

Н.В.Емельянов

**ДИНАМИКА ЕСТЕСТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ПЛАНЕТ  
НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

ГАИШ МГУ - 2019

### Построение шкал времени

Время является феноменом, который мы покорно принимаем таким, какой он есть. Однако в астрономической практике мы нуждаемся в источнике, сообщающем нам о времени. Источником обычно служит какой-нибудь физический процесс, подлежащий наблюдению и измерению. Астрономы всегда нуждаются в самом равномерном времени, определяемом той или иной шкалой. Постоянно ведутся поиски самой равномерной шкалы времени.

В прошлые века физическим процессом, несущим нам время, было вращение Земли. Время с ним связанное, называли *всемирным временем* (UT — Universal Time). Установлением всемирного времени занимались астрономы. Одна из версий всемирного времени обозначается через UT1.

Поскольку местное солнечное время зависит от долготы места на Земле, было введено понятие поясного времени. Всемирное время на гринвичском меридиане обозначается как GMT — Greenwich Mean Time.

После того как была обнаружена неравномерность вращения Земли, шкалу времени стали основывать на процессе движения Земли вокруг Солнца. Измерением этого процесса занимались астрономы. Так в астрономическую практику вошло *эфемеридное время* (ET — Ephemeris Time). Эфемеридное время считалось самым равномерным. Разность эфемеридного и всемирного времени измерялась и табулировалась. Из-за непредсказуемости переменной скорости вращения Земли разность UT1 — ET всегда была известна только для моментов в прошлом после обработки астрономических

наблюдений. Таблицы разностей  $UT1 - ET$  публиковались в астрономических ежегодниках.

С 1967 года определением понятия секунды стали заниматься физики. И уже с 1972 года в астрономической практике используется понятие *атомного времени*. Датчиком времени стали физические процессы в атомах, доступные наблюдению и измерению. Шкалу атомного времени обозначают как  $IAT - International Atomic Time$ . Эта шкала считалась столь же равномерной, как и шкала эфемеридного времени. По необъяснимым историческим причинам разность между эфемеридным и атомным временем ( $ET - IAT$ ) установили равной 32.184 секунды.

Возникло противоречие между желанием пользоваться самым равномерным временем  $IAT$  и тем фактом, что наша практическая жизнь на Земле связана с восходом и заходом солнца, а солнце живет на небе по шкале всемирного времени. Противоречие разрешили следующим путем. Придумали всемирное координированное время ( $UTC - Universal Time Coordinated$ ) согласно двум простым правилам:  $IAT - UTC$  всегда равно целому числу секунд, разность  $UTC - UT1$  никогда не превышает 0.9 секунды. Таким образом, время  $UTC$ , являясь равномерным, отслеживает изменения хода всемирного времени  $UT1$ . Для реализации этих правил придется время от времени скачком изменять  $UTC$  на одну секунду. Этим занимается международная служба вращения Земли ( $IERS - International Earth Rotation Service$ ). Обычно при необходимости это делают либо 1 января, либо 1 июля. Как часто это делается можно узнать из следующего раздела. О планируемом заранее скачке времени  $UTC$  и о текущей разности  $IAT - UTC$  можно узнать на сайте

<https://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulc/bulletinc.dat>.

В настоящее время  $GMT (Greenwich Mean Time)$  совпадает с  $UTC$ .

К концу XX века точность астрономических наблюдений достигла такого уровня, что приходится применять модель общей теории относительности (ОТО) вместо Ньютоновой механики. Согласно ОТО время течет по-разному в разных местах Солнечной системы. Поэтому шкалу времени стали привязывать к месту, в котором находятся часы, хранящие время. Так появились понятия барицентрического времени ( $TDB - Time Dynamic Barycentric$ ), текущего в барицентре Солнечной системы, и времени на геоиде ( $TT - Time$

Terestre). Реализация ТТ оказалась возможной благодаря тому, что атомные часы расположены на геоиде. При этом положили, что  $ТТ - IAT = 32.184$  секунды. Таким образом, получилось, что время ТТ является продолжением эфемеридного времени ET, что удобно для астрономической практики.

Барицентрическое время используется для описания динамики тел Солнечной системы. Поскольку в барицентре Солнечной системы фактически нет никаких часов, даже атомных, то шкалу TDB приходится моделировать, используя знания о распределении масс, орбитальном и вращательном движениях небесных тел. Конечно, скорость течения времени в барицентре отличается от скорости его течения на геоиде. Эта разность имеет как вековой ход, так и периодические изменения. Однако для удобства работы в астрометрии предположили, что в барицентре расположены часы, идущие в среднем с той же скоростью, что и часы на геоиде. Периодически изменяющуюся разность  $P = TDB - TT$  пришлось моделировать огромными тригонометрическими рядами, учитывая периодические движения многих тел Солнечной системы. Фактически величина  $P$  представлена суммой периодических слагаемых, каждое со своим периодом. Одну из версий этого ряда можно найти в статье Fairhead, Bretagnon (1990). Максимальная амплитуда периодических членов ряда составляет 0.001656 с.

В последние годы в качестве датчика времени используются сигналы космических радиоисточников, называемых пульсарами. Такое пульсарное время считается наиболее равномерным.

Более подробные сведения о шкалах времени и его измерениях можно найти в книгах *Introduction aux Ephémérides Astronomiques*, 1997), Труды ИПА РАН. Вып. 10. Эфемеридная астрономия (2004).

## **Связь шкалы UTC со шкалой TT**

Как следует из предыдущего раздела, разность  $ТТ - UTC$  равна 32.184 секунды плюс некоторое целое число секунд. В таблице П4.1 и на рис. П4.1 дается разность  $ТТ - UTC$  для каждой из начальных дат ее изменения, начиная с 1972 года. Скачкообразное изменение шкалы UTC на одну секунду устанавливается международной службой вращения Земли (IERS – International Earth Rotation Service) в 0 часов начальной даты. Для дат до 1972 года разность

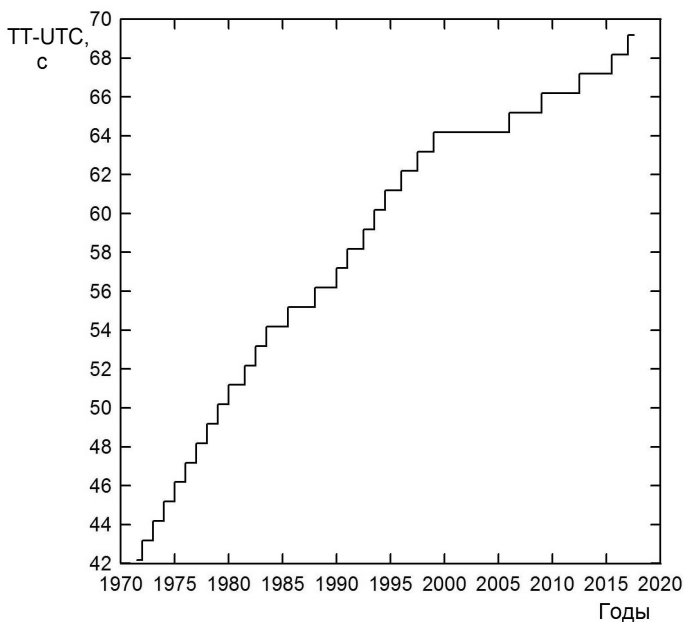


Рис. П4.1. Изменение разности TT – UTC со временем.

ET – UTC или ET – GMT публиковалась в *Астрономических ежегодниках*.

### **Шкалы времени в публикациях наблюдений в прошлых веках**

В публикациях астрометрических наблюдений планет, спутников и астероидов в прошлых веках использовались шкалы местного среднего солнечного времени. Связь некоторых таких шкал с UTC или с продолжением UTC в прошлое – GMT дается в таблице П4.2.

Таблица П4.1. Разность ТТ – UTC для каждой из начальных дат ее изменения.

Юлианская дата, JD	Календарная дата	ТТ-UTC, секунды
2441317.5	1972 01 01	42.184
2441499.5	1972 07 01	43.184
2441683.5	1973 01 01	44.184
2442048.5	1974 01 01	45.184
2442413.5	1975 01 01	46.184
2442778.5	1976 01 01	47.184
2443144.5	1977 01 01	48.184
2443509.5	1978 01 01	49.184
2443874.5	1979 01 01	50.184
2444239.5	1980 01 01	51.184
2444786.5	1981 07 01	52.184
2445151.5	1982 07 01	53.184
2445516.5	1983 07 01	54.184
2446247.5	1985 07 01	55.184
2447161.5	1988 01 01	56.184
2447892.5	1990 01 01	57.184
2448257.5	1991 01 01	58.184
2448804.5	1992 07 01	59.184
2449169.5	1993 07 01	60.184
2449534.5	1994 07 01	61.184
2450083.5	1996 01 01	62.184
2450630.5	1997 07 01	63.184
2451179.5	1999 01 01	64.184
2453736.5	2006 01 01	65.184
2454832.5	2009 01 01	66.184
2456109.5	2012 07 01	67.184
2457204.5	2015 07 01	68.184
2457754.5	2017 01 01	69.184

Таблица П4.2. Связь различных шкал времени, которые использовались в прошлом.

Обозначение шкалы времени в публикациях	Разность: UTC - время шкалы (ч – часы, м – минуты, с – секунды)
Greenwich Mean Time	0 ч
Washington mean time	5 ч 8 м 12.15 с
Central Standard Time	6 ч
Pacific Standard Time	8 ч
Pulkovo mean time	-( 2 ч 1 м 18.576 с)
Paris Mean Time	-( 9 м 21 с)
Cambridge Mean Time	-( 22.752 с)
Temps moyen de Nice	-( 29 м 12.096 с )
Strasburg Mean Time	-( 31 м 4.248 с )
Mount Hamilton Mean Time	8 ч 6 м 34.92 с
90th Meridian Time	6 ч
Leander McCormick mean time	5 ч 14 м 5.328 с

## Литература к Приложению 4

*Fairhead L., Bretagnon P.* An analytical formula for the time transformation ТВ-ТТ. *Astronomy and Astrophysics*. 1990. V. 229. P. 240–247.

Introduction aux éphémérides Astronomiques. Supplément explicatif à la connaissance des temps. (eds. Simon J.-L., Chapront-Touzé M., Morando B., Thuillot W.). Bureau des Longitudes. Paris. Publisher: Les éditions de physique, France. 1997. 450 pp.

Труды ИПА РАН. Вып. 10. Эфемеридная астрономия. Санкт-Петербург. 2004.