем рекомендованная МСВЗ модель. Проверка качества модели путем контроля исчезновения на спектре мощности амплитуд, соответствующих исключаемым компонентам, после исключения модели из измерений, также показала, что модель, в среднем, правильно аппроксимирует результаты измерений. Модели с уточненными коэффициентами

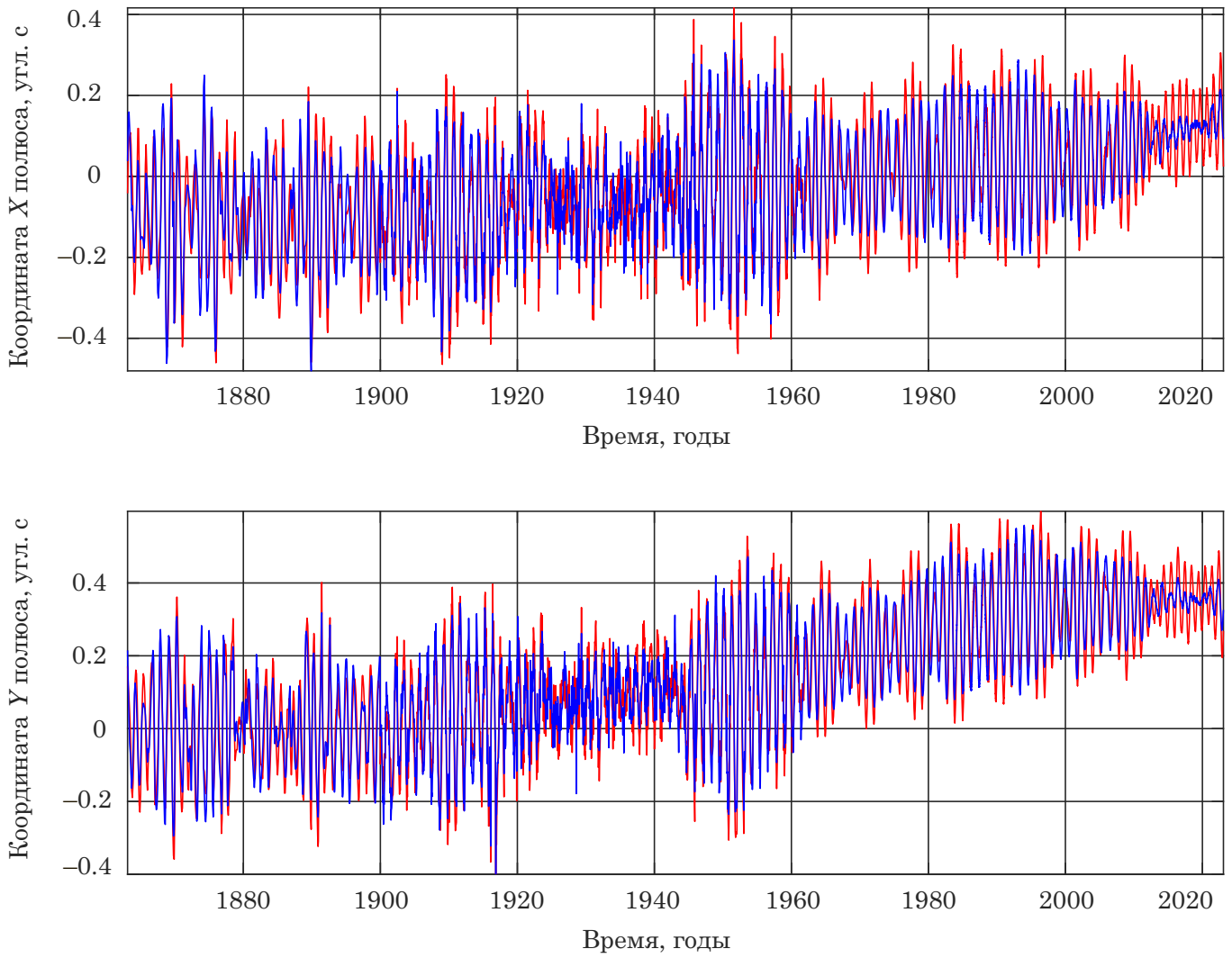


Рис. 9. Координаты земного полюса без вычета (красная кривая) и с вычетом построенной модели сезонных вариаций (синяя кривая)

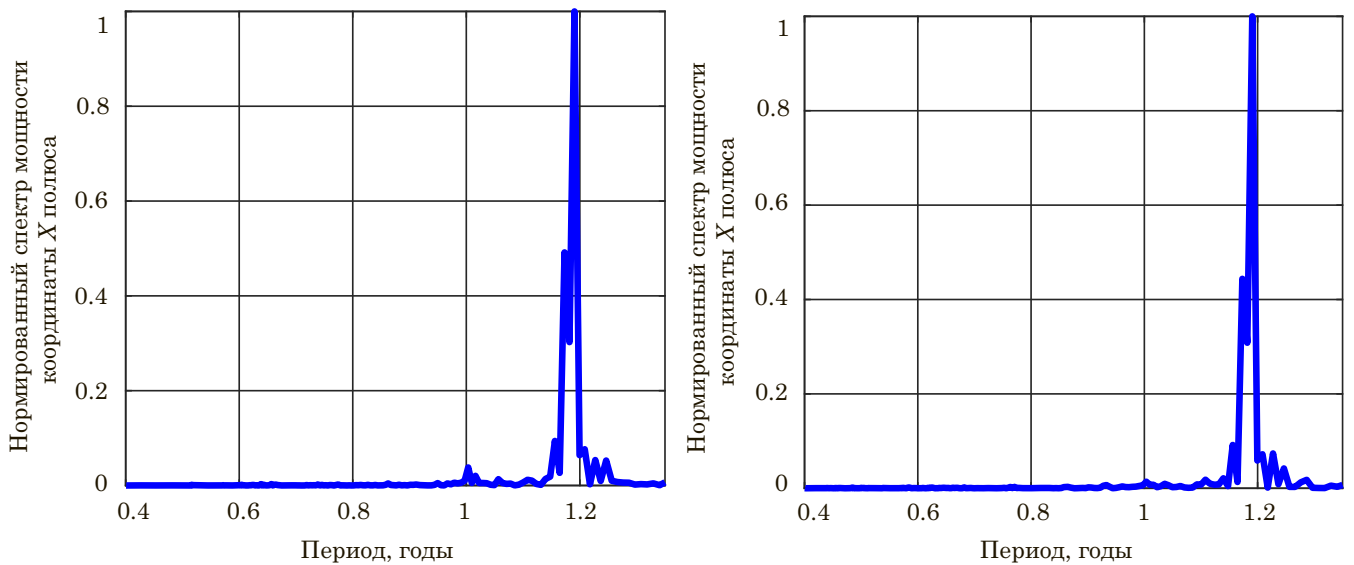


Рис. 10. Нормированный спектр мощности координат земного полюса за вычетом усредненной сезонной модели и тренда

могут эффективно применяться для исключения сезонных вариаций угловой скорости вращения Земли и координат земного полюса. Тем не менее, для анализа координат земного полюса по-прежнему достаточно серьезную проблему представляет корректный учет ЧДП (Зотов, 2019).

Что же касается теоретических исследований преимуществ и недостатков предложенного метода в сравнении с другими методами, а также оптимальности выбранных значений параметров вейвлета, то результаты проведенного апробирования показывают, что их проведение целесообразно.

Литература

Курбасова Г. С., Рыхлова Л. В. Вейвлет-анализ многолетнего смещения полюса Земли // Международный научно-исследовательский журнал. 2021. Т. 111,

№ 9. Часть 1. Сентябрь. С. 128–137. Doi: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.9.111.021>.

Зотов Л. В. Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами // Диссертация на соискание ученой степени доктора ф.-м. наук по специальности 01.03.01 «Астрометрия и небесная механика». 2019. ГАИШ МГУ. Москва.

Torrence C., Compo G. P. A practical guide to wavelet analysis // Bulletin of the American Meteorological Society. 1998. Vol. 79, no. 1. P. 61–78.

Chapter 8. Tidal variations in the Earth's rotation // IERS Conventions (2010) / Ed. by Gerard Petit and Brian Luzum. IERS Technical Note; 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 p.

Vondrak J., Cepek A. Combined smoothing method and its use in combining Earth orientation parameters measured by space techniques // Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 2000. Vol. 147. P. 347–359.

Wavelet Toolbox. Functions. Cwtft // Matlab users guide. 2016. URL: <https://www.mathworks.com/help/wavelet/> (accessed: 26.04.2023).