

## АСТРОНОМИЯ

УДК 521.1; 681.783

MSC 42A61, 62M20

### Тренды и вариации в неравномерностях вращения Земли

*В. М. Тиссен*<sup>1,2</sup>, *З. М. Малкин*<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Западно-Сибирский филиал Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений,  
Российская Федерация, 630004, Новосибирск, пр. Димитрова, 4

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
Российская Федерация, 630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10

<sup>3</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,  
Российская Федерация, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65

<sup>4</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
Российская Федерация, 420008, Казань, ул. Кремлёвская, 18

**Для цитирования:** *Тиссен В. М., Малкин З. М.* Тренды и вариации в неравномерностях вращения Земли // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. 2021. Т. 8 (66). Вып. 1. С. 167–178. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.115>

В статье приведены результаты моделирования разнообразных вариаций Всемирного времени (UT1). Для построения моделей вариаций использовались значения UT1 с 1901 по 2020 г., публикуемые Международной службой вращения Земли и опорных систем координат (МСВЗ — IERS). С помощью разработанной методики из многообразного спектра неравномерностей вращения Земли выделены главные вариации, модели которых представлены в виде суперпозиции ограниченного числа гармонических компонент. Полученные в данной работе результаты важны для повышения точности прогнозов Всемирного времени.

*Ключевые слова:* вращение Земли, Всемирное время, вариации, моделирование, прогнозирование.

**1. Введение.** Изучение закономерностей вращения Земли (ВЗ) всегда было важным для различных фундаментальных и прикладных наук и практических приложений. Знание этих закономерностей актуально для геофизики при построении моделей внутреннего строения Земли и сейсмической активности, для климатологии при изучении сезонных изменений климата и его прогнозировании на длитель-

ные сроки, в задачах эфемеридной астрономии при разработке теоретических основ определения координатных систем и при обработке результатов астрономо-геодезических наблюдений, в космической геодезии при решении задач спутниковой триангуляции, в орбитальных методах при проведении разновременных наблюдений ИСЗ с пространственно-разнесенных пунктов на поверхности Земли [1, 2] и других задач. В настоящее время наибольшая потребность в оперативных данных о параметрах вращения Земли (ПВЗ) и их прогнозе возникает в задачах координатно-временного и эфемеридно-временного обеспечения, а также в беззапросных технологиях использования глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [3]. Растущие требования различных потребителей к точности ПВЗ приводят к необходимости поиска новых методов и путей повышения точности сбора и обработки данных наблюдений, а также совершенствования методов прогнозирования ПВЗ.

В настоящей статье приведены результаты исследований статистических закономерностей в вариациях одного из параметров ВЗ, Всемирного времени (UT1), характеризующего неравномерность вращения Земли. Идея предлагаемого метода состоит в разделении сложного вращения Земли на отдельные вариации, сформированные путем группировки соседних гармонических компонент с установленными границами по частоте. В результате такого подхода появляется возможность использовать сформированные модели вариаций для построения прогностических моделей ВЗ. Это достигается за счет уточнения моделей отдельных вариаций по результатам верификации на интервале обучающей выборки известных данных о Всемирном времени и последующего их объединения в полную модель изменений Всемирного времени.

Можно заметить, что исследования вариаций скорости вращения Земли обычно основаны на анализе данных наблюдений длительности суток (LOD), рассматриваемой в виде разности между наблюдаемой длительностью суток и номинальной, равной 86400 с. Изучение непосредственно вариаций Всемирного времени встречается намного реже (см., например, [4]), хотя такой анализ имеет не меньший научный интерес, чем изучение вариаций LOD, и более актуально для многих практических приложений. В частности, представленные в статье исследования и результаты направлены на уточнение принятых моделей ВЗ и разработку новых моделей с основной целью повышения точности прогнозирования Всемирного времени и координат полюса.

**2. Общие сведения о неравномерности вращении Земли.** Изменения Всемирного времени отражают вариации скорости суточного вращения Земли. Имеющиеся на сегодняшний день данные астрономических определений времени и широты за всю историю наблюдений и современные спутниковые и радиоинтерферометрические данные о координатах полюса и неравномерности вращения Земли показывают, что спектр ВЗ весьма многообразен. В нем присутствуют как регулярные вариации, обусловленные лунно-солнечными приливами в океанах и квази-периодическими климатическими изменениями, так и нерегулярные составляющие, связанные с геофизическими процессами, происходящими внутри Земли и на ее поверхности [5–10].

В частности, много исследований посвящено поиску взаимосвязи между вариациями во вращении Земли и сейсмической активностью, например, [11–13]. При этом исследования ведутся в обоих направлениях, рассматривая один из этих факторов, как первичный, а другой как вторичный. Так, по данным [13] в периоды замедления

скорости вращения Земли наблюдается увеличение на 25 % частоты сильных землетрясений с магнитудой 7 и выше в сравнении с периодами ускорения. Однако в ряде работ приводятся опровержения наличия заметной корреляции между ними на основании того, что при наблюдаемых вариациях скорости вращения Земли, изменения ее формы будут слишком малы, чтобы вызвать серии мощных подземных толчков.

В качестве же основных причин, вызывающих наблюдаемые вариации угловой скорости ВЗ, авторами называются взаимодействие внутренних оболочек Земли, глобальные процессы в атмосфере и океане, вариации геомагнитного поля, а также другие природные факторы. Кроме периодических и квазипериодических вариаций возможны различного типа нерегулярные, в том числе скачкообразные изменения скорости ВЗ. В общей сложности спектр вариаций неравномерностей вращения Земли простирается от высокочастотных гармоник длительностью менее суток, разрешаемых спутниковыми методами мониторинга ПВЗ, до низкочастотных длительностью в несколько десятилетий, вычисляемых по данным многолетних астрономических наблюдений. Низкочастотные вариации нестабильны, их амплитуды и фазы в разной степени переменчивы, что связано с процессами возбуждения и затухания порождающих их факторов.

Наибольшими по амплитуде изменениями обладают вариации с периодами порядка десятков лет (декадные вариации). Они достигают нескольких миллисекунд в длительности суток и сотен миллисекунд во Всемирном времени. К причинам нерегулярных вариаций ряд исследователей обычно приписывают различные механизмы взаимодействия мантии и ядра. В частности, в [14] для объяснения долгопериодических 100-летних вариаций скорости ВЗ предложена механическая модель, учитывающая эффект гравитационного взаимодействия при опережающем вращении ядра Земли относительно мантии.

К наиболее изученным и прогнозируемым вариациям относятся годовые и полугодовые вариации с суммарной амплитудой изменения LOD до 1 мс. Эти вариации возбуждаются процессами взаимодействия атмосферы и гидросферы Земли с ее твердыми оболочками, возникающими вследствие сезонных изменений климата.

Обобщая приведенные сведения о причинах, вызывающих вариации скорости ВЗ, можно прийти к выводу, что эта тема еще недостаточна изучена. Основными причинами такого положения, очевидно, являются невозможность получения данных о многих процессах внутри Земли путем прямых измерений, а также сравнительно небольшие по длительности в историческом масштабе ряды инструментальных наблюдений вращения Земли и относящихся к ВЗ геофизических данных. В частности, астрометрические наблюдения Луны и планет, по которым можно восстановить картину неравномерности ВЗ, доступны с 1656 г. Надо отметить, что до середины XIX века эти наблюдения проводились нерегулярно и их точность была на несколько порядков ниже современной.

На рис. 1 показаны вариации Всемирного времени за период с 1656 по 2020 г. по данным Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (МСВЗ — IERS). Данные до 1985 года взяты из файла `historic_deltat.data`<sup>1</sup>, вычисляемого в Морской обсерватории США (USNO), более поздние данные взяты из ряда EOP(IERS)C01<sup>2</sup>, вычисляемого в Парижской обсерватории.

<sup>1</sup>[ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/products/iers/historic\\_deltat.data](ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/products/iers/historic_deltat.data)

<sup>2</sup><ftp://hpiers.obspm.fr/iers/eop/eopc01/eopc01.1846-now>

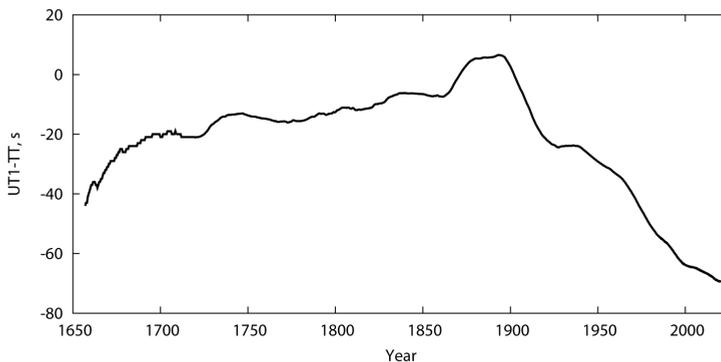


Рис. 1. Изменения Всемирного времени за 360 лет.

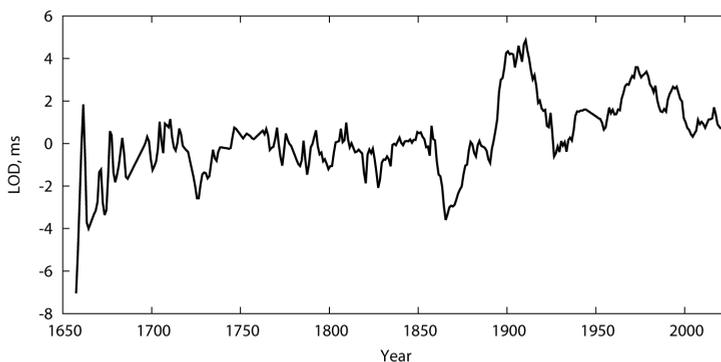


Рис. 2. Изменение длительности суток за 360 лет.

Анализируя поведение графика на рис. 1, можно отметить, что до второй половины XIX века скорость вращения Земли изменялась относительно медленно. Начиная с 1860 г., произошло резкое ускорение вращения Земли, а затем примерно через 15 и 30 лет наблюдались периоды замедления. Резкое ускорение с последующим аналогичным замедлением происходило в 20-х и 30-х годах XX века. После этого относительно равномерно и менее выражено процессы замедления и ускорения сменялись с периодами от 10 до 30 лет (декадные вариации). За последние 120 лет можно выделить не менее шести таких вариаций разной величины и направленности, которые, как и менее продолжительные порядка 2–6 лет, в настоящее время считаются непредсказуемыми. Также с 1903 по 1972 г. прослеживается вариация с периодом 65–70 лет. В XIX веке изменение UT1 примерно с тем же периодом имело место с 1845 по 1903 г. В более раннюю эпоху подобные явления не прослеживаются. Наличие 70-летнего цикла подтверждается периодами замедления и ускорения вращения Земли, наблюдаемыми с 1935 г. В частности, в период с 1935 по 1972 г. вращение Земли проходило фазу замедления. Ускорение, возникшее в 1973 г., закончилось в 2005 г. и перешло в следующую фазу замедления, которая с 2019 г. вновь перешла в фазу ускорения.

Смена фаз замедления и ускорения ВЗ приводила соответственно к уменьшению или увеличению LOD. На рис. 2 приведен график изменения LOD за период с

1656 по 2010 г. По данным рис. 2 можно отметить общую тенденцию к увеличению LOD за рассматриваемый период.

**3. Моделирование глобальных изменений Всемирного времени.** При построении прогностических моделей ПВЗ большинство исследователей используют статистические методы оценки параметров этих моделей, поскольку аналитические решения удастся получить только в приближенном виде, что уже, как отмечалось, связано с недостатком сведений о различных природных процессах, происходящих внутри Земли, ее атмосфере и в окружающем космическом пространстве.

В данной статье рассматривается статистический метод оценки параметров полигармонической модели изменений Всемирного времени, основные положения которого приведены в [15]. Одно из отличий данного метода от общепринятых состоит в том, что в нем для аппроксимации трендовых (глобальных) изменений Всемирного времени используется ограниченная группа долгопериодических гармонических компонент, параметры которых оцениваются методом наименьших квадратов (МНК) на интервале данных около 100 лет, в то время, как в общепринятых методах для этих целей обычно используют полином первого или второго порядка, параметры которого оцениваются на выборке последних известных данных от 1 до 5 лет. Столь малые интервалы обучающей выборки связаны с характерными временами смены направления тренда. С увеличением длины выборки линейной и квадратичной моделей тренда становится недостаточно для выполнения критерия близости, устанавливающего максимально допустимое отклонение значений модельного ряда Всемирного времени от их действительных значений. Для выполнения данного критерия в качестве трендовой модели было предложено использовать суперпозицию из пяти долгопериодических гармонических компонент.

В табл. 1 приведены параметры гармоник, аппроксимирующих глобальные изменения Всемирного времени на интервале с 1900 по 2020 г. Первая из приведенных в таблице гармоника с периодом 1000 лет задает общее направление тренда, а вторая и третья — изменение этого направления. Собственно, эти три гармоники можно интерпретировать как трендовые. Последние две гармоники аппроксимируют наиболее устойчивые долгопериодические вариации. Причем гармоника с периодом 18.6 года является следствием перемещения линии узлов лунной орбиты вдоль эклиптики с тем же периодом. Поэтому соответствие параметров этой гармоники рекомендованной IERS теории океанических приливов [16], является одним из средств контроля адекватности, разрабатываемых эмпирических моделей ВЗ.

*Таблица 1. Компоненты глобальных вариаций Всемирного времени*

Номер	Период, год	Амплитуда, мс
1	1000.0	190000.0
2	70.0	3370.0
3	50.0	480.0
4	18.6	630.0
5	12.0	170.0

Оценка параметров 1000-летней гармоники производится косвенным путем методом последовательных приближений с помощью МНК в два этапа.

1. На интервале данных не менее 100 лет задается 1000-летняя гармоника с приближенными параметрами, которые подбираются исходя из общего направ-

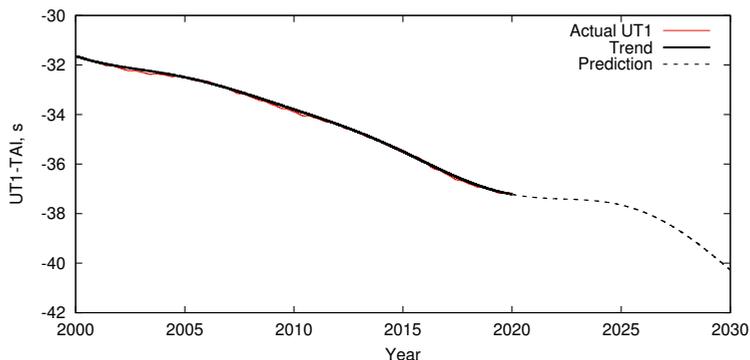


Рис. 3. Глобальные изменения Всемирного времени за последние 20 лет с десятилетним прогнозом.

ления тренда в настоящее время. Далее производится расчет параметров дополнительных гармоник до максимально возможного приближения модельных значений UT1 к их действительным значениям. Это достигается за счет варьирования фазы и амплитуды 1000-летней гармоник при соблюдении двух условий:

- (а) в полученном ряде дополнительных гармоник должна присутствовать гармоника с периодом от 65 до 75 лет, амплитуда которой должна находиться в пределах от 2.5 до 3.5 с;
- (б) сумма амплитуд полученного ряда дополнительных гармоник должна быть минимальна при максимальном приближении модельного ряда UT1 к исходному ряду.

2. На втором этапе методом одновременного варьирования производится уточнение параметров 1000- и 70-летней гармоник до локализации в вычисляемом по МНК ряде дополнительных гармоник, гармоник с периодом 18.6 года и амплитудой порядка 0.55–0.60 с.

Далее из вновь образованного ряда гармоник выбираются две наиболее значимые долгопериодические компоненты, которые вместе с тремя уже выделенными компонентами с периодами 1000, 70 и 18.6 лет и формируют глобальные изменения тренда ряда UT1.

На рис. 3 широкой линией показаны глобальные (трендовые) изменения Всемирного времени в 2000–2020 гг. с прогнозом (пунктиром) до 2030 г. на фоне действительных значений UT1 (тонкая линия). Рассматривая приведенный график, следует отметить, что за последние 20 лет изменения Всемирного времени происходят по волнообразной кривой с периодами замедления и ускорения порядка 8–10 лет. Общая выпуклость графика указывает на то, что скорость вращения Земли с некоторыми вариациями испытывает постепенное замедление. В настоящее время Земля вращается с ускорением, которое согласно прогнозу после 2025 г. перейдет в фазу замедления.

Остаточные отклонения действительных данных от линии глобальных изменений (рис. 3) характеризуют квазипериодические декадные вариации Всемирного

времени. Они показаны на рис. 4, *a* после исключения годовой компоненты. Анализируя поведение приведенного графика можно отметить, что за рассматриваемый 20-летний интервал наблюдений изменение Всемирного времени имело признаки регулярности с характерным периодом около 10 лет. Эти вариации также могут быть аппроксимированы ограниченной группой гармоник. В зависимости от степени приближения модели к действительным изменениям Всемирного времени такая группа может насчитывать до 40–50 составляющих с периодами от 1 года до 10 лет. В табл. 2 приведен список наиболее значимых из этих гармоник, параметры которых найдены с применением МНК на интервале обучающей выборки с 1962 по 2019 г.

Таблица 2. Компоненты вариаций Всемирного времени с периодами от 1 до 10 лет

Номер	Период, год	Амплитуда, мс
1	10.60	4.0
2	8.60	57.0
3	6.80	16.0
4	5.70	7.0
<b>5</b>	<b>4.90</b>	<b>17.5</b>
6	4.40	7.5
<b>7</b>	<b>3.70</b>	<b>10.0</b>
8	3.13	6.5
9	2.86	6.5
10	2.55	5.2
<b>11</b>	<b>2.36</b>	<b>12.0</b>
12	2.15	4.0
13	2.00	4.0
14	1.84	4.0
15	1.70	2.3
16	1.60	1.8
17	1.50	3.1
18	1.46	1.8
19	1.40	2.5
20	1.14	1.7
21	1.80	2.0
22	1.50	1.0
23	1.00	20.0
24	0.96	0.9

Жирным шрифтом в табл. 2 выделены гармонические компоненты с периодом, кратным чандлеровскому периоду 1.19 года. Обращает на себя внимание, что эти компоненты имеют наибольшую амплитуду среди других близких к ним по частоте. Это факт указывает на значимую корреляцию между вариациями скорости вращения Земли и движением полюса. По мнению ряда авторов наиболее вероятным природным фактором, обуславливающим данный эффект, является взаимодействие атмосферы, океана и литосферы [17]. В работах [8, 18] получены результаты, указывающие на связь между изменениями LOD и амплитудой чандлеровского движения полюса, которые также хорошо согласуются с колебаниями уровня океана. К другим вероятным причинам корреляции в движении полюса и скорости вращения Земли ряд авторов относят изменения параметров геомагнитного поля, возникающие при перемещениях полюса, перемещения узлов и точки перигея лунной орбиты, сейсмическую активность и другие природные явления, которые за миллиарды лет эволюции Солнечной системы могли синхронизироваться между собой [17, 19].

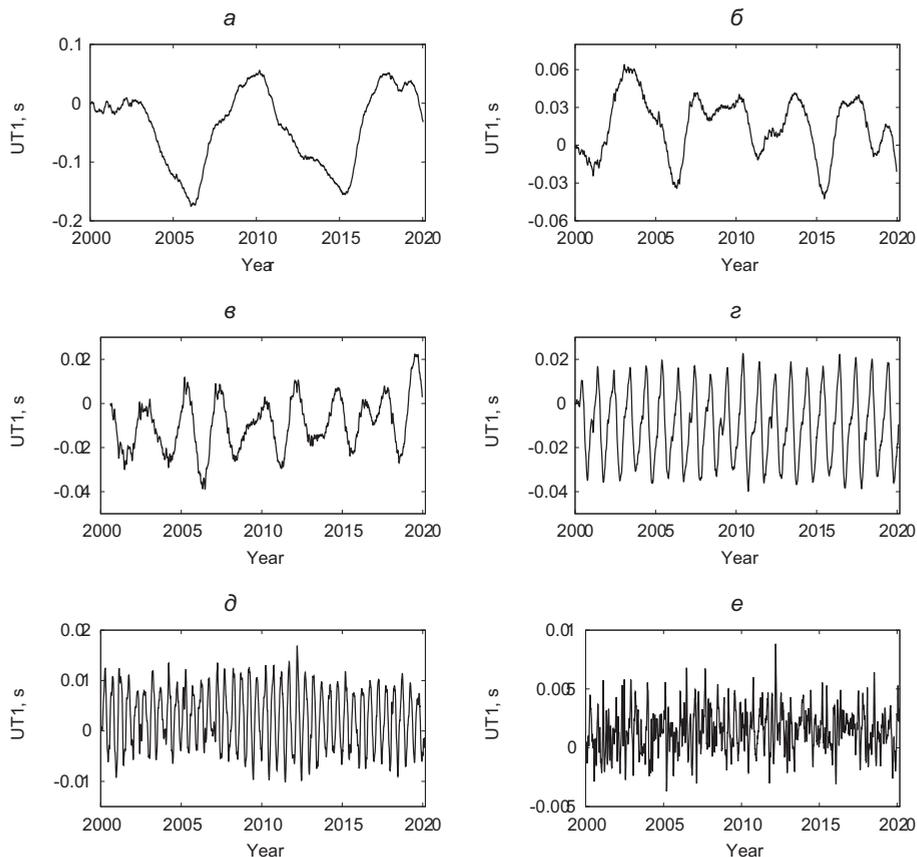


Рис. 4. Вариации Всемирного времени в разных полосах спектра: *a* — декадные, *б* — пятилетние, *в* — с периодом 2–2.5 года, *г* — годовые, *д* — полугодовые, *е* — высокочастотные.

Цикличность в неравномерностях ВЗ сохраняется и на более высоких частотах, чем декадные вариации. На рис. 4, *б* и 4, *в* показаны вариации, построенные в границах гармоник с периодами от 1.1 года до 5 лет и до 2.4 года (см. табл. 2). Сопоставляя характер квазипериодических вариаций, приведенных на рис. 4, *б* и 4, *в*, можно отметить их сходство, что, возможно, указывает на общую причину их порождающую. Другими словами, данные вариации могут являться следствием одного процесса, порождающего широкий спектр близких по амплитуде гармоник. Компоненты с периодами 2.36, 3.65, 4.9 и 5.9 года, близкие к найденным в настоящей работе, были выделены также в [20].

#### 4. Периодические и высокочастотные вариации Всемирного времени.

К периодическим вариациям относятся в первую очередь годовые колебания, связанные с сезонными атмосферными процессами. Для аппроксимации модели годовых вариаций использована группа из приблизительно 30 гармонических компонент с периодами от 0.5 до 1.1 года. На интервале обучающей выборки порядка 40 последних лет получена модель годовых вариаций, показанная на рис. 4, *г*. Анализируя график годовых вариаций, можно отметить их значительно более выраженную пе-

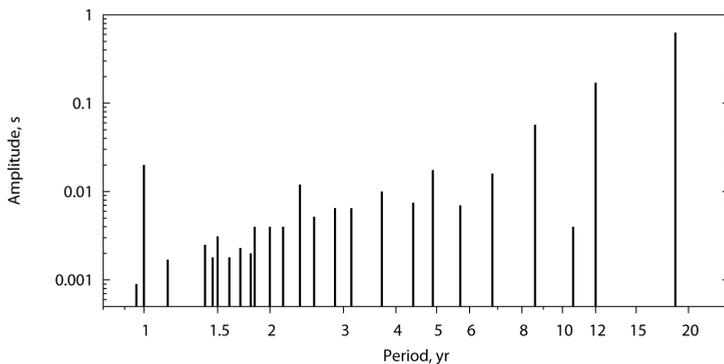


Рис. 5. Вариации Всемирного времени с периодами от 1 до 20 лет.

риодичность в сравнении с вариациями на более низких частотах. При этом, на левых сторонах пиков колебаний, приходящихся на весенне-летние периоды, заметны различные по величине локальные пики, что связано с резкими полугодовыми изменениями скорости ВЗ.

На рис. 4, *д* приведен график полугодовых вариаций, полученных путем выравнивания действительных изменений Всемирного времени гармонической моделью, включающей порядка 50 компонент с периодами от 1000 лет до полугода. При этом остаточный после выравнивания ряд гармоник с периодами от 0.526 до 0.1 года аппроксимирует полугодовые вариации. Из приведенной на рисунке картины полугодовых колебаний видно, что их амплитуда подвержена модуляции с периодом порядка 6–8 лет, что может быть связано с аналогичными циклами в движении полюса, в котором присутствуют биения между годовой и чандлеровской компонентами с периодом около 6 лет.

В области периодов менее 0.5 года регулярность вариаций Всемирного времени заметно нарушается. Это наглядно показано на рис. 4, *е*.

Из сравнения приведенных графиков вариаций Всемирного времени видно, что с увеличением частоты спектр неравномерностей вращения Земли все больше становится похожим на белый шум. Однако такой эффект может быть связан с большим числом высокочастотных компонент, разделить которые статистическими методами практически невозможно.

На рис. 5 приведена зависимость амплитуды вариаций Всемирного времени от их периода. Характер этой зависимости наглядно показывает общую тенденцию к одновременному возрастанию амплитуды и периода данных вариаций.

**5. Заключение.** На основании проведенных в настоящей работе исследований была получена новая модель вариаций Всемирного времени, построенная с учетом последних данных IERS. Представленная в данной статье модель включает в себя в качестве основных компонент уточненную модель сезонных изменений Всемирного времени и уточненную модель глобальных и квазипериодических изменений Всемирного времени. В частности, в неравномерностях вращения Земли были выявлены квазипериодические вариации, кратные основному чандлеровскому периоду 1.2 года. Выделены также вариации, близкие по периоду к 11-летнему циклу солнечной активности.

Разделение сложного вращения Земли на более простые компоненты дает дополнительные возможности в прогнозировании Всемирного времени путем простого суммирования результатов прогнозов отдельных вариаций. Такой подход к построению моделей прогноза ПВЗ и, в частности Всемирного времени, предложен впервые. Получаемые при этом результаты прогнозирования показывают высокую точность и хорошую устойчивость этого метода при прогнозе Всемирного времени и движения полюса [15, 21]. Это имеет важное значение для задач эфемеридно-временного обеспечения ГНСС. Приведенные модели глобальных и квазипериодических изменений Всемирного времени могут также представлять интерес для изучения различных природных явлений, связанных с динамикой вращения Земли.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания, учет которых позволил улучшить первоначальный вариант статьи.

## Литература

1. Филатов В. Н. Геодезическое и картографическое обеспечение как составная часть фундаментального и прикладного координатно-временного обеспечения страны, современное состояние и перспективы развития. *Труды ИПА РАН*, вып. 13, 43–50 (2005).
2. Акуленко Л. Д., Марков Ю. Г., Перепелкин В. В. Неравномерности вращения Земли. *ДАН* **417** (4), 483–488 (2007).
3. Дворкин В. В., Каругин С. Н., Глухов П. Б. Анализ состояния и перспектив развития технологии высокоточного местоопределения по сигналам ГНСС. *Радиотехника*, (3), 4–13 (2011).
4. Chapanov Y., Vondrák J., Ron C. Decadal Oscillations of The Earth Rotation. *AIP Conference Proceedings* **1043**, 197–200 (2008).
5. Lambeck K. *The Earth's Variable Rotation: geophysical causes and consequences*. Cambridge University Press (1980).
6. Сидоренков Н. С. *Физика неустойчивостей вращения Земли*. Москва, Наука, Физматлит (2002).
7. Gross R. S., Fukumori I., Menemenlis D. Atmospheric and oceanic excitation of decadal-scale Earth orientation variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **110** (B9), B09405 (2005).
8. Горшков В. Л. Исследование межгодовых вариаций скорости вращения Земли. *Астрон. вестник* **44** (6), 519–529 (2010).
9. Tolstikov A. S., Tissen V. M., Simonova G. V. Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering* **11208**, 1120887-1–1120887-5 (2019).
10. Duan P., Huang C. Intradecadal variations in length of day and their correspondence with geomagnetic jerks. *Nature Communications* **11**, 2273 (2020).
11. Chao B. F., Gross R. S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes. *Geophysical Journal International* **91** (3), 569–596 (1987).
12. Левин Б. В., Сасорова Е. В. О связи вариаций скорости вращения Земли и ее сейсмической активности. *ДАН* **464** (3), 351–355 (2015).
13. Bilham R., Bendick R. A five year forecast for increased global seismic hazard. *Geological Society of America. Abstracts with Programs* **49** (6) (2017). <https://doi.org/10.1130/abs/2017AM-300667>
14. Денисов Г. Г., Новиков В. В., Федоров А. Е. Автоколебания в системе мантия-твердое ядро Земли и вековые вариации длительности суток. *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*, (4), 117–119 (2011).
15. Тиссен В. М., Толстикова А. С., Балахненко А. Ю., Малкин З. М. Высокоточное прогнозирование всемирного времени по 100-летним данным. *Измерительная техника*, (12), 3–6 (2009).
16. Petit G., Luzum B. (eds.) *IERS Conventions (2010)*. In: IERS Technical Note, (36). Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (2010).
17. Сидоренков Н. С. Влияние Южного колебания Эль-Ниньо на возбуждение чандлеровского движения полюса. *Астрон. журн.* **74** (5), 792–795 (1997).
18. Zotov L., Bizouard C., Shum C. K. A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale. *Geodesy and Geodynamics* **7** (3), 216–222 (2016).

19. Zotov L., Sidorenkov N.S., Bizouard C., Shum C.K., Shen W.B. Multichannel singular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum. *Geodesy and Geodynamics* **8** (6), 433–442 (2017).

20. Chen J., Wilson C.R., Kuang W., Chao B.F. Interannual oscillations in Earth rotation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **124**, 13404–13414 (2019). <https://doi.org/10.1029/2019JB018541>

21. Тиссен В.М. Сравнение методов прогнозирования ПВЗ по результатам соревновательного проекта МСВЗ. *Интерэкспо Гео-Сибирь* **5** (3), 3–7 (2015).

Статья поступила в редакцию 18 апреля 2020 г.;  
после доработки 2 июня 2020 г.;  
рекомендована в печать 17 сентября 2020 г.

Контактная информация:

Тиссен Виктор Мартынович — канд. техн. наук, доц.; [tissen.ksn@yandex.ru](mailto:tissen.ksn@yandex.ru)

Малкин Зиновий Меерович — д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; [malkin@gaoran.ru](mailto:malkin@gaoran.ru)

## Trends and variations in the irregularities of the Earth's rotation

V. M. Tissen<sup>1,2</sup>, Z. M. Malkin<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> West Siberian branch of Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, 4, ul. Dimitrova, Novosibirsk, 630004, Russian Federation

<sup>2</sup> Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, ul. Plakhotnogo, Novosibirsk, 630108, Russian Federation

<sup>3</sup> The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo, 65, Pulkovskoye shosse, St. Petersburg, 196140, Russian Federation

<sup>4</sup> Kazan Federal University, 18, ul. Kremlyovskaya, Kazan, 420008, Russian Federation

**For citation:** Tissen V. M., Malkin Z. M. Trends and variations in the irregularities of the Earth's rotation. *Vestnik of Saint Petersburg University. Mathematics. Mechanics. Astronomy*, 2021, vol. 8 (66), issue 1, pp. 167–178. <https://doi.org/10.21638/spbu01.2021.115> (In Russian)

The paper presents results of modeling various variations of the Universal Time (UT1). To develop a variation models, UT1 observations from 1901 to 2020 published by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) were used. Using the developed method, the main variations are identified from the diverse spectrum of irregularities in the Earth's rotation, the models of which are presented as a superposition of a limited number of harmonic components. The results obtained in this paper are important for improving the accuracy of predictions of Universal Time.

*Keywords:* Earth's rotation, Universal Time, variations, modeling, prediction.

## References

1. Filatov V. N. Geodetic and cartographic service as a part of the fundamental and applied time and coordinate service of the country, the current state and prospects of development. *Trans. IAA RAS*, iss. 13, 43–50 (2005). (In Russian)

2. Akulenko L. D., Markov Y. G., Perepelkin V. V. Nonuniformities of the Earth's rotation. *Doklady Akademii Nauk* **417** (4), 483–488 (2007). (In Russian) [Engl. transl.: *Doklady Physics* **52**, iss. 12, 681–686 (2007)]. <https://doi.org/10.1134/S1028335807120105>.

3. Dvorkin V. V., Karutin S. N., Glukhov P. B. Analysis of current status and perspectives of GNSS precise positioning technology development. *Radiotekhnika*, iss. 3, 4–13 (2011). (In Russian)

4. Chapanov Y., Vondrák J., Ron C. Decadal Oscillations of The Earth Rotation. *AIP Conference Proceedings* **1043**, 197–200 (2008).

5. Lambeck K. *The Earth's Variable Rotation: geophysical causes and consequences*. Cambridge University Press (1980).

6. Sidorenkov N.S. *Physics of the Earth's rotation instabilities*. Moscow, Nauka Publ., Fizmatlit Publ. (2002).
7. Gross R.S., Fukumori I., Menemenlis D. Atmospheric and oceanic excitation of decadal-scale Earth orientation variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **110** (B9), B09405 (2005).
8. Gorshkov V.L. Study of the interannual variations of the Earth's rotation. *Astronomicheskii vestnik* **44** (6), 519–529 (2010). (In Russian) [Engl. transl.: *Solar System Research* **44**, iss. 6, 487–497 (2010). <https://doi.org/10.1134/S003809461006002X>].
9. Tolstikov A.S., Tissen V.M., Simonova G.V. Long-term climate prediction by means of Earth rotation rate adaptive variations models. *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering* **11208**, 1120887-1–1120887-5 (2019).
10. Duan P., Huang C. Intradecadal variations in length of day and their correspondence with geomagnetic jerks. *Nature Communications* **11**, 2273 (2020).
11. Chao B.F., Gross R.S. Changes in the Earth's rotation and low-degree gravitational field induced by earthquakes. *Geophysical Journal International* **91** (3), 569–596 (1987).
12. Levin B.V., Sasorova E.V. Relationship between variations in the rotation velocity of the Earth and its seismic activity. *Doklady Akademii nauk* **464** (3), 351–355 (2015). (In Russian) [Engl. transl.: *Doklady Earth Sciences* **464**, iss. 1, 987–991 (2015). <https://doi.org/10.1134/S1028334X15090196>].
13. Bilham R., Bendick R. A five year forecast for increased global seismic hazard. *Geological Society of America. Abstracts with Programs* **49** (6) (2017). <https://doi.org/10.1130/abs/2017AM-300667>
14. Denisov G.G., Novikov V.V., Fedorov A.E. Self-oscillations in system the mantle — Earth's solid core and century-long variations in the length of the day. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, iss. 4, 117–119 (2011). (In Russian)
15. Tissen V.M., Tolstikov A.S., Balakhnenko A.Yu., Malkin Z. High precision prediction of Universal Time based on 100-year data. *Izmeritel'naya tekhnika*, (12), 3–6 (2009). (In Russian) [Engl. transl.: *Measurement techniques* **52**, iss. 12, 1249–1255 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11018-010-9429-6>].
16. Petit G., Luzum B. (eds.) *IERS Conventions (2010)*. In: IERS Technical Note, (36). Frankfurt am Main, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (2010).
17. Sidorenkov N.S. The effect of the El Niño Southern Oscillation on the excitation of the Chandler motion of the Earth's pole. *Astronomicheskii zhurnal* **74** (5), 792–795 (1997). (In Russian) [Engl. transl.: *Astronomy Reports* **41**, iss. 5, 705–708 (1997)].
18. Zotov L., Bizouard C., Shum C.K. A possible interrelation between Earth rotation and climatic variability at decadal time-scale. *Geodesy and Geodynamics* **7** (3), 216–222 (2016).
19. Zotov L., Sidorenkov N.S., Bizouard C., Shum C.K., Shen W.B. Multichannel singular spectrum analysis of the axial atmospheric angular momentum. *Geodesy and Geodynamics* **8** (6), 433–442 (2017).
20. Chen J., Wilson C.R., Kuang W., Chao B.F. Interannual oscillations in Earth rotation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **124**, 13404–13414 (2019). <https://doi.org/10.1029/2019JB018541>
21. Tissen V.M. Comparison of EOP forecasting methods based on the IERS EOP forecasting competition campaign. *Interexpo Geo-Siberia* **5**, iss. 3, 3–7 (2015). (In Russian)

Received: April 18, 2020

Revised: June 2, 2020

Accepted: September 17, 2020

#### Authors' information:

Viktor M. Tissen — [tissen.ksn@yandex.ru](mailto:tissen.ksn@yandex.ru)

Zinoviy M. Malkin — [malkin@gaoran.ru](mailto:malkin@gaoran.ru)