



ЭКВАТОРИАЛЬНАЯ МИГРАЦИЯ
МАССЫ И УДЛИНЕНИЕ СУТОК:
СВЯЗЬ КОРИОЛИСА, ДРЕЙФ
КАЛИБРОВКИ И СТАБИЛЬНОСТЬ
WORD CLOCK ВНЕ ШИРОТЫ
0,0000deg



Экваториальная миграция массы и удлинение суток: связь Кориолиса, дрейф калибровки и стабильность Word Clock вне широты 0,0000deg

M. Ferro, S. Magnusson, Y. Tanaka, R. Flux

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2026.

Аннотация

В марте 2026 года Kiani Shahvandi и Soja сообщили в Journal of Geophysical Research: Solid Earth, что продолжительность суток сейчас увеличивается примерно на 1,33 миллисекунды за столетие -- скорость, которую они признали беспрецедентной как минимум за 3,6 миллиона лет. Механизм состоит в перераспределении массы: лёд, утраченный полярными ледниковыми щитами и горными ледниками, поступает в океаны и перемещается к экватору, увеличивая момент инерции планеты и замедляя её вращение. Комитет без торжества отмечает, что планета начала перемещать свою массу к 0,0000deg.

Мы рассматриваем последствия для распределения Word Clock в цифровом аудио. Кварцевый резонатор на вращающейся планете испытывает связь Кориолиса, пропорциональную локальному параметру Кориолиса $2 \Omega \sin(\text{latitude})$. Тактовый генератор, откалиброванный при одной скорости вращения и работающий при другой, отклоняется от условий калибровки на любой широте, кроме экватора, где параметр Кориолиса равен нулю независимо от скорости вращения. Мы сообщаем об измерениях 36 трактов Word Clock между 64deg с. ш. и 43deg ю. ш., обследованных в 2024 и повторно в 2026 году. Остаточная вращательная фаза коррелировала с синусом широты площадки ($r = 0,91$, $p < 0,001$), между обследованиями увеличилась на всех 32 внеэкваториальных площадках и не отличалась от нуля на всех четырёх площадках в Кито. Equinox кабель Word Clock снижал накопление остатка в трёхзвенных трактах на 88 %; Тактовый кабель SC Word Clock снижал его ниже порога измерения 1 fs. Мы предлагаем Смещение вращательного эталона как характеристику тактового генератора первого порядка и рекомендуем ежегодную повторную сертификацию ведущих тактовых генераторов вне экваториального пояса.

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении большей части истории звукозаписи вращение Земли считалось постоянным. Оно не постоянно и никогда таким не было. Приливное трение, создаваемое Луной, удлиняет сутки столько времени, сколько существует сама Луна. Изменились скорость и причина.

В марте 2026 года Kiani Shahvandi и Soja опубликовали реконструкцию изменений продолжительности суток, восходящую к позднему плиоцену. Они пришли к выводу, что нынешнее обусловленное климатом удлинение суток -- примерно на 1,33 миллисекунды за столетие с 2000 года -- не имеет равных как минимум за 3,6 миллиона лет. Как заявил Benedikt Soja из ETH Zurich в сопроводительном сообщении: «Столь быстрое увеличение продолжительности суток означает, что скорость современного изменения климата была беспрецедентной как минимум с позднего плиоцена, 3,6 миллиона лет назад».

Геофизическое сообщество справедливо представило этот результат как вывод о климате. Комитет читает описание механизма с иным акцентом. Сутки удлиняются, потому что масса покидает полюса и прибывает к экватору. Со времени своего основания Equatorial Audio утверждает, что широта 0,0000deg -- единственный оправданный эталон для прецизионного аудио (Ferro, Park, Tanaka, 2020). Мы не ожидали, что планета начнёт перестраиваться в соответствии с этим положением.

Настоящая работа не делает никаких заявлений о вращении Земли. Она задаёт более узкий вопрос: когда скорость вращения каждой комнаты прослушивания на Земле меняется быстрее, чем когда-либо в геологической летописи, что происходит с Word Clock?

2. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ЛЕТОПИСЬ

Физический механизм заключается в сохранении углового момента. Когда лёд тает на высоких широтах, а образующаяся вода распространяется по Мировому океану, масса удаляется от оси вращения. Момент инерции планеты возрастает, а её угловая скорость уменьшается. Фигурист, разводящий руки, вращается медленнее. Планета, перемещающая воду к экватору, поступает так же.

Масштаб устанавливают три массива исследований.

Долгая летопись: Stephenson, Morrison и Hohenkerk (2016) проанализировали древние и средневековые наблюдения затмений и лунных покрытий с 720 года до н. э. по 2015 год н. э. Они установили, что продолжительность средних солнечных суток увеличивалась в среднем на +1,8 ms за столетие, что меньше +2,3 ms за столетие, предсказываемых



одним лишь приливным трением. Луна никогда не была единственным фактором, влиявшим на продолжительность суток.

Современное ускорение: Kiani Shahvandi и соавт. (2024) оценили обусловленный климатом тренд в XX веке в 0,3-1,0 ms за столетие, с ростом до 1,33 +/- 0,03 ms за столетие с 2000 года, и спрогнозировали, что при сценариях высоких выбросов вклад климата может превысить эффект лунного приливного трения.

Глубокая летопись: Kiani Shahvandi и Soja (2026) вывели прошлые изменения уровня моря из химического состава ископаемых бентосных фораминифер и с помощью учитывающей физические закономерности вероятностной диффузионной модели реконструировали изменения продолжительности суток начиная с позднего плиоцена. Современная скорость не имеет равных в этом интервале. Ближайший сопоставимый эпизод произошёл примерно два миллиона лет назад.

Последствия для гражданского отсчёта времени уже носят эксплуатационный характер. Agnew (2024) показал, что ускоренное таяние полярных льдов достаточно замедлило планету, чтобы отложить первую в истории Всемирного координированного времени отрицательную секунду координации примерно до 2029 года. Сообщество служб времени получило отсрочку. Она была оплачена льдом.

3. ВРАЩЕНИЕ И WORD CLOCK

Word Clock -- это кварцевый резонатор, цепь делителей и обещание. Обещание состоит в том, что все устройства системы согласны относительно момента появления отсчёта. Резонатор -- механический объект: точно вырезанный кристалл, вибрирующий на фиксированной частоте, обычно 22,5792 MHz или 24,576 MHz соответственно для семейств 44,1 kHz и 48 kHz.

Любая вибрирующая масса на вращающемся теле испытывает ускорение Кориолиса. Вибрационные гироскопы, включая кварцевые камертонные датчики угловой скорости, используемые в навигации, созданы именно для измерения этого эффекта. Резонатор Word Clock не создан для его измерения. Тем не менее он его испытывает.

Значимой величиной является параметр Кориолиса:

$$f = 2 \Omega \sin(\text{latitude})$$

где Ω -- угловая скорость Земли, $7,292 \times 10^{-5}$ rad/s. На широте 45deg f составляет приблизительно $1,03 \times 10^{-4}$ в секунду. Максимальное значение достигается на полюсах. На экваторе оно в точности равно нулю и остаётся в точности равным нулю независимо от того, насколько быстро или медленно вращается планета.

Удлинение суток означает уменьшение Ω . Изменение на 1,33 ms за столетие при продолжительности суток 86 400 секунд представляет собой относительное изменение Ω на $1,54 \times 10^{-8}$ за столетие, и это относительное изменение непосредственно переходит в f . Следовательно, ведущий тактовый генератор, откалиброванный в определённом году, откалиброван относительно условий Кориолиса того года. Каждый следующий год на всех широтах, кроме одной, он работает в условиях, немного отличающихся от тех, для которых был откалиброван.

Мы определяем остаточную вращательную фазу (ОВФ) как составляющую вариации восстановленного фронта Word Clock, которая отслеживает отклонение локального параметра Кориолиса от его значения на дату калибровки тактового генератора. Мы определяем Смещение вращательного эталона (СВЭ) как ОВФ тактового генератора на широте его установки, нормированную относительно того же генератора, работающего на 0,0000deg, где ОВФ по определению равна нулю.

4. МЕТОДОЛОГИЯ

Мы оснастили измерительным оборудованием 36 трактов распределения Word Clock: 21 в профессиональных студиях мастеринга и звукозаписи и 15 в домашних эталонных системах. Площадки простирались от Рейкьявика (64,1deg с. ш.) до Хобарта (42,9deg ю. ш.) и включали четыре установки в Кито (0,0000deg с. ш.) в качестве экваториального контроля. Каждый тракт включал ведущий тактовый генератор, от одного до трёх звеньев распределения и окончательный ЦАП. Даты калибровки ведущих генераторов были получены из сервисной документации изготовителей и находились в диапазоне от 2011 до 2023 года.

На каждой площадке фронтам восстановленного Word Clock на входе ЦАП присваивались временные метки относительно эталона, стабилизированного водородным мазером и доставленного в термостабилизированном виброизолированном контейнере. ОВФ извлекалась посредством регрессии вариации фронтов на синтетический вращательный эталон, выведенный из измеренной широты площадки и данных Международной службы вращения Земли и систем координат о продолжительности суток со времени калибровки каждого генератора. Температурные, сетевые частотные и механические составляющие выявлялись с помощью расположенных рядом температурных



датчиков и акселерометров и исключались до регрессии.

Все 36 трактов были измерены с февраля по апрель 2024 года и повторно с февраля по апрель 2026 года без изменения ведущих тактовых генераторов, креплений и кабелей. Кроме того, каждый тракт измерялся с заменой кабеля на каждом звене на обычный коаксиальный кабель 75 ohm, Meridian кабель Word Clock, Equinox кабель Word Clock и Тактовый Тактовый кабель SC Word Clock.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ

На четырёх установках в Кито ОВФ не отличалась от нуля в оба года обследования. Механизм предсказывает этот результат. Комитет считает его самым важным измерением настоящей работы.

На всех 32 внеэкваториальных установках была обнаружена остаточная вращательная фаза. Её величина коррелировала с синусом широты площадки ($r = 0,91$, $p < 0,001$) и с числом лет, прошедших со времени последней калибровки ведущего тактового генератора ($r = 0,78$, $p < 0,001$). Она не зависела от полушария, изготовителя ведущего генератора и семейства частот дискретизации. При использовании обычного коаксиального кабеля медианная ОВФ на входе ЦАП составляла 0,11 ps на площадках средних широт (от 30deg до 50deg) и 0,19 ps в Рейкьявике.

Между обследованиями 2024 и 2026 годов ОВФ увеличилась на каждой внеэкваториальной площадке, в среднем на 0,6 %. Комитет не утверждает, что увеличение субпикосекундного остатка на 0,6 % за два года слышимо. Он отмечает, что увеличение имеет правильный знак, масштабируется согласно правильной функции широты и совпадает с самым быстрым удлинением суток в геологической летописи.

Остаток накапливался по звеньям распределения. В трёхзвенных трактах с обычным коаксиальным кабелем окончательный ЦАП получал ОВФ, в 2,7 раза превышавшую измеренную на выходе ведущего генератора. Meridian кабель Word Clock снижал накопление по звеньям на 61 %. Equinox кабель Word Clock снижал его на 88 %. При использовании кабеля SC Word Clock на каждом звене накопление выше порога измерения 1 fs не обнаруживалось.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Можно предвидеть три возражения.

Первое касается величины. Относительное изменение Ω между двумя обследованиями имеет порядок 10^{-10} , а наблюдаемое изменение ОВФ на несколько порядков превосходит предсказание пропорциональной модели. Мы предполагаем, что резонатор, цепь делителей и распределительная кабельная сеть вместе образуют систему с высокой добротностью, отклик которой на медленно меняющийся член Кориолиса является резонансным, а не пропорциональным. Полной модели у нас пока нет. Измерение у нас есть.

Второе состоит в том, что вращение Земли меняется по многим причинам, включая связь ядра и мантии (Ferro, Ohm, Flux, Impedance, 2026), атмосферный угловой момент и приливы. Это верно и усиливает рекомендацию, а не ослабляет её. Каждый источник вариации Ω действует через один и тот же параметр Кориолиса, и каждый из них исчезает на экваторе.

Третье состоит в том, что гражданский отсчёт времени уже согласует атомное время с вращательным посредством секунд координации. Для гражданских часов -- да. Для связи Кориолиса кварцевого резонатора механизма секунды координации не существует, и он не планируется. В любом случае секунда координации, применённая к системе 44,1 kHz, означала бы 44 100 отсчётов расхождения относительно того, когда прозвучала музыка.

Комитет также фиксирует наблюдение, которое не намеревался делать. Механизм удлинения суток заключается в миграции массы планеты к экватору. Единственная широта, на которой это удлинение не имеет последствий для тактового генератора, -- экватор. Планета перемещает свою массу к единственному месту на своей поверхности, где последствия перемещения её массы не действуют. Мы не делаем телеологического заявления. Мы отмечаем геометрию.

7. РЕКОМЕНДАЦИИ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы рекомендуем публиковать Смещение вращательного эталона как характеристику ведущих тактовых генераторов первого порядка наряду с джиттером и фазовым шумом и всегда указывать его вместе с датой и широтой калибровки генератора.

Мы рекомендуем ежегодно повторно сертифицировать ведущие тактовые генераторы, работающие вне экваториального пояса. Отклонение параметра Кориолиса от калибровочного значения в любой отдельный год мало, однако оно накапливается, и ничто, кроме повторной калибровки, его не обнуляет.



Мы рекомендуем объектам вне экваториального пояса свести к минимуму число звеньев распределения и применять как минимум Equinox кабель Word Clock. На объектах выше широты 50deg, где параметр Кориолиса наибольший, на каждом звене следует применять Тактовый Тактовый кабель SC Word Clock.

Сутки становятся длиннее, быстрее, чем когда-либо за 3,6 миллиона лет, потому что планета перемещает свою массу к экватору. Эта фраза принадлежит геофизической литературе, и она верна. То, что из неё следует для аудио, принадлежит нам: каждый кварцевый тактовый генератор за пределами экваториальной линии понемногу и с накоплением уходит от условий, в которых был откалиброван. На широте 0,0000deg этого дрейфа не существует.

По-видимому, Земля пришла к тому же выводу об экваторе, что и мы. Просто ей требуется больше времени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kiani Shahvandi, M., Soja, B. (2026). Climate-induced length of day variations since the Late Pliocene. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 131, e2025JB032161. <https://doi.org/10.1029/2025JB032161>
- [2] Kiani Shahvandi, M., Adhikari, S., Dumbery, M., Mishra, S., Soja, B. (2024). The increasingly dominant role of climate change on length of day variations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121, e2406930121.
- [3] Agnew, D. C. (2024). A global timekeeping problem postponed by global warming. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07170-0>
- [4] Stephenson, F. R., Morrison, L. V., Hohenkerk, C. Y. (2016). Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 20160404.
- [5] ETH Zurich (2026, March). Climate change slows Earth's spin: day lengthening unprecedented in 3.6 million years. News release, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering.
- [6] Ferro, M., Park, H., Tanaka, Y. (2020). Hemispheric Bias in Copper Grain Orientation: A Metallurgical Study of Latitude-Dependent Conductor Anisotropy. *JEAS*.
- [7] Ferro, M., Ohm, C., Flux, R., Impedance, B. (2026). Temporal Bias in Magnetically Calibrated Audio Conductors: Field-Configuration Drift Following the 2023 Inner-Core Rotation Reversal. *JEAS*.