

СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ, ПРИРОДА ВАРИАЦИЙ

Тимофеев А.В., Тимофеев В.Ю.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск
timofeevav@ipgg.sbras.ru*

Исследование скорости вращения Земли имеет теоретическое и практическое значение. Данные о природе этого явления используются при построении теории эволюции Земли, определения времени появления и вариациях уровня океанов. С практической точки зрения точные геофизические измерения требуют учёта эффектов, связанных с вариациями скорости вращения Земли. Изменение скорости вращения возникает при изменении момента инерции, связанного с перемещением масс по поверхности Земли или в её атмосфере. Причинами вариаций угловой скорости вращения Земли являются погодные и климатические явления, приливное влияние Луны, Солнца и планет, а также глобальные геодинамические процессы, происходящие внутри Земли. Замедление скорости вращения Земли связывают, в основном, с диссипацией энергии в океанах. Известно, что изучение вариаций скорости возможно разными методами, от палеонтологии до астрономии и космической геодезии. Мощный импульс экспериментальному изучению феномена связан с развитием длинно-базисной радио-интерферометрии, с использованием сигналов от квазаров (VLBI метод). Этот метод позволяет на порядок и больше повысить точность измерений параметров вращения Земли. Существуют расхождения оценок вариаций скорости, полученных геологическими, астрономическими и геофизическими методами. Остаются вопросы в геофизике и океанологии, они касаются природы многолетней диссипации энергии в океанах и глубоких недрах Земли. Значительный прогресс достигнут в изучении короткопериодных вариаций. Они связаны с земными приливами (рис. 1), течениями и вариациями уровня мирового океана, сезонными климатическими изменениями и катастрофическими землетрясениями.

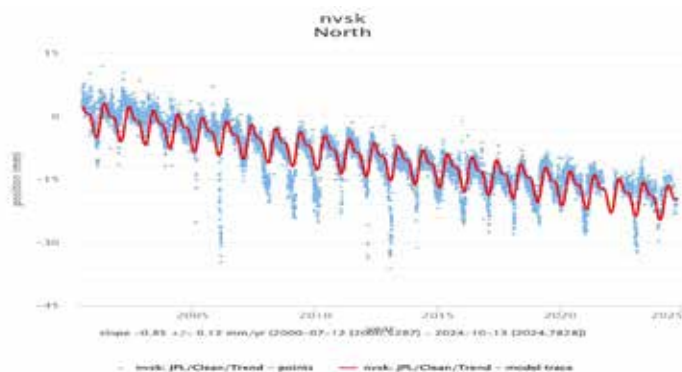


Рис. 1. Приливные вариации широтного смещения пункта Новосибирск (NVSK) и модельные вариации в мм, плитная скорость смещения на юг - 0.85 ± 0.12 мм/год соответствует модели ITRF 2014 для Евразийской тектонической плиты. Период наблюдений с 12.07.2000 г. по 13.10.2024 г.

Интересные данные о вековом замедлении скорости вращения дают палеонтологические данные по морским беспозвоночным. Исследование циклических наслоений, вызванных приливным влиянием на седиментацию в позднем протерозое (650 миллионов лет назад) показали, что день в ту эпоху составлял 21,9 часа, а год, соответственно, 400 ± 7 дней [1]. Изучение движения Луны в долготе астрономическими методами за 2000 лет показывают, что при вращении Земля теряет энергию, а за 100000 лет день стал длиннее на 2 секунды. Оценки времени полной фазы солнечных затмений при постоянной скорости вращения и сравнение с результатами, полученными в античные времена, показали отличие в долготе, которое увеличивается как квадрат времени (разность в 4 часа за 2000 лет) [1]. В таких построениях используются китайские, египетские, греческие и вавилонские материалы, а в результате создаются линейные и степенные модели вариаций [2–4]. Для изучения изменений скорости вращения Земли проанализированы сборники записей древних и средневековых затмений в период с 720 г. до н.э. по 1600 г. н.э., а также лунных покрытий звезд в 1600–2015 гг. н.э. Обнаружено, что скорость вращения отклоняется от равномерности, так что изменение длины среднего солнечного дня (LOD) увеличивается со средней скоростью +1,8 миллисекунд (мс) за столетие. Это значительно меньше скорости, прогнозируемой на

основе приливного трения, которая составляет +2,3 мс за столетие. Помимо, этого линейного изменения LOD, существуют колебания этого значения во временных масштабах от десятилетий до столетий. Есть некоторые признаки колебаний продолжительности дня с периодом примерно 1500 лет.

Замедление скорости вращения Земли связано с приливным трением, т.е. при приложении приливных сил в океанах, существуют потери энергии за счет вихревой диссипации, трения и приливов. Известны два подхода к оценке приливной диссипации в системе Земля-Луна - геофизический и астрономический. Геофизический рассматривает энергетический вклад от приливных течений, трение о дно по котидальным картам, оценка моментов по компоненте восток-запад – приливная сила на приливную высоту. Во-первых, на основании современных результатов сейсмологии мы сейчас представляем, что диссипация за счет неупругости тела Земли очень мала и дает только несколько процентов в общий бюджет энергии системы [1, 3, 4], поэтому объяснение надо искать в количественных оценках эффектов океанов и, вероятно, во взаимодействии океан-земля. Тем не менее, вихревая диссипация связана с турбулентностью, рожденной теплом, но диссипация из-за молекулярного вязкого трения - это потери тепла на дне океанов, а не вклад в замедление вращения Земли. Физические процессы взаимодействия Луны с твердой Землей посредством океанических приливов можно описать следующим образом. В то время, как лунные гравитационные силы растягивают Землю, а океанические приливы движутся вокруг несинхронно, океаны приспособляются к приливному искажению океанического дна, изменению вращения Земли с их приливным донным давлением. Фактически, средний уровень работы океанического приливного донного давления почти полностью соответствует энергии, достигаемой по наблюдаемому замедлению вращения. Согласно физическим принципам, изменения сопровождаются приливным трением и, следовательно, затратами энергии в тонком турбулентном пограничном слое океанического дна.

В астрономии проводится оценка скорости замедления вращения Земли по изменениям орбиты Луны и искусственных спутников Земли, что показывает более высокую сумму энергии по приливным искажениям и замедлению вращения (около 3 тера-

ватт), чем геофизические оценки (около 1,8 тераватт). Используя величину замедления скорости вращения Земли (2 миллисекунды в столетие), полученную различными способами от изучения древних затмений Солнца до современной локации Луны (рис. 2), проведены оценки диссипации для различных приливных моделей мирового океана и различных способах расчёта. В последние десятилетия, с повышением точности определений и новой информации о процессах в атмосфере и океанах, появилась экспериментальная возможность рассмотреть вариации скорости на коротких периодах. Так, более подробно анализируются вариации на периодах от года до столетия. Эти вариации связаны с изменениями

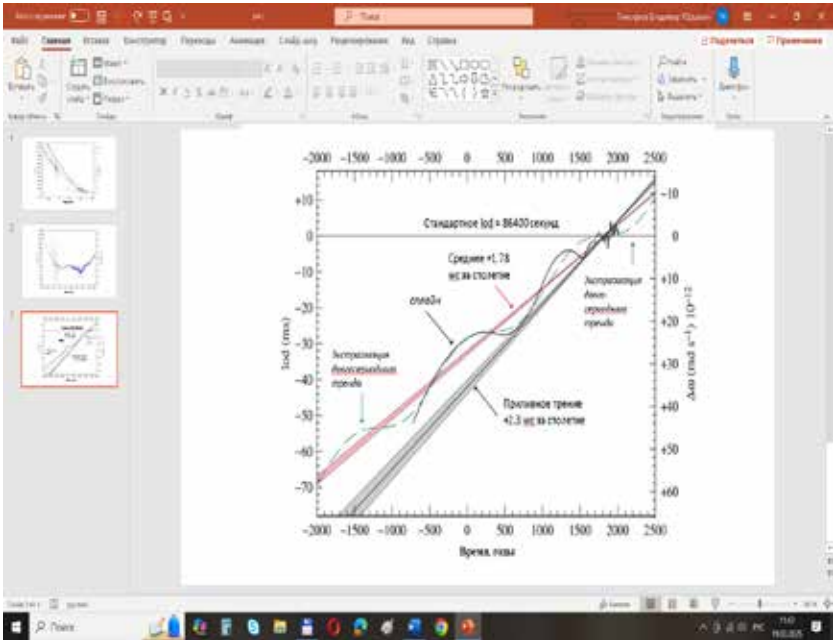


Рис. 2. Изменение замедления вращения Земли с -2000 года по 2500 год [1]. Красная полоса линейный тренд - среднее значение из данных измерений: $+ 1,78 \pm 0,03$ миллисекунды в столетие, которое соответствует ускорению: $- 4,7 \pm 0,1 \times 10^{-22}$ радиан/сек². Серая полоса показывает изменения, соответствующие приливному трению: $+ 2,3 \pm 0,1$ миллисекунды в столетие, соответствующее: $- 6,2 \pm 0,4 \times 10^{-22}$ радиан/сек². Чёрная и зелёная кривые построены по разным моделям экстраполяции экспериментальных данных. Вертикальная шкала слева в миллисекундах (мс)

момента инерции Земли, вызванными сезонными перемещениями в атмосфере. Также вариации скорости вращения могут быть связаны с глобальным потеплением, появлением крупных течений в океанах и изменением уровня мирового океана, диссипацией энергии в мантии Земли и сильнейшими землетрясениями мира [5–7]. Поправки за вариации скорости вращения можно рассчитать (например, для высокоточных гравиметрических и геодезических измерений), используя информацию международного центра по вращению Земли.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН номер FWZZ-2022-0019.

Литература

1. Stephenson F.R., Morrison L.V., Hohenkerk C.Y. Measurements of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015 // *Proc. R. Soc.* – 2016. - A 472:20160404. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.2016.0404>.
2. Парийский Н.Н., Кузнецов М.В., Кузнецова Л.В. О влиянии океанического прилива на вековое замедление вращения Земли // *Известия АН СССР, сер. Физика Земли*. 1972. № 2. С. 50-55.
3. Williams E. Tidal Rhythmites: key to the history of the earth's rotations and the lunar orbit // *J. Phys. Earth*. 1990. 38. P. 475-491.
4. Holme R., de Viron O. Characterization and implications of intradecadal variations in length of day // *Nature*. 2013. 499. P. 202-204. doi: 10.1038/nature 12282.
5. Adhikari S., Ivins E.R. Climate-driven polar motion: 2003-2015. *Sci. Adv.* 2, e1501693 (2016).
6. Xu Changyi and Sun Wenke. Co-seismic Earth's rotation change caused by the 2012 Sumatra earthquake // *Geodesy and Geodynamics*. 2012. 3(4). P. 28-31.
7. Xu C., Sun W., Zhou X. Effects of Huge Earthquakes on Earth Rotation and the length of Day Terr. // *Atmos. Ocean. Sci.* 2013. Vol. 24. No. 4. Part 1. P. 649-656.