

ПРИРОДА

3 2021



ЧТО ТВОРИТСЯ С КЛИМАТОМ
И ЧТО ОН ТВОРИТ С НАМИ?

С.3

ЧЕМ ОПАСНЫ ГРОЗЫ?
ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ
В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

С.11



Почему Земля вращается неравномерно и как это влияет на счет времени

Л.В.Зотов^{1,2}, К.Бизуар^{3,4}

¹Московский институт электроники и математики имени А.Н.Тихонова НИУ «Высшая школа экономики» (Москва, Россия)

²Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова (Москва, Россия)

³SYRTE (Systèmes de Référence Temps-Espace), Парижская обсерватория (Париж, Франция)

⁴Международная служба вращения Земли и систем отсчета (Париж, Франция)

2020 год признан научным климатическим сообществом одним из самых жарких на планете в последние десятилетия. Одновременно наблюдалось аномальное ускорение во вращении Земли. Продолжительность суток достигла минимума. В статье говорится о факторах, влияющих на вращение Земли, об их возможных взаимосвязях и следствиях.

Ключевые слова: скорость вращения Земли, продолжительность суток.

Сутки на Земле состоят из 86 400 секунд. Для точного счета используют шкалу UTC (Coordinated Universal Time) всемирного координированного времени, которая определяется по показаниям атомных часов, установленных в разных точках планеты. Счет атомного времени ведут с 1970-х годов, когда Генеральная ассамблея по мерам и весам постановила: «Секунда времени равна 9 192 631 770 периодам излучения атома цезия-133 при переходах между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния». В России этим занимается Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли — отделение Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений под Москвой. По его показаниям осуществляется настройка главных часов страны — кремлевских курантов. Переход от астрономического счета времени к атомному времени потребовался, когда стало понятно, что вращение Земли не идеально [1].



Леонид Валентинович Зотов, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова; доцент Московского института электроники и математики имени А.Н.Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Область научных интересов — вращение Земли, гравитационное поле, климатические изменения. e-mail: lzotov@hse.ru



Кристиан Бизуар (Christian Bizouard), доктор астрономии, профессор, директор Центра ориентации и параметров вращения Земли Международной службы вращения Земли и систем отсчета Парижской обсерватории. Занимается изучением вращения Земли, движения полюсов, прецессии, нутации и геофизических возбуждений. e-mail: christian.bizouard@obspm.fr

О возможных изменениях скорости вращения Земли задумывался еще И.Кант. Он писал о том, что Земля должна замедляться под действием приливов, в своей работе «Исследование вопроса, претерпела ли Земля в своем вращении вокруг оси, благодаря которому происходит смена дня и ночи, некоторые изменения со временем своего возникно-

вения» (1754). Кант утверждал, что «когда планета содержит в себе значительное количество жидкого вещества, совместное притяжение Луны и Солнца, приводя в движение эту жидкую материю, сообщают Земле некоторую долю этого колебания». В XVIII в. подтвердить теорию Канта было невозможно — не было столь точных приборов. Тем не менее, его идеи нашли развитие в работах последователей, например П.-С.Лапласа.

В XX в. точность астрономических приборов возросла, появились средства космической геодезии, такие как GPS (Global Positioning System), ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система), РСДБ (Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), изобрели кварцевые, а потом и атомные часы, и стало возможным зарегистрировать все неоднородности во вращении планеты с точностью до десятых долей миллисекунд. Как и говорил Лаплас, под действием перераспределений масс океана и атмосферы, а также приливов, происходит изменение продолжительности земных суток на несколько тысячных долей секунды. Продолжительность суток (по-английски length of day — LOD) уменьшается с ускорением вращения Земли (рис.1).

Часть изменчивости можно объяснить зональными лунно-солнечными приливами. Особенно стоит отметить 18.6-летний цикл, связанный с прецессией лунной орбиты. Он хорошо заметен по огибающей амплитуды приливов на оранжевом графике. Под влиянием приливов экваториальное сжатие Земли то увеличивается, то уменьшается, при этом она либо замедляется, либо ускоряется. Приливные колебания происходят с периодами 5–9 дней, две недели, месяц и более (рис.2). Как отмечает метеоролог Н.С.Сидоренков, на максимумы и минимумы приливных изменений LOD зачастую приходятся резкие перепады в погодных явлениях [2].

Колебания, связанные с приливами, довольно регулярны. Однако далеко не вся изменчивость скорости вращения планеты обусловлена ими. Внутригодовая изменчивость связана с атмосферой [3]. В течение года зональные ветра в атмосфере и распределение давления меняются. Если на планете усиливаются западные ветра, то атмосфера, вращаясь быстрее, отбирает часть вращательного момента у твердой Земли. Вследствие атмосферного цикла Земля имеет самую медленную скорость вращения примерно 1 мая и 7 декабря. А вот 4 августа сутки становятся на миллисекунду короче, поскольку Земля немного ускоряется. Еще есть незначительное ускорение вращения в районе 27 февраля, но оно не сравнимо с августовским.

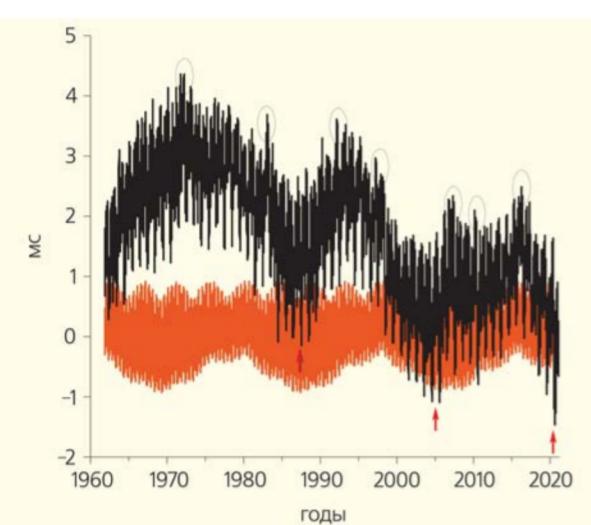


Рис.1. Изменчивость продолжительности суток LOD (черная линия) и влияющие на нее приливные вариации (оранжевая). Овалами выделены явления Эль-Ниньо. Красными стрелками отмечены максимумы скорости вращения Земли (минимумы LOD).

Одной из важнейших климатических осцилляций на планете является Эль-Ниньо — Южное Колебание (ЭНЮК), возникающее в экваториальной части Тихого океана каждые 2–7 лет. В ходе положительной фазы этого явления из-за разности дав-

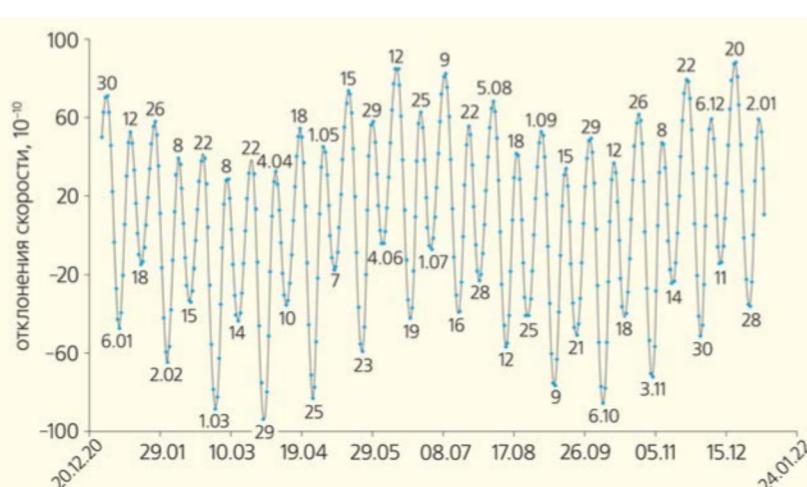


Рис.2. Приливные колебания скорости вращения Земли в 2021 г. (вычислены Н.С.Сидоренковым). Указаны календарные даты экстремумов.

лений западные ветра усиливаются, восточная часть океана нагревается, термоклин выравнивается. При этом длительность суток может увеличиться на миллисекунду (см. рис.1). Противоположная фаза ЭНЮК называется Ла-Нинья; она имела место, к примеру, в 2020 г. Эти явления изучаются в Институте природно-технических систем в Севастополе [4].

Обратимся к более длительным наблюдениям LOD (рис.3). Ранние данные (XIX в.) не слишком точны — они были получены по наблюдениям за движением Луны и за покрытием ею звезд. Видно, что на вековых интервалах, как и предвидел Кант, Земля замедляется, и длительность суток увеличивается примерно на 1.2 мс за 100 лет. Этот эффект связан с торможением Земли под действием лунных и солнечных приливов. Раньше Земля вращалась быстрее. Несколько сотен миллионов лет назад в году было не 365 дней, а, скажем, 400, т.е. в сутках было меньше 22 часов. Перемещаясь с востока на запад вслед за видимым движением Луны и Солнца, приливные волны немного отстают из-за трения, тормозят вращение Земли и удлиняют сутки. Приливы, которые вызывает Луна на Земле, по закону сохранения углового момента заставляют Луну удаляться примерно на 4 см в год.

Особенно интересна многолетняя изменчивость LOD. На циклы с периодами в несколько де-

сятилетий влияют процессы в океане и недрах Земли. Так, для нас оказалось неожиданностью, что после 2016 г. Земля стала ускоряться, и кривая LOD резко пошла вниз. В 2020 г. мы наблюдали экстремально быстрое вращение Земли. Можно сказать, что земные сутки приблизились к самым коротким по продолжительности из наблюдавшихся в последние 50 лет (см. рис.1, красные стрелки). Это может привести к необходимости вычесть секунду из шкалы времени UTC.

Ранее секунду неоднократно добавляли к шкале всемирного координированного времени UTC, последний раз это делали в новогоднюю ночь с 2016 на 2017 г. Атомная шкала UTC устроена так, что ее подправляют, как только разногласие между нею и шкалой вращения Земли UT1** приближается к пороговому значению в 0.9 с. С ноября 2018 г., впервые за многие годы, разногласие стало отрицательным и приблизилось в начале 2021 г. к -0.2 с. Раз в полгода директор Центра ориентации и параметров вращения Земли Международной службы вращения Земли и систем отсчета в Парижской обсерватории (в настоящее время эту должность занимает один из авторов статьи, К.Бизуар) подписывает бюллетень, где говорится, появится в грядущем полугодии дополнительная секунда или нет. На сайте Международной службы вращения Земли и систем отсчета (hpiers.obspm.fr/) представлен график, из которого следует, что с 2016 г. LOD в среднем уменьшалась на 0.3 мс/год и в начале 2021 г. достигла рекордного минимума в -1.5 мс (см. рис.1).

В настоящее время, из-за начавшегося в 2016 г. ускорения, секунда вращения Земли на 10^{-9} с короче секунды, утвержденной в 1970-е годы в системе СИ. Время по шкале вращения Земли UT1 идет быстрее, чем время UTC, которое является основой юридического времени во всем мире. Даже если продолжительность суток стабилизируется на текущем уровне, расхождение UT1 – UTC достигнет 1 с через 30 лет. Поскольку Земля про-

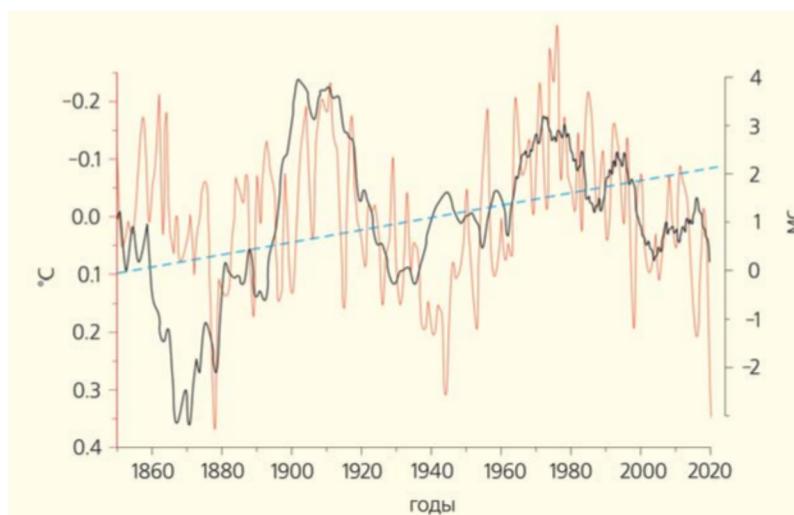


Рис.3. Изменения длительности суток (черная линия) в сравнении с колебаниями температуры на Земле. Синей штриховой линией показан линейный тренд. Красная линия — аномалии температуры (данные HadCRUT4*) после вычитания тренда глобального потепления. Для удобства сравнения график аномалий температуры перевернут.

* Массив данных ежемесячных измерений температуры. Данные о температуре поверхности моря собираются Центром Хэдли Метеорологического бюро Великобритании, о температуре приземного воздуха — Отделом климатических исследований Университета Восточной Англии.

** Система отсчета времени, основанная на средних солнечных сутках, средний интервал между двумя последовательными прохождениями Солнца через Гринвичский меридиан (0°).

должает ускоряться, ожидается, что эта разница будет достигнута за 5 лет. Прогноз показывает, что расхождение UT1 – UTC может оказаться отрицательным и превысить международный стандарт $|UT1 - UTC| < 0.9$ с в 2026 г. Возможно, впервые в истории придется «подкрутить» UTC на одну секунду назад.

Вернемся к вопросу о многолетних колебаниях. То, что происходит с длительностью суток на периодах 20 лет, 60 лет, не поддается окончательному объяснению. Многолетние колебания с амплитудами порядка 2–3 мс происходят синхронно с колебаниями климата [5, 6]. Считается, что эти изменения LOD вызваны процессами в недрах Земли, но причем здесь глобальная температура на поверхности?

График ускорения и замедления вращения Земли (см. рис.3) напоминает плавные волны: например, в 1930-е годы Земля ускорилась и длительность суток уменьшилась, а температура на Земле немного возросла (на 0.3°). Потом Земля замедлялась вплоть до 1970-х годов, далее стала разго-

няться. В 2005 г. что-то произошло, и Земля снова начала замедлять свое вращение, а в 2016-м, после сильного Эль-Ниньо, ускорилась. Вопрос, исследуемый одним из авторов этой статьи (Л.В.Зотовым): могут ли изменения скорости вращения Земли быть связаны с изменениями климата [7]. Подмечено, что, когда Земля ускоряется, потепление усиливается, и наоборот. Колебания температуры на Земле с периодом около 60 лет связывают с Атлантической многолетней осцилляцией. На 2020 г. не только пришелся максимум температуры и скорости вращения Земли, но и чандлеровское колебание полюса практически сошло на нет. Насколько случайно такое совпадение, не пошла ли энергия, поддерживающая его, на ускорение вращения Земли, еще предстоит выяснить. В рамках GGOS (Global Geodetic Observing System — Глобальная геодезическая система наблюдений) уже создана международная комиссия по вопросам климатических сигналов во вращении Земли, в которую входят и авторы этой статьи.■

Литература / References

1. *Bizouard C.* Geophysical Modelling of the Polar Motion. De Gruyter Studies in Mathematical Physics, 31. 2020. DOI:10.1515/9783110298093.
2. Сидоренков Н.С., Чазов В.В., Зотов Л.В., Вильсон И. 206-суточный лунный цикл в аномалиях погоды. Природа. 2018; 4: 19–23. [Sidorenkov N.S., Chazov V.V., Zotov L.V., Wilson I.R.G. 206-day Lunar cycles in weather anomalies. Priroda. 2018; 4: 19–23. (In Russ.).]
3. Сидоренков Н.С., Бизуар К., Зотов Л., Салстейн Д. Угловой момент атмосферы. Природа. 2014; 4: 22–28. [Sidorenkov N.S., Bizouard Ch., Zotov L.V., Salstein D. Angular momentum of atmosphere. Priroda. 2014; 4: 22–28. (In Russ.).]
4. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Марчукова О.В. Применение нейронных сетей для прогноза явлений Эль-Ниньо и Ла-Нинья и их типов. Метеорология и гидрология. 2020; 11: 111–121. [Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Marchukova O.V. Forecasting El Nino/La Nina and their types using neural networks. Russian Meteorology and Hydrology. 2020; 45: 806–813.]
5. Sidorenkov N., Dionis E., Bizouard C., Zotov L.V. Decadal fluctuations in Earth's rotation as evidences of lithospheric drift over the asthenosphere. Proceedings of Journees. 2019: 243–247.
6. Zotov L., Bizouard Ch., Sidorenkov N., Ustinov A., Ershova T. Multidecadal and 6-year variations of LOD. Journal of Physics: Conference Series. 2020; 1705: 012002.
7. Зотов Л.В. Исследование связей между вращением Земли и геофизическими процессами. Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2019. [Zotov L.V. Study of the links between the Earth rotation and geophysical processes. Moscow, 2019. (In Russ.).] Available at: <http://lnfm1.sai.msu.ru/~tempus/disser/index.htm>

Why the Earth Does Not Rotate Evenly and How It Affects the Time Counting

L.V.Zotov^{1,2}, C.Bizouard^{3,4}

¹Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia)

²Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

³Time-space Reference System (SYRTE, Systemes de Reference Temps-Espace), Paris Observatory (Paris, France)

⁴International Earth Rotation and Reference Systems Service (Paris, France)

2020 has been recognized by the scientific climate community as one of the hottest on the planet in recent decades. Also an anomalous acceleration in the rotation of the Earth was observed during this year. The length of the day has reached its minimum. The article discusses the factors influencing the rotation of the Earth, their possible interrelationships and consequences.

Keywords: Earth's rotation, duration of the day.