

Глава 4

Эволюция измерений времени

Когда мы измеряем время так же, как измеряем любую другую физическую величину, то кажется логичным начать с оценки метрологической необходимости в предвидении применений и в последующем поиске способов, как им удовлетворить. Этот подход был действительно испытан на астрономической динамике. Но более часто стандарты были реализованы прежде, чем рассматривалось их использование для того, для чего они создавались. И поэтому их само применение предшествовало официальному признанию стандартов организациями, созданными для работ по метрологии в мировом масштабе. В этом смысле метрология есть странная комбинация прагматизма и строгости.

Основная часть этой книги посвящается представлению снимка измерения времени, как оно практиковалось во время написания. Это контрастирует с настоящей главой, в которой мы описываем как такие измерения развивались как в части техники, так и в части идеи. Эта история отмечена колебаниями, сомнениями и иногда даже несостоятельностью.

4.1. Дата, календарь и час

Дата события в научном смысле представляет собой набор данных, приписанных к временной метке на какой-то ее специфической шкале времени. Традиционно это объединяет некоторые способы определения дней, известных как календарь, вместе с мелкими делениями дня, которые обычно называются часами.

Различные календари (Григорианский, Еврейский, Исламский и т.д.) являются изобретательными схемами использования естественных циклов, имеющих точные астрономические определения:

- истинные *солнечные сутки* это промежуток времени между двумя последовательными прохождениями Солнца через местный меридиан,
- *тропический год* это промежуток времени между двумя прохождениями Солнца через точку весеннего равноденствия,
- *лунный месяц* это промежуток времени между двумя последовательными новолуниями.

Мы ограничимся главным образом хорошо известным Григорианским календарем, который находится в хорошем согласии с календарем, основанным на тропическом годе¹.

Сутки подразделяются на часы, минуты и секунды способом, унаследованным от вавилонян [4.1]. Этот способ сопротивляется любым попыткам перевода на десятичную систему. Во Франции 24 ноября 1793 г. был издан декрет с намерением введения десятичного деления суток и *десятичной секунды*, но он был отменен 7 апреля 1795 г., и только для интервалов короче, чем 1 секунда используются десятичные доли, т.е. миллисекунды, микросекунды и т.д.

В этой сложной системе причудливого набора сопротивлений технократическим влияниям, единицы не всегда следовали постоянным соотношениям одна с другой. Добавим еще то, что год может содержать или 365 или 366 суток, и что еще одно оригинальное требование появилось в 1971 г. Оно состоит в том, что сутки, обычно продолжающиеся 86400 секунд, иногда могут насчитывать на 1 секунду больше или меньше во *всемирном координированном времени* (UTC), которое отмеряет нашу жизнь.

Для того, чтобы упростить свою работу астрономы иногда используют *Юлианскую дату* (JD). Она основана на непрерывном счете дней, начиная с 4713 г. до Новой эры. Юлианская дата может быть дополнена также десятичными частями суток. В этой системе сутки считаются с полдня. Например, 1 января 2000 г. в полдень соответствует Юлианской дате JD=2 451 545,0.

В метрологии времени, в изучении вращения Земли и в космических науках часто используется *модифицированная Юлианская дата* (MJD). Она определяется из

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2\,400\,000,5. \quad (4.1)$$

Это означает, что MJD=0,0... соответствует 17 ноября 1858 г. в 0 часов. (Заметим, что мы следуем международному применению акронимов. MJD происходит из английского, в то время как международная атомная шкала TAI происходит от французского *Temps atomique international*).

По определению календарь и JD и MJD системы тесно привязаны к изменению дня и ночи. Тем не менее они используются на шкалах времени, основанных на других явлениях, таких как международная атомная шкала, в которой имеется только незначительный дрейф по отношению к истинным солнечным суткам. Неоднозначность исключается при условии, что шкала времени указывается в записях даты.

¹ За время от Григорианской реформы в 1582 г. и до 3200 г. Григорианский календарь прибавит грубо на один день по сравнению с календарем, основанном на тропическом годе. Неопределенность в этом определении обусловлена главным образом непредсказуемой неопределенностью во вращении Земли.

4.2. Измерение времени, основанное на смене дня и ночи

4.2.1. Среднее солнечное время

В древние времена день, от рассвета до заката, и ночь, от заката до рассвета, почти неизменно делились на 12 часов каждый. Естественно, что часы имели неодинаковую длительность днем и ночью, за исключением дней весеннего и осеннего равноденствия или на экваторе. И длительность часов изменялась вместе с сезонами и широтой. Эти изменчивые часы, или *сезонные часы*, все еще находились в употреблении в 15 веке, несмотря даже на то, что уже задолго до этого, древние астрономы изобрели и использовали *равноденственные часы*, путем деления видимых солнечных суток между двумя последовательными прохождением Солнца через местный меридиан на 24 равных периода.

Более точно *истинное солнечное время* (или истинное время) определяется как часовой угол Солнца, т.е. угол между полуплоскостью наблюдательного меридиана и полуплоскостью, определяемой осью вращения Земли и Солнца. Этот угол затем делится на «часы» по 15° . (Астрономы не всегда имеют отчетливое различие между углами и временами, как это было показано тем фактом, что астрономические эфемериды Бюро долготы в Париже называются *Знание Времени* (Connaissance des temps)).

Истинное солнечное время наблюдается непосредственно и оно все еще использовалось в ряде стран до начала 20 столетия. Однако это не очень «удобное» время в том смысле, как это надо было понимать из Пуанкаре (см. раздел 2.3). Мы можем сказать, что это не равномерное время. Его неравномерность была известна уже Птолемею (150 г. н.э.). Эта неравномерность происходит главным образом из-за эллиптической формы орбиты вокруг Солнца и наклона оси вращения Земли по отношению к эклиптике (плоскости ее орбиты). Она имеет общую амплитуду 30 минут и называется *уравнением времени* (см. рис. 4.1). Астрономы исключают эти вариации шкалы равномерного времени, известного как *среднее солнечное время*. Эта шкала времени, как и истинная шкала времени, связана с местным меридианом. Однако попытки идеализировать систему на этом не остановились. Предельной целью было гарантировать строгую пропорциональность между средним солнечным временем и углом, на который Земля поворачивается вокруг своей оси. В главе 8 мы откроем некоторые тонкости этого требования.

Несмотря на преимущество, которое дает равномерное среднее солнечное время, оно долго рассматривалось только как инструмент защиты астрономов. Сделав однажды свою работу, они проводили такие преобразования, чтобы астрономические эфемериды могли бы выражаться через истинное время. Как пример, среднее солнечное время Гринвича,

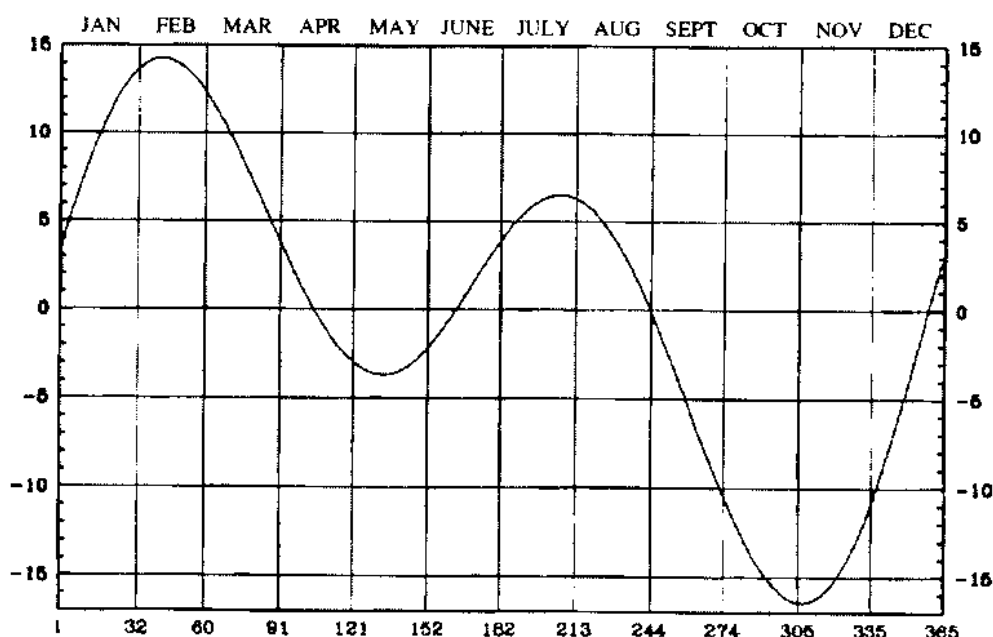


Рис. 4.1. Уравнение времени. Среднее солнечное время минус истинное солнечное время в минутах. (Полученное благодаря бюро долготы, Париж.)

Англия, было введено в *навигационный альманах и астрономические эфемериды* только в 1834 году. На следующий год во Франции *Connaissance des temps* бюро долготы приняло среднее солнечное время в Париже.

4.2.2. Шкалы всемирного времени и часовые пояса

Появление железнодорожных сетей во второй половине девятнадцатого столетия привело к необходимости использования по крайней мере на национальном уровне, одного единственного определения часа. Затем многие страны приняли определение часа среднего времени меридиана их столиц со сдвигом на 12 часов. Так во Франции актом парламента от 14 марта 1891 года было проголосовано установление часа парижского меридиана.

Однако это решение оказалось неадекватным для некоторых стран, занимающих территории, простирающиеся в большом диапазоне долгот. Идея деления времени таких стран на часовые пояса, таким образом, чтобы время часовых поясов отличалось на целое число часов и чтобы солнечный полдень всегда приходился на 12 часов, была, повидимому, предложена Х.Даудом в США в 1870 г. [4.1]. Вскоре она была опробована практически инженером канадских железных дорог С.Флемингом.

Использование среднего солнечного времени начало таким образом распространяться, хотя все еще и отсутствовал единый мировой стандарт. Соглашение об унификации времени в мировом масштабе было принято в октябре 1884 г. на международной конференции, которая собралась в Вашингтоне «для принятия единственного начального меридиана и всемирного времени» [4.2]. Гринвичский меридиан был предложен

как естественный выбор, потому что он уже был принят как начальный для долготы в большинстве морских лоций, и, действительно, это предложение было одобрено почти единогласно большинством национальных представителей. Всемирное время стало, таким образом, определенным через меридиан. Более того, на конференции было оговорено, в противоположность общей астрономической практике счета суток с полдня, что всемирные сутки должны начинаться в полночь начального меридиана и что часы должны иметь счет с 0 до 24.

В последовавшие затем два десятилетия часовые пояса были связаны с всемирным временем и распространены на всю Землю. Первоначально планета была разделена на 24 временных пояса, каждый из которых занимал 15° долготы, с центром первого пояса на Гринвиче. Ось каждого пояса расположена на *поясном меридиане* и, таким образом, установлено *поясное время* в каждом поясе. Любая страна, занимающая небольшое число зон, могла принять время зоны, в которой находилась ее столица. Постепенно страны начали внедрять новую систему. С 1971 г. она начала ассоциироваться со Всемирным Координированным Временем (UTC), которое будет определено в разделе 4.5 и с большей степенью глубины будет обсуждено в главе 7. Например, 9 марта 1911 г. актом французского парламента во Франции было введено время гринвичского меридиана в терминологии, направленной на сохранение национального достоинства: – «Официальным временем Франции... является среднее Парижское время с задержкой на девять минут и двадцать одну секунду». (Интересно отметить несоответствие терминологии, так как среднее время – это время в полдень в 0 часов). Этот акт действовал до 9 августа 1978 г., когда правительственный декрет связал официальное время с UTC.

Стандартная система времени с тех пор потеряла что-то из первоначальной простоты в связи с постоянным сдвигом между официальным временем и временем соответствующего пояса, а также в связи с летним временем. Например, летнее время появилось во Франции в 1916 г. «для того, чтобы противостоять раздражающей тенденции большинства горожан поздно ложиться и поздно вставать» [4.3]. Очень трудно найти разницу между UTC и официально принятым временем в некоторых странах потому, что не существует организаций, отвечающих за достоверность такой информации.

Астрономы были слишком медлительны для того чтобы принять всемирное время на конференции 1884 г. *Connaissance des temps Бюро долготы Парижа* было согласовано с гринвичским средним временем (GMT) в 1916 г., но не с всемирным временем, которое, как мы знаем, отличается от GMT на 12 часов.

И только в 1925 г. те эфемериды, которые использовались навигаторами и астрономами, стали отсчитывать начало суток в полночь, а не в

полдень. Новая шкала времени, выведенная из среднего времени путем добавления 12 часов, стала называться *гражданским временем*. Например, гражданское время Гринвича является ничем иным как всемирным временем, подробно представленным в 1884 году. Оно использовалось как независимый временной аргумент для *Connaissance des temps* Бюро долготы с 1925 по 1950 гг. Однако общим подходом, даже в астрономии, является обращение к *гринвичскому среднему времени* для новой шкалы, и это является источником большой путаницы. Хотя название *Всемирное Время* происходит непосредственно из терминологии, использованной на конференции 1884 г., оно не использовалось вплоть до 1948 г., когда международный астрономический союз, после долгих колебаний, наконец, сделал твердые рекомендации в его пользу. Это не мешало продолжению неправильного использования акронима GMT там, где должно использоваться UT.

Даже сегодня все еще имеются остатки систем, в которых сутки считаются с полдня, например, Юлианская Дата, упомянутая в Разделе 4.1.

4.2.3. К реализации Всемирного Времени

Начнем с соглашения, направленного на упрощение языка. Мы будем использовать термин *всемирное время* только тогда, когда мы говорим о шкале времени, основанной на вращении Земли и соотнесенной с на-

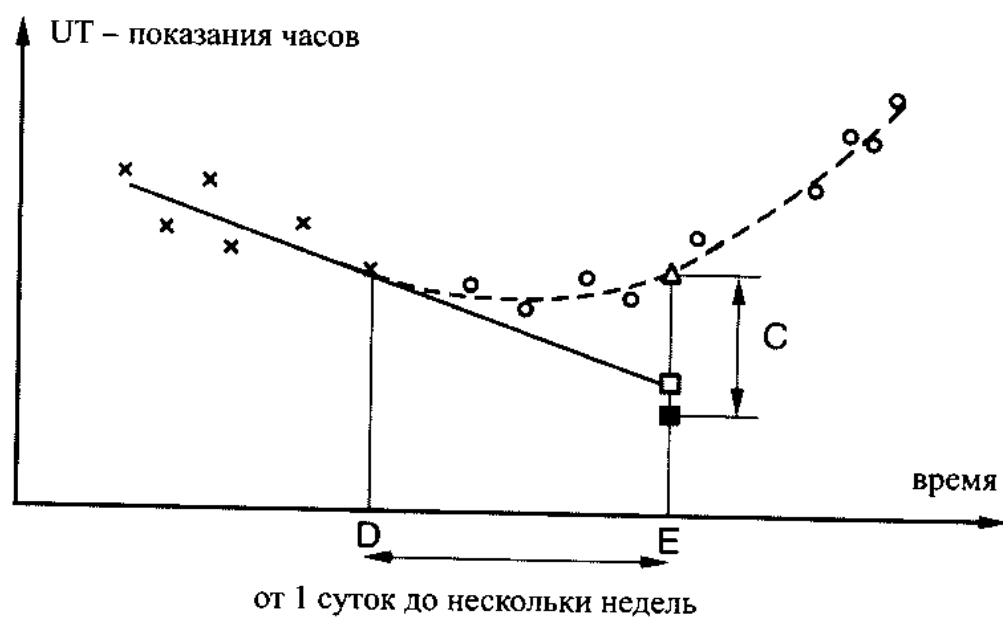


Рис. 4.2. Излучение сигналов всемирного времени UT. X – астрономические наблюдения UT минус показания часов, доступные на момент излучения сигналов времени D и действительные до E из-за влияния вычислений, задержек в линиях передачи и плохой погоды. Для прогноза значения в E (обозначенного через □) используется линейная экстраполяция. Последующие наблюдения (обозначенные через ○) не подтверждают этот прогноз. В дополнение, излученное время ■ фактически может не совпадать с прогнозом. Общая ошибка в излучении сигнал времени равна C.

чальным меридианом. Оно поэтому включает в себя всемирное время (UT) с его современным определением, также как и GMT, сдвинутое на 12 часов по отношению к UT, а также *гринвичское звездное время*. Оно является часовым углом точки весеннего равноденствия, измеренным от начального меридиана и математически связанным с GMT и UT.

С середины девятнадцатого столетия и почти до 1970 г. национальные организации по хранению времени работали более или менее неизменно. Они имели основное оборудование, включая часы, которые должны были быть стабильными настолько насколько это возможно, вместе с рефракторными телескопами, которые служили для определения перехода звезд через меридиан, или, иногда, через равные высоты. Все это дополнялось приборами, излучающими сигналы времени, которые по природе являлись электрическими, оптическими или звуковыми сигналами. Затем примерно с 1910 г. стали использоваться излучатели и приемники радиосигналов. В периоды ясной погоды астрономы тратили свои вечера или даже все ночи на отсчет моментов перехода звезд с помощью локальных часов, принятых за опорные часы. Затем они шли спать прежде чем сделать оформление «их восстановительных наблюдений», которое обычно означало вычисление *поправок часов*. Эти поправки должны были быть добавлены к показаниям опорных часов для того, чтобы на момент астрономических наблюдений, получить местное время, или после учета долготы – всемирное время. Поэтому назначение опорных часов заключалось в обеспечении некоторого способа усреднений для наблюдений и их сглаживания, т.е. попросту говоря, для хранения времени между вечерами, когда проводились наблюдения. Таким образом часы путем экстраполяции, давали приближение к всемирному времени в реальном времени. С помощью этой экстраполяции сигналы времени излучались в форме импульсов в согласованное номинальное время. Рис. 4.2. показывает, как этот метод работает и высвечивает некоторые неопределенности, связанные с ним. Причина, для чего нужен хороший *хранитель времени* становится ясна. Однако, прогресс в разработке хороших хранителей времени в конце концов лишил астрономов их роли держателей времени.

Когда примерно в 1910 г. радиосигналы стали пересекать Атлантический Океан, то было обнаружено, что они могут отличаться на одну или даже на две секунды. Это открытие пришло во времена, когда случайные погрешности в локальных измерениях всемирного времени были не хуже нескольких сотых секунды. Основными причинами, приводящими к систематическим ошибкам, объединенным со случайными ошибками, были ошибки в наблюдении положения звезд, задержки в инструментах, и более всего, ошибки в определении долготы – три причины, которые при объединении вместе, давали неопределенный сдвиг. Всемирное время

действительно единственное по своему определению, но его реализация может расходиться совершенно неприемлемым образом.

В бюро долготы Парижа стало ясно, что в этой ситуации надо что-то предпринять. Поэтому в 1911 г. по инициативе Ферри было предложено, чтобы французское правительство собрало международную конференцию по созданию международного бюро времени (ВН). Его основной задачей должна быть унификация мирового времени. Съезд состоялся в 1912 г., но война помешала установлению положения о ВН. Тем не менее международное бюро времени начало выполнять свои функции немедленно в полуофициальной манере при поддержке Парижской Обсерватории. Оно приобрело официальный статус в 1919 г., когда оно было поставлено в подчиненность международного астрономического союза, и выполняло свой мандат до 1988 года, когда его функции разделились на две части. Измерение атомного времени было передано международному бюро мер и весов (BIPM), в то время как астрономические и геодезические функции были реорганизованы, чтобы сформировать международную службу вращения Земли (IERS). Центральное бюро IERS до 2001 г. находилось в парижской обсерватории прежде чем переместиться в институт картографии и геодезии во Франкфурт, Германия. Мы будем обсуждать еще и другие области деятельности IERS. Ссылки [4.4, 4.5, 4.6] дают исторический обзор и подводят итог деятельности международного бюро времени.

Цель международного бюро времени состояла в обеспечении единственного приближения к теоретическому всемирному времени, известному как *точное время* (*definitive time*), и затем давать расхождение между окончательным временем и номинальным временем излучения сигналов времени. Вычисления были исключительно сложными несмотря на то, что они основывались на достаточно простых принципах. Мы можем подчеркнуть это следующим примером. Каждый раз службы сопоставляли астрономические наблюдения и излучения сигналов времени со своими опорными часами. Затем путем обмена сигналами времени международное бюро времени могло сформировать уникальные мировые опорные часы, опираясь на данные наблюдений и излучений сигналов. Потом уже было просто сконструировать точное время путем усреднения астрономических измерений и их сопоставления с излучениями сигналов времени. Результаты публиковались в *Bulletin horaire* каждый месяц или каждый второй месяц в зависимости от периода.

Как пример, рассмотрим результаты на октябрь 1936 г. опубликованные в апреле 1937 г. Точное время 56 ежедневных излучений представляется с точностью до миллисекунд. Поэтому можно было бы ожидать разбросы в диапазоне до нескольких миллисекунд в точном времени из-за неопределенности в оценке задержек при распространении радиосигналов. С учетом этих разбросов, расхождения времен излучения по отноше-

нию к их номинальным величинам по оценке международного бюро времени были значительные, доходя до 0,2 с.

Мы, конечно, можем поинтересоваться – до какой степени точное время международного бюро времени представляет теоретическое всемирное время, определенное астрономами. Едва ли возможно точно дать ответ на этот вопрос, потому что уже упоминались систематические ошибки, и было бы мудрым ожидать неопределенности до нескольких сотых секунды. Это показывает, как важно различать синхронизацию, которую можно точно гарантировать на некоторых согласованных базисах, от реализации теоретической шкалы времени, опирающейся на эти базисы. Мы увидим, что эти отличия объясняют определенное нежелание к установлению атомной меры времени.

Работа, выполняемая в международном бюро времени, мало изменялась примерно до 1960 г., хотя технические улучшения используемых часов постепенно делали возможным уменьшение ошибок синхронизации в излучениях сигналов времени. Можно сказать, что тогда унификация времени могла быть достоверной в пределах 1 или 2 миллисекунд с временной задержкой около одного года, прежде чем эти результаты объявлялись. В реальном времени путем экстраполяции часов и использования локальных наблюдений расхождение в унификации времени было порядка 10 миллисекунд.

4.2.4. Определение секунды до 1960 г: секунда среднего солнечного времени

Измерение времени, основанное на вращении Земли, первоначально покоилось на постулате воспроизводимости, как это обсуждалось в главе 2. Этот постулат был впервые применен к средней продолжительности суток, а потом к периоду вращения. В 1737 году Эйлер показал, что если Земля, рассматриваемая как недеформированное твердое тело, вращается с постоянной скоростью, то среднее солнечное время приобретает вид абсолютного динамического времени. Однако, два столетия спустя, когда было осознано, что вращение Земли вовсе не равномерно, то стало много труднее устанавливать математическую модель и с ее помощью определять систему времени. Только небольшие эмпирические поправки были добавлены с 1955 г. для того, чтобы удалить ежегодные флуктуации (это шкала с поправками была обозначена как UT2). Было осознано, что среднее солнечное время, а следовательно и всемирное время, не являются хорошими мерами времени, и что вместо вращения Земли в качестве мер времени могут использоваться лучшие часы.

Секунда, единица времени, или длительность молчаливо и повсеместно была определена как $1/86400$ часть средних солнечных суток. Удивительно, что это определение секунды среднего времени, которое остава-

лось в силе до поздних 60-х, никогда не было официально ратифицировано организациями, отвечающими за мировую метрологию начиная с метрической конвенции 1875 г.

4.3. Время, основанное на динамике Солнечной Системы: эфемеридное время

4.3.1. Первые сомнения в равномерности вращения Земли

В то время как Коперник принял древнегреческую догму о равномерности вращения Земли, Кеплер упомянул о возможности некоторых неравномерностей. Первая попытка демонстрации существования такого явления появилась благодаря Фламстиду. Вскоре после основания Гринвической обсерватории в 1677 г. он установил гигантские маятники в надежде выявить какие-нибудь аномалии, но ничего не обнаружил [4.7]. Позже в 1752 г. берлинская академия искусств и наук под председательством Мопертюи подняла следующий вопрос: «Является ли ежедневное движение Земли всегда происходящим с одной и той же скоростью или нет? Какие средства мы имеем в нашем распоряжении, чтобы ответить на этот вопрос? И если имеется некоторая неравномерность, что может быть ее причиной?» В своем ответе Кант сказал, что это мог бы быть эффект замедления из-за диссипации энергии в приливных движениях океанов. Он был прав, но его идея была подтверждена наблюдениями только два века спустя.

Убеждение, что вращение Земли должно быть идеально равномерным, укоренилось так глубоко, что к этим первым сомнениям едва ли кто-нибудь прислушивался. В 1825 г. Лаплас написал: «Определено, что со времен Гипарха длительность суток не изменилась больше, чем на одну сотую (десятичной) секунды [т.е. 0,00864 обычной секунды]». Как мы увидим заявление необоснованное. В то время как Феррель в 1864 г. а потом и Делоне 1865 г. утверждали, что расхождение между лунными эфемеридами и наблюдениями происходят из-за удлинения суток, Флеминг заявил в 1864 г., что нет движения более равномерного, чем вращение Земли вокруг своей оси.

4.3.2. Принятие неравномерности вращения Земли

Доказательство неравномерности вращения Земли впервые пришло из изучения орбитальных движений планет и Луны. С той степенью точности, которая требовалась для наблюдений, орбитальное движение планет может изучаться в предположении, что эти планеты и Солнце являются точечными объектами. Чисто гравитационное взаимодействие между ними является достаточно простым для того, чтобы вычислить их движения с

высокой точностью, используя, например, классическую механику, что было обычной практикой в это время. (Релятивистские теории использовались только несколько последних лет, однако, разница между ними и классической механикой незначительна в контексте данной книги). Вообще говоря, движение спутника вокруг центрального тела трактовать гораздо труднее. Причина кроется в том, что центральный объект может оказаться не совсем сферическим, а также в том, что могут существовать явления, приводящие к диссипации энергии. Такие явления незначительны в случае Луны, которую мы сейчас будем рассматривать и поэтому проигнорируем эти явления на данный момент. (Дальнейшие объяснения этого подхода будут даны в главе 8). Следующий шаг – это согласование наблюдений и теории. Другими словами, числовые значения должны быть приписаны неизвестным параметрам так, чтобы можно было установить эфемериды, дающие положение тел в форме таблицы в зависимости от времени, например, в терминах среднего солнечного времени. Что случится если время, используемое в наблюдениях, будет отличаться от равномерного абсолютного времени? Появятся расхождения между наблюденными положениями и положениями, даваемыми эфемеридами на момент наблюдения. Если такие расхождения достаточно велики, они не смогут быть объяснены случайными ошибками в наблюдениях. Ясно, что они могут быть минимизированы до некоторой степени путем согласования орбитальных параметров, которые по этой причине могут быть смещены. Если даже после этого расхождения до некоторой степени остаются и имеются ошибки в орбитальных параметрах, то в случае использования эфемерид для прогнозирования параметров ошибки должны быстро возрастать со временем.

Именно это и обнаружил Ньюкомб, когда он использовал лунные эфемериды, установленные Хансеном в 1857 г. После проверки правильности применения теории, Ньюкомб рассмотрел возможность неравномерности среднего солнечного времени. Другими словами, он поставил под сомнение вопрос о равномерности вращения Земли. Однако необходимо было сначала проверить эфемериды других планет на предмет выявления подобных же расхождений, причем таким способом, который был бы совместим с гипотезой о неравномерности вращения Земли. Это была трудная задача, так как эти эффекты для планет менее значительны, чем для Луны. И действительно, они пропорциональны истинной скорости орбитального движения. Последовавшие в 1927 г. исследования Брауна и де Ситтера [4.8] не оставили сомнений в том, что вращение Земли не может служить в качестве хороших часов.

Почти в то же время в 1929 г. Данжон в статье, замечательной своей ясностью и правильностью предсказаний, предложил использовать динамику орбитальных движений для измерения времени [4.9]. Давайте процитируем короткие выдержки.

... это законно рассматривать [вращение] Земли как глубинную причину кажущегося беспорядка, все еще царствующего в Солнечной Системе. Хотя закон Ньютона и сохраняется, он подвергается совершенно экстраординарным приключениям: с этого времени призванный измерять прохождение времени, он становится частично непроверяемым и прекращает быть тем, что должно быть строго действующим законом. [...] С тех пор мы бы требовали, чтобы эти (Кеплеровские) законы обеспечили меру для прохождения времени, так как мы не могли бы больше подвергать их экспериментальной проверке не попав в порочный круг. [...] Давайте просто надеяться, что однажды мы можем открыть хороший земной эталон времени, такой, что мы можем оставить эти типично логические трудности позади.

Хороший земной эталон появился в 1955 г. в виде атомного стандарта времени. Данжон мог также думать о таком стандарте.

К сожалению, статья Данжона была опубликована в любительском астрономическом обзоре и не получила внимания людей его круга. Так продолжалось до 1950 г. когда во время международного коллоквиума по астрономическим константам, который проходил в Париже [4.10], Клеменс сделал точное предложение по определению динамического времени. Оно было названо *эфемеридным временем* по предложению Брауэра. Определение эфемеридного времени, обсуждаемого в главе 8, было ратифицировано международным астрономическим союзом (IAU) в 1952 г.

Мы в частности увидим, что эфемеридное время имеет серьезный недостаток – не очень хорошее качество таблицы данных, с неопределенностями порядка 0,1 с. Оно может быть сравнимо с роскошными наручными часами, которые хотя и имеют отличный механизм, но не имеют нанесенной на циферблате градуировки, чтобы помочь нам измерить безупречность их поведения. Таким образом оно способно выявить только крупномасштабные и долговременные вариации во вращении Земли. В 1936 г. неравномерность вращения Земли была впервые открыта одновременно и независимо в двух лабораториях путем сравнения с искусственными часами двух типов, маятниковыми и кварцевыми. Позже было найдено, что ежегодная общая амплитуда составляет 60 мс [4.11, 4.12]. Однако можно увидеть из рис. 4.3, что годовая неравномерность находится на пределе того, что могло быть обнаружено теми часами, которые тогда использовались. Позже атомные часы доказали свою адекватность, продемонстрировав очень много других неравномерностей вращения (см. главу 8).

Все эти неравномерности приводят к изменению длительности секунды среднего времени. Для исключения некоторых кратковременных флуктуаций и годовой неравномерности, а также для уменьшения роли неопределенностей измерения, мы можем рассматривать среднее годовое

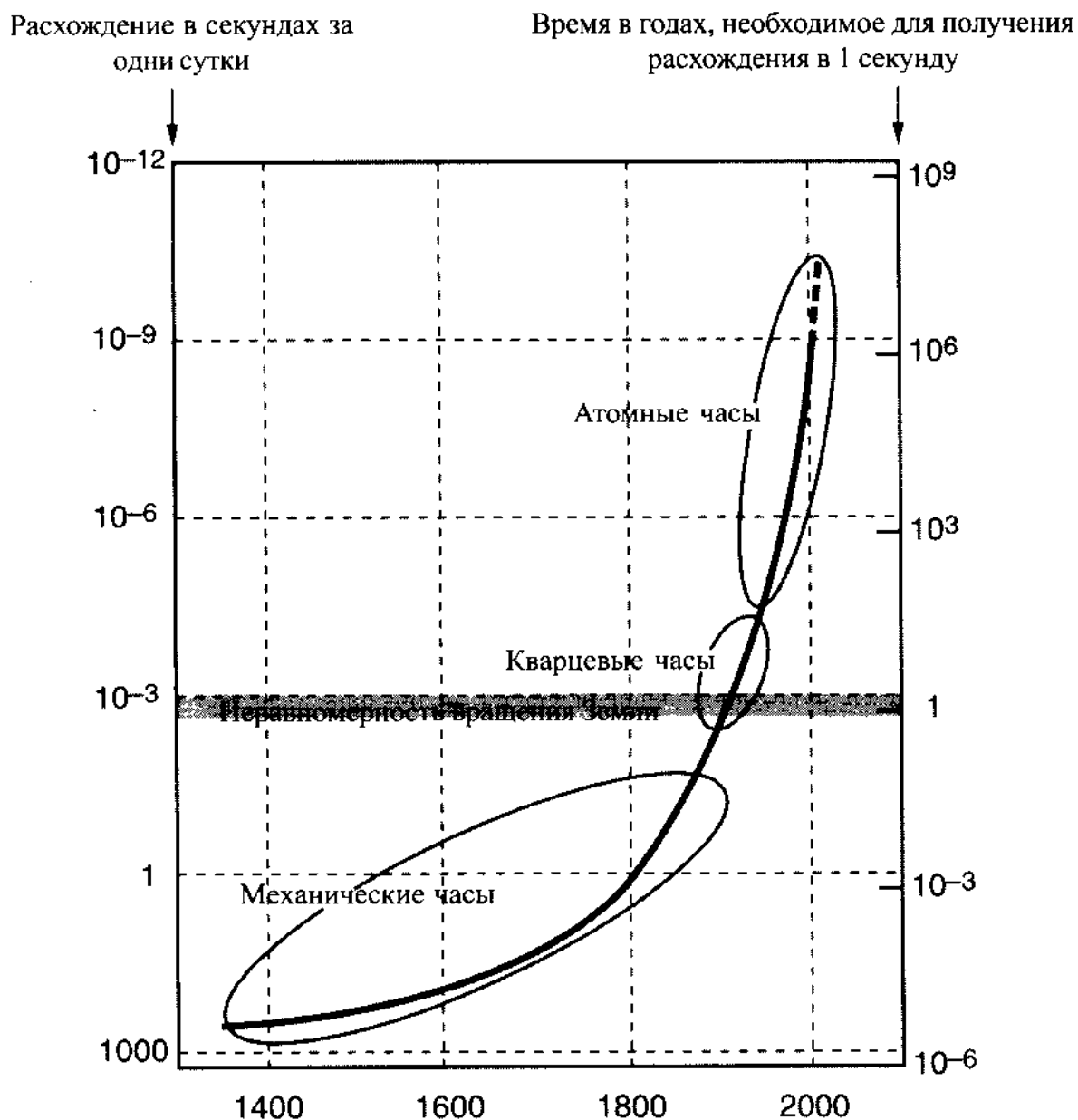


Рис. 4.3. Улучшение качества искусственных часов и сличения с часами, опирающимися на земное вращение

значение этой секунды. Тем не менее остаются непредсказуемые изменения, достигающие почти 10^{-7} с.

4.3.3. Определение секунды с 1960 по 1967 гг.: эфемеридная секунда

Как объяснялось в разделе 2.4.2, если мы хотим обосновать определение секунды на динамических явлениях, то достаточно установить продолжительность некоторых частных явлений, представив их в виде таблиц. Коллоквиум 1950 г. рекомендовал поместить такие численные величины в Ньюкомбовские *Таблицы Солнца*, и это предложение не нашло возражений. Однако, выбор опорного явления привел к некоторым сомнениям. Явлением, выбранным международным астрономическим союзом (IAU) в 1952 г.

на генеральной ассамблее, был 1900 звездный год. Его продолжительность измерялась между двумя переходами Солнца через точки установленного равноденствия (т.е. без учета точности точек равноденствия), и поэтому эта продолжительность является виртуальной константой. Однако вскоре стало ясно, что непосредственно наблюдаемый тропический год был бы более предпочтительной опорой, несмотря на его медленные вариации. Это привело к исключительному событию – выработке резолюции международного астрономического союза по переписке.

В 1956 г. международный комитет по мерам и весам, используя право, данное ему 10-й генеральной ассамблеей по мерам и весам (CGPM) в 1954 г., решил на следующее определение:

Секунда есть $1/31\,556\,925,9747$ доля тропического года на 0 января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени.

Это определение было ратифицировано на 11 CGPM в 1960 г. Век его был скоротечен, и оно было отвергнуто в 1967 г. в пользу атомного определения секунды.

Определение *эфемеридной секунды* оказалось кроссвордом для тех, кто не был знаком с астрономией. Его странное определение происходит из того факта, что средняя долгота Солнца является, согласно Ньюкомбу, квадратичной функцией эфемеридного времени (ЕТ). Тропический год на 0 января 1900 г. в 12 часов эфемеридного времени, является фиктивным годом, соответствующим скорости средней долготы на эту дату.

Рассмотрим более внимательно численные величины, используемые в определении эфемеридной секунды. Ньюкомбовские таблицы были основаны на астрономических наблюдениях 19 столетия. Естественно, что они были датированы с помощью среднего солнечного времени. Продолжительность эфемеридной секунды поэтому примерно равна средней продолжительности секунды среднего времени этого столетия. Однако в 1960 г., когда эфемеридная секунда была принята как единица времени для системы СИ, новая секунда была короче, чем используемая в то время секунда среднего времени (усредненная за 1960 г.) на $1,4 \times 10^{-8}$ с и примерная величина этого расхождения была известна во время принятия решения. Принятие такого решения противоречило обычной метрологической практике согласования последовательных определений единиц таким способом, чтобы они давали неизменяемую величину после изменения определения по крайней мере в пределах экспериментальных ошибок. В 1960 г. не предполагали, что это могло бы привести к печальным последствиям для системы всемирного координированного времени, которой мы сейчас пользуемся.

Эфемеридная секунда определяется единственным способом, но ее корни находятся в прошлом 1900 г. Ее физическая реализация на данный момент зависит от астрономических эфемерид. Оценивают, что с 1960 г. она могла бы быть реализована в пределах $\pm 2 \times 10^{-9}$ с путем анализа астрономических наблюдений, занимающих несколько лет. По сравнению с секундой среднего времени воспроизводимость повысилась бы в 50 раз.

4.3.4. Эфемеридное время: шкала сохраненная для астрономов

Красота и простота эфемеридного времени вызывает некоторый энтузиазм. В 1966 г., когда атомные часы уже работали в течение 11 лет, Вуллард и Клеменс писали [4.13]: «Традиционная практика измерения времени по истинным движениям небесных тел может быть теперь основана на точном динамическом фундаменте путем принятия в качестве первичного стандарта меры времени, неявно определенной через законы движения». История эфемеридного времени отягощена длинными сериями проблем и недопониманий, как мы увидим в главе 8.

Эфемеридное время никогда не было доступно и никогда не использовалось в повседневной жизни. Фактическое его применение было ограничено нуждами астрономической динамики. Никогда не было официальных организаций, устанавливающих централизацию и процесс его измерения так, чтобы произвести единственную реализацию, которая могла бы быть принята по соглашению. Давайте подчеркнем, что до 1960 г. официальная шкала времени, всемирное время, и определение секунды (среднего времени) последовательно основаны на вращении Земли. Следовательно, распространение шкалы времени эффективно обеспечивало секунду СИ. Вместе с принятием эфемеридного времени ЕТ начался период несовместимости между шкалой времени UT и единицей времени. Атомное измерение времени положило конец этой путанице в 1971 г.

4.4. Измерение атомного времени

4.4.1. Атомные стандарты частоты и определение атомной секунды (1967 г.)

Наука постепенно познавала, что различные химические образцы состоят из молекул, которые в свою очередь состоят из атомов. Со временем было установлено соотношение между структурой излучаемого спектра и атомным или молекулярным составом возбужденных газов. Предполагаемая универсальность атомных свойств могла затем быть перенесена на эти спектры. Максвелл в 1873 г. и Кельвин в 1879 г. предположили, что длины волн спек-

тральных линий и периоды соответствующих излучений могли быть использованы для того, чтобы определить единицу длины и единицу времени соответственно [4.14]. Эти предложения были воистину пророческими, если мы припомним, что определение метра было основано на длине волны спектральной линии только с 1960 г. (и до 1983 г.). В настоящее время в высоко-специализированных лабораториях оптические излучения используются для создания сетки опорных частот. Благодаря недавно достигнутому прогрессу в технике сличения СВЧ и оптических частот весьма вероятно, что оптические стандарты времени и частоты вскоре будут конкурировать с нынешними атомными стандартами, работающими в сантиметровом диапазоне.

Как и во многих других областях, знания, которые мы имеем сейчас в электромагнетизме, квантовой физике, атомной физике и спектроскопии, и которые привели к изобретению и развитию стандартов времени и частоты, были приобретены в конце девятнадцатого и первой половине двадцатого веков. Мы можем подвести итоги этих лет прогресса ссылками на тех физиков, которые внесли ключевые вклады. Планк создал основы квантовой теории, в то время как Эйнштейн, кроме многих других значительных вкладов, включая теорию относительности, ввел понятия фотонов и стимулированного излучения. Бор применил квантовую теорию к объяснению атомной структуры и ввел понятие энергетических уровней. Герц первым создал радиогенератор и обнаружил радиоволны. Де Бройль, Гейзенберг и Шредингер создали и развили волновую механику. Штерн сделал вклад в кинетическую теорию газов и открыл вместе с Герлахом магнетизм атомов и его пространственное квантование.

Технологический прорыв, который начался в 1930-х годах и который подстегивался далее нуждами радиосвязи и радарным обнаружением во время второй мировой войны, также сыграли ключевую роль. В 1945 г. стала возможной генерация радиоволн до частот 30 ГГц и измерение их частоты. Эти разработки стали отправной точкой для главного прорыва в направлении прецизионной, внутригерцовой спектроскопии, выполненной Таунсом и Паундом.

Первые атомные часы были созданы в 1948 г. Лионом в США в Национальном Бюро Стандартов, известном теперь как Национальный Институт Стандартов и Технологии [4.15]. Опорными линиями служили интенсивные линии поглощения в молекулах аммиака, лежащие в диапазоне вблизи 24 ГГц. Молекулярный резонанс управлял частотой кварцевого генератора, который затем использовался для генерации импульсов времени. Однако резонанс был уширен доплеровским эффектом и столкновениями. Его долговременная стабильность была не лучше, чем у кварцевых часов и исследования в этом направлении были прекращены.

Цезиевые часы являются результатом работы, выполненной Раби и его студентами [4.16, 4.17]. В конце 1930-х Раби работал над техникой

магнитного резонанса в атомных и молекулярных пучках. Этот метод, первоначально разработанный для измерения магнитных моментов, вскоре стал использоваться для изучения радиочастотных спектров атомов и молекул. Первое экспериментальное доказательство существования переходов в сверхтонкой структуре атомов цезия было получено в 1940 году. Возможность использования метода магнитного резонанса в атомных пучках для создания атомных часов уже обсуждалась в группе Раби в 1939 году. Кажется хорошо установленным фактом, что Раби представил эту идею широкой публике на конференции Американского Физического Общества в 1945 году. Фактически он предложил использовать атомы цезия. В 1950 г. Рэмси улучшил условия для взаимодействия между электромагнитными волнами и атомами путем введений двух разнесенных осциллирующих полей. Используя экспериментальные методы, разработанные Раби и Рэмси, в 1955 году в Национальной Физической Лаборатории в Великобритании Эссен и Пэри построили первые надежные цезиевые часы [4.18]. Эти часы регулярно использовались для калибровки частоты кварцевых генераторов. В то же самое время, Захариас, один из студентов Раби, разработал в Массачусетском Технологическом Институте прототип промышленных атомных часов. В этих часах атомный резонанс использовался для подстройки частоты кварцевого генератора с помощью петли обратной связи. Первые атомные промышленные часы на основе этого прототипа были произведены Национальной Компанией в 1956 году под названием Атомихрон [4.14].

Экспериментальное подтверждение принципа усиления путем стимулированной эмиссии излучения впервые было получено в 1954-55 годах Таунсом в США и Басовым и Прохоровым в СССР. Они впервые построили генерирующий мазер (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), используя переход в молекуле аммиака на частоте 24 ГГц. Эти мазеры рассматривались на предмет использования их в атомных часах, но их довременная нестабильность порядка 10^{-10} была слишком велика и идея не получила дальнейшего распространения [4.19]. Тем не менее эти исследования были очень полезны для указания путей создания твердотельного мазера Бломбергом в 1956 году и затем лазера, разработанного Шавловым и Таунсом в 1958 году [4.17].

Водородный мазер, разработанный Рэмси, является результатом эволюции метода магнитного резонанса Раби. Первоначальная цель состояла в сужении резонансной линии атома цезия путем увеличения времени нахождения между двумя осциллирующими полями [4.17]. Для этого атомы цезия испытывали столкновения и задерживались на некоторое время в ячейке с перегородками и стенками, покрытыми парафином. Позднее было обнаружено, что лучше использовать тефлоновое (фторопластовое) покрытие. Идея состояла в том, чтобы атомы водорода

подвергались огромному количеству столкновений со стенками и не испытывали значительных возмущений. Было также осуществлено детектирование атомов путем стимулированного излучения и, таким образом, в 1959-60 годах были изобретены водородные мазеры. Этот успех основан на том, что достигается очень большое время жизни атомов в ячейке, покрытой фторопластом (около 1 с), и поэтому получается очень большой период взаимодействия с резонансной полостью, что способствует стабильности частоты. Промышленный вариант водородного мазера вскоре был разработан Вессо и изготовлен на Объединении Вариан.

Так как для многих применений требуются компактные атомные стандарты времени и частоты, то с момента открытия оптической накачки проведено исследование возможности ее применения в часах. В 1950 г. Кастлер предложил оптический метод для того, чтобы заменить использовавшиеся в те времена для селекции и детектирования атомных состояний мощные неоднородные магнитные поля производимые в те дни с помощью громоздких магнитов. В 1953 году Дике показал, что доплеровское уширение микроволновых резонансных линий может быть практически устранено путем смещения атомов с нейтральными газами, ограничивающими их скорость рассеяния. В 1956 году Демелт обнаружил, что микроволновый резонанс проявляет себя через уменьшение в интенсивности света накачки, проходящего через ячейку, содержащую атомы и буферный газ [4.15, 4.16]. Это сделало возможным создание компактных рубидиевых часов, и они вскоре стали производиться многими изготовителями. Они и теперь являются наиболее распространенными атомными часами. С 1980-х годов методы оптической накачки стали применяться к цезиевым пучковым часам благодаря разработке полупроводниковых лазеров.

Двух- или трехмерное ограничение ионов в неоднородном переменном электрическом поле разрабатывалось с 1955 г. Паулем. Долговременное удержание, полученное таким способом, является благоприятным для наблюдения резонансов в микроволновом диапазоне. Именно Демелт в 1965 году использовал такие ловушки для прецизионных измерений частот переходов в сверхтонкой структуре иона $^3\text{He}^+$. В 1969 году Мэйжор предложил объединить методы оптической накачки и методы удержания ионов для стандарта времени и частоты на ионах ртути $^{199}\text{Hg}^+$. Такой стандарт впервые был реализован в 1979 году в лаборатории атомных часов в Орсе (Франция). В 1983 году несколько улучшенных работающих образцов было произведено на фирме Хьюлетт-Паккард под руководством Катлера. Изучение стандартов частоты на удержанных ионах продолжается с использованием переходов и в микроволновом и в оптическом диапазонах. В некоторых из этих стандартов используется метод лазерного охлаждения, предложенный в 1975 году Вайнлендом и Демелтом.

Через несколько лет Хэнш и Шавлов описали эффективный способ замедления и уменьшения тепловых движений нейтральных атомов. Метод впервые был использован для замедления атомного пучка. Затем в 1989 году Вьеман и его группа в университете Колорадо преуспели в применении этого метода к атомам цезия, содержащимся в ячейке при малых давлениях. Мячик из атомов с кинетической энергией теплового возбуждения, соответствующей температуре порядка 1 милликельвин был пойман на перекрестье шести лазерных лучей. Несколько групп в США и Франции сделали экспериментальный и теоретический вклады в улучшение техники для охлаждения, удержания и управления движением атомов. Сейчас уже возможен запуск холодных атомов цезия вверх со скоростью порядка 1 м с^{-1} . Таким образом стало возможно их использование в цезиевых часах, в которых преимущество медленных атомов является решающим. Впервые первичный стандарт частоты на холодных атомах цезия был создан в Париже (Франция) в 1996 году Клероном из лаборатории первичного времени и частоты, Соломоном из Высшей Технической Школы и соответственно их исследовательскими группами.

Нобелевский комитет наградил некоторых физиков, которые непосредственно внесли вклад в изобретение и исследование атомных часов: И.Раби (1944 г.), С.Таунс, Н.Басов, и А.Прохоров (1964 г.), А.Кастлер (1966 г.), Н.Рэмси, В.Пауль и Х.Демелт (1989), С.Чу, С.Козн-Тануджи и В. Филлипс (1997 г.), даты соответствуют времени присуждения премии.

В главе 6 объясняется, как работают различные типы атомных часов. Мы увидим, что именно цезиевые часы с лазерным охлаждением атомов дают в настоящее время наивысшую точку, но их превосходству угрожают стандарты на холодных атомах рубидия. Точность является ключевой идеей метрологии. Здесь она понимается, как способность воспроизводить частоту, имеющую идеальное соотношение с частотой перехода невозмущенного атома. Она исключает всякие дрейфы частоты. На время написания книги цезиевый стандарт играл привилегированную роль в фундаментальных измерениях частоты. Давайте рассмотрим, как происходила эволюция его точности, и обрисуем последствия этой эволюции для определения секунды.

Первые цезиевые стандарты имели неточности частоты с относительной величиной порядка 10^{-9} . (Неопределенности и малые изменения (вариации) обычно выражаются в относительных величинах. Мы больше не будем заострять внимание на этом в дальнейшем, так как отсутствие названия физической величины будет достаточным индикатором употребления относительной величины). Прогресс достигался стремительно и, как мы увидим, стандарты необходимо было сличать друг с другом, чтобы оценить их взаимное согласие. Очевидно, частота перехода ν_{Cs} должна была быть выражена в терминах единиц времени там, где это возможно. В своих ранних исследовательских работах Эссен и Пэри использовали

секунду среднего времени, которая производилась в реальном времени. Эфемеридная секунда уже была определена, хотя еще и не признана как единица СИ. Однако, как мы уже отмечали, она могла быть реализована только как результат длительного анализа. Этот анализ был выполнен Марковицем и др. [4.20], и в 1958 году было получено значение частоты

$$\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \pm 20 \text{ Гц.} \quad (4.2)$$

Единица Гц, упомянутая здесь, основана на эфемеридной секунде. Неопределенность ± 20 Гц была почти полностью обусловлена неопределенностью реализации эфемеридной секунды.

Естественно, что различные лаборатории, изучающие атомные стандарты частоты, охотно согласились на единственное значение частоты для цезия. Значение частоты, полученное Марковицем и др. было немедленно принято по соглашению в том смысле, что она рассматривалась строго как точная опорная частота для выражения других частот. Это неявным образом определяло неофициальную атомную секунду. И действительно, она была признана как таковая на 12-й генеральной конференции по мерам и весам в 1964 году, хотя и чувствовалось, что еще не пришел момент для принятия нового определения секунды в предвидении дальнейшего значительного прогресса, который мог бы вскоре произойти. Однако в осознании неотложности ситуации переход к сверхтонкой структуре цезия 133 был принят для использования в качестве стандарта и вышеуказанное значение было приписано его частоте.

В 1967 году неопределенность частоты атомных стандартов была уменьшена до 10^{-12} и было решено выйти с предложением об атомном определении единицы времени. Это определение было принято на 13-й генеральной конференции по мерам и весам в 1967 году:

Секунда есть промежуток времени, состоящий из 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133.

Определение так называемой эфемеридной секунды было тогда же аннулировано. Как было со временем показано, атомная секунда была согласована с эфемеридной секундой настолько, насколько это было возможно. Последующие измерения эфемеридного времени подтвердили эту согласованность. Текущая секунда таким образом имеет длительность, которая соответствует длительности секунды среднего времени, согласно усреднениям данных девятнадцатого столетия.

Улучшение цезиевых стандартов продолжалось. В 1976 году неточности лучших стандартов, находившихся тогда в Германии, были уменьшены до нескольких долей от 10^{-14} . Ситуация сохранялась на этом уровне

вплоть до 1995 года, когда новому этапу в подъеме к улучшенной точности был дан старт тем открытием, что атомы могут быть охлаждены лазером. Эта техника, как мы увидим в главе 6, уже интегрировалась в очень точные цезиевые часы.

Применение измерений времени находится на подъеме потому, что промышленность способна производить высококачественное оборудование для измерений времени. В частности, цезиевые стандарты имеются в продаже и, хотя они менее точны, чем лучшие лабораторные инструменты, зато они менее громоздки, имеют высокую стабильность частоты и могут работать непрерывно с высочайшей надежностью. Строго говоря, это цезиевые часы, нанизывающие вместе секунды. Существование таких часов делает реально выполнимой задачу: – основать мировую шкалу времени на атомных переходах, а не на движениях небесных тел. Это подводит нас к рождению Международного Атомного Времени.

4.4.2. От Всемирного Времени к Международному Атомному Времени

(а) Возраст сличений частоты и интегрированное атомное время

Первый цезиевый стандарт частоты работал спорадически. Он использовался время от времени, чтобы прокалибровать частоту независимых кварцевых часов, которые между такими измерениями сохраняли память об атомной частоте. Затем стало возможным установить шкалу времени, основанную на частоте атомного перехода, т.е. атомное время. Давайте обсудим некоторые детали этой работы. Мы можем тогда вывести свойства атомного времени, реализованного этими методами и ввести полезные определения, как представлено ниже.

Генератор характеризуется *номинальной частотой* ν_0 , установленной или объявленной его производителем и соотносящейся с определением секунды. Его фактическая частота несколько отличается и изменяется. Она обозначается через $\nu(\theta)$, где θ дата на шкале времени θ , взятой за опорную. Мы увидим, что от θ требуется несколько метрологических характеристик, которые могут, например, быть взяты из всемирного времени. Так как номинальные частоты различных генераторов не являются одинаковыми, то полезно определить:

- *нормализованную частоту* $\Phi(\theta)$ через

$$\Phi(\theta) = \frac{\nu(\theta)}{\nu_0}, \quad (4.3)$$

которая близка к единице;

- относительную отстройку частоты $y(\theta)$ через

$$y(\theta) = \Phi(\theta) - 1, \quad (4.4)$$

которая мала по сравнению с единицей.

Для того чтобы сконструировать атомную шкалу времени должна быть установлена величина номинальной частоты перехода ν_{Cs} . Она может оказаться той величиной, которая будет использована для того чтобы определить секунду, но в начале это было неизвестно и могли использоваться различные величины. Если частота внешних кварцевых часов есть ν_Q , то эпизодические сличения частот в даты θ_i могут быть выражены в терминах разности между нормализованными частотами,

$$y_{Cs}(\theta_i) - y_Q(\theta_i) \equiv [y_{Cs} - y_Q](\theta_i). \quad (4.5)$$

Эти данные являются фактически средними величинами на дату θ_i . Начиная с этих измеренных величин, функция $[y_{Cs} - y_Q](\theta)$ должна быть определена настолько точно, насколько это возможно. Атомное время τ_A затем получается путем коррекции показаний τ_Q кварцевых часов:

$$[\tau_A - \tau_Q](\theta) = [\tau_A - \tau_Q](\theta_0) + \int_{\theta_0}^{\theta} [y_{Cs} - y_Q](\theta) d\theta. \quad (4.6)$$

Отсюда понятно почему на шкалы времени, полученные таким способом, часто ссылаются как на *интегрированные шкалы времени*. Начало τ_A является произвольным. Хотя вначале оно было выбрано в разных лабораториях по разному, в конце концов в 1960 году оно было установлено по соглашению так, что τ_A должно быть равно всемирному времени UT2 на 1 января 1958 года в 0 часов по UT2. Что же касается значения ν_{Cs} , то все согласились использовать величину, полученную Марковицем и др. Ясно, что шкала атомного времени зависит от того, какие предположения были сделаны при интерполяции частоты, а также какие числовые методы были приняты, чтобы выполнить интегрирование. Другими словами, атомное время определено не однозначно.

Когда в 1955–1960-х годах первые атомные шкалы были построены таким путем, то в это время уже использовались очень низкие частоты (VLF) [сверхдлинные волны (СДВ), 10–30 кГц], для целей дальней радиосвязи и навигации. Несущие частоты были стабилизированы по кварцевым генераторам. Эти частоты очень точно принимались методом слежения за фазой. Таким образом эти частоты составляли хорошие реперы (опорные частоты) для сравнения различных частот, используемых в лабораториях. Сличения частоты стали таким образом доступны на межконтинентальных расстояниях. Сличения времени однако оставались неопределенными, так как даже если в начальный момент сличения были доступны, практически было невозможно из-

бежать потери некоторых периодов несущей частоты, так что в течение года могло проскальзывать от нескольких микросекунд до десятков микросекунд.

Поэтому пионеры атомного времени имели возможность сличать только частоты стандартов со множеством неопределенностей. Сюда включались недостатки локального способа интерполяции частоты, плохое знание распространения волн и потери фазы. Тем не менее с помощью вычислений можно было сконструировать стандарт средней атомной частоты, который, возможно, был лучше, чем каждый из индивидуальных стандартов, и производил среднее интегрированное атомное время. Это время локально материализовалось через коррекцию показаний одних из часов, участвующих в сличениях. Этот метод использовался, в частности, в международном бюро времени вплоть до 1969 года [4.21].

Такое интегрированное атомное время первоначально было использовано для изучения неравномерности всемирного времени, т.е. вращения Земли. Оно также использовалось для стабилизации сигналов времени передающих радиостанций, позволяя, насколько возможно лучше экстраполировать всемирное время по сравнению с предыдущими часами. Напротив, его применение в других областях, таких как небесная динамика, в частности, не вызвало какого-нибудь энтузиазма. Общее мнение астрономов было хорошо выражено в работе, опубликованной в 1966 году [4.13]:

Атомные часы обеспечивают только стандарт частоты; он определяет единицу времени, но не непрерывный счет единиц, необходимый чтобы определить интервал, прошедший от любой начальной эпохи в прошлом. Астрономические определения времени существенны для определения эпох и опорных моментов времени к ним, так как не существует искусственных часов, которые могли бы бесконечно долго продолжать свою работу наподобие небесных движений.

(b) Эпоха современного атомного времени

Будет правильным, если мы скажем, что подъем атомного времени произошел главным образом благодаря техническим совершенствам, произведенным в конструкциях атомных часов и разрастанию их общего числа. Но этого не произошло бы вовсе без точных методов сличений их показаний, без *сличений времени*, и без возможности передачи времени таким способом, чтобы можно было осуществить *синхронизацию*. Обычные радиосигналы времени, такие, как они появились в начале двадцатого столетия, и которые используются до сих пор, страдают от некоторой неопределенности при учете времени, необходимого для их распростра-

нения. Эта неопределенность, оцениваемая величиной порядка 1 мс, совершенно неприемлема, если мы надеемся использовать свойства атомных часов на больших расстояниях. Например, во времена, когда было принято атомное определение (1967 г.), потребовалось бы тридцать лет усреднения, чтобы получить выигрыш от той высокой точности лучших цезиевых часов с помощью таких сигналов.

Для того чтобы установить порядки величин, относящихся к метрологическим проблемам, вычлененным в этой работе, мы резонно можем предположить, что неопределенность частоты, обусловленная сличениями времени на расстоянии, за один день сличений не должна превышать неточность стандартов частоты. Для стандартов, имеющих точности 10^{-12} , неопределенность сличений должна быть меньше 0,1 мкс, в то время как для стандартов с 10^{-14} неопределенность должна быть меньше 1 нс. Это действительно очень строгие требования. Почти всегда было невозможно согласовать точность сличения времени со стабильностью и точностью атомных часов.

Тем не менее, в 1962 году экспериментальная передача сигналов телекоммуникационного спутника Телстар обеспечила линию передачи времени между Великобританией и США с точностью до 1 мкс (для космического сегмента) [4.22]. Хотя после этого эксперимента последовало еще много других экспериментов, применение этого метода все еще оставалось на уровне исследований. Как упоминается в цитатах в конце последнего раздела, одна из особенностей величины время заключается в том, что его измерение требует непрерывных усилий. Поэтому методы, необходимые для сличений, должны быть простыми и достаточно дешевыми, чтобы их можно было применять изо дня в день.

Практическое решение было найдено примерно в 1968 году путем использования системы Лоран-С. Сигналы передаются на расстояния до 1000 – 2000 км наземными волнами и поэтому имеют хотя и неизвестные априори, но очень стабильные задержки распространения (с возможными вариациями ± 1 мкс). Также успешно и даже с большей точностью, использовался локальный одновременный прием обычных телевизионных сигналов. Поэтому появилась идея определения задержек распространения и их эпизодической проверки. Это было сделано с помощью перевозимых по дорогам и с помощью гражданской авиации работающих цезиевых часов. Этот метод будет описан в главе 5. А сейчас давайте только скажем, что большие регионы глобуса, включая Северную Америку и Европу, могут быть покрыты сетью сличений времени, рутинно работающей с точностью до ± 1 мкс.

С этого момента и далее средние атомные шкалы могут быть сконструированы из показаний часов. Эти атомные шкалы были реализованы путем вычисления поправок к показаниям участвующих часов. Это при-

вело к новой проблеме. Должны быть установлены оптимальные алгоритмы для того, чтобы построить шкалы времени из данных с переменным качеством (см. главу 7). 1 января 1969 года международное бюро времени заменило свой стандарт средней частоты на среднее атомное время, без какого-нибудь перерыва в его атомной шкале. Для того чтобы следовать в русле технического прогресса в стандартах и передачах времени, в 1973 году международное бюро установило алгоритмы и мировую координацию, которая с незначительными модификациями живет и до сих пор (см. главу 7). Значительное улучшение в сличениях разнесенных часов было обеспечено в 1983 году спутниковой системой, известной как глобальная система навигации и определения положения (GPS). GPS постепенно вытеснила Логан-С из лабораторий времени и уменьшила неопределенности до нескольких наносекунд. Недавно стал оперативно использоваться для сличений времени обмен сигналами, переизлучаемыми телекоммуникационными спутниками, что привело к улучшенным результатам, особенно для частотных сличений.

Национальные организации, в частности, Военно-морская Обсерватория США в Вашингтоне (USNO), также производят атомную шкалу времени. Необходимость согласия о единственном репере привело ряд ключевых международных организаций к рекомендации об использовании шкалы международного бюро времени, включая: международный астрономический союз (IAU) в 1967 г., международный научный радиосоюз (URSI) в 1969 году, и международный консультативный комитет по радио (CCIR) в 1970 году. Предельное признание пришло от организаций метрической конвенции с определением *Международной Атомной Шкалы* (TAI), сформулированной в 1970 году международным комитетом по мерам и весам (CIPM) в следующей редакции:

Международное Атомное Время (TAI) есть временная опорная координата, установленная международным бюро времени на основе показаний атомных часов, работающих в различных учреждениях в соответствии с определением секунды, являющейся единицей времени в международной системе единиц.

Это определение, или даже, это официальное признание было ратифицировано на 14-й генеральной конференции по мерам и весам в 1971 году. После переходного периода, который длился с 1955 по 1971 годы, измерения времени стали, наконец, опять корректными, с единицей времени и мировой шкалой времени, основанными на одном и том же физическом явлении, на оговоренном атомном переходе. Время, как и другие фундаментальные физические величины, стало теперь измеримым с помощью лабораторных стандартов. Ничто не препятствовало теперь тому,

чтобы оно заняло соответствующее место среди других величин в международном бюро мер и весов (BIPM) в Сэвре (Франция). И это случилось в 1988 году.

Так как атомная шкала международного бюро времени поддерживалась непрерывно с 1955 года, и хотя тех пор вычислительные методы с сильно эволюционировали, она была задним числом названа TAI.

В то время как стабильность атомных стандартов времени и TAI улучшалась, стало ясно, что вскоре потребуется более полное определение TAI в контексте общей теории относительности. Мы должны упомянуть исключительно удачные идеи, выдвинутые на эту тему Беккером еще в 1967 году [4.23]. Но они не были востребованы до 1980 года, когда консультативный комитет по секунде (CCDS) (международный комитет по определению секунды CCDS при международном комитете по мерам и весам CIPM) дал релятивистское определение TAI, определение, которое было довершено международным астрономическим союзом (IAU) в 1991 году в его резолюции A4, и которое было незначительно модифицировано в соответствии с переопределением земного времени (TT) в 2000 году (см. раздел 3.3.2e). (CCDS с 1997 года преобразовался в международный консультативный комитет по времени и частоте CCTF). Важное последствие прогресса в измерениях времени для истории науки состоит в том, что общая теория относительности стала существенным инструментом в метрологии и ее практических приложениях. Действительно, тематика «метрология и относительность» является предметом докладов, подготовленных при покровительстве CCDS (консультативный комитет по определению секунды) [4.24].

4.5. Всемирное координированное время

В тот период, когда устанавливалась международная атомная шкала, постепенно созревала идея координации передач радиосигналов времени (которые постоянно излучали сигналы всемирного времени).

Инициатива была предпринята Великобританией и США. В обеих этих странах с августа 1959 года сигналы передавались так, чтобы пометить локально полученные атомные шкалы времени. В это время значение частоты перехода цезия, которое позже будет использовано для определения секунды, уже было общеупотребительно. Отметим, что это значение связано с эфемеридным временем. Следовательно, было замечено, что шкалы атомного времени идут быстрее, чем всемирное время. Для того чтобы построить атомное время в примерном согласии с всемирным временем, должна быть введена относительная отстройка частоты y_U . Одно и то же значение y_U было выбрано в обеих странах и сигналы времени изначально были синхронизированы. Так как всемирное время имеет не-

предсказуемые вариации, необходимо было подстроить время чтобы избежать слишком частых изменений y_U . Эти подстройки выполнялись с шагом в 50 мс в согласованные времена в соответствии с наблюдениями всемирного времени.

Так как многие сигналы времени имеют секундные маркеры, непосредственно связанные с несущей (например, в излучении на 10 МГц, секундный маркер появляется после каждых 10^7 периодов), то атомная частота могла быть найдена из y_U или путем использования расстояния между маркерами, или путем измерения несущей частоты.

К этим скоординированным усилиям вскоре присоединились другие страны и уже в 1960 году международные радиосоюз (URSI) предложил международному бюро времени, которое отвечало за унификацию всемирного времени, устанавливать отстройку y_U на каждый год. Соответственно, международное бюро времени определяло даты, когда будут вводиться скачки времени.

Эта система довольно быстро прогрессировала. В 1963 году скачки времени в 50 мс были заменены на 100 мс. До 1965 года шкала времени была более или менее общей для всех координированных сигналов, и она была спонтанно поименована как *всемирное координированное время* (UTC), хотя еще и не было дано строгое определение. Например, международное бюро времени рассматривало UTC как усреднение излученных сигналов координированного времени. Важным шагом в развитии UTC было решение международного бюро времени ввести с 1 января 1965 года определение UTC через математическую связь с атомным временем международного бюро, которое впоследствии превратилось в TAI. Эта связь представлена в виде

$$UTC - TAI = y_U(TAI - TAI_0) + B, \quad (4.7)$$

где TAI_0 есть произвольно установленная дата начала и B — константа, изменяемая шагами так, чтобы поддерживать условия

$$|UTC - UT2| < \epsilon, \quad (4.8)$$

где UT2 является всемирным временем, включающим поправки на его квази-периодические годовые неравномерности и ϵ есть оговоренное отклонение.²

Это определение UTC использовалось до 1972 года. Однако необходимость в отстройке частоты y_U , иногда изменяющейся в начале года, становилась все более и более обременительной. (Наибольшие изменения были

² Отметим, что такая шкала времени как UT1 обозначенная своим акронимом, в написании заглавными буквами. Ее чтение является примером спецификации членов шкалы времени написанной курсивом, например, $UT1(\theta)$. Аргумент θ , значение θ не всегда показаны точно.

сделаны 1 января 1966 года, когда перешли от $-1,5 \times 10^{-8}$ к $-3,0 \times 10^{-8}$.) Одним из недостатков было то, что некоторые передатчики опирались на несущие частоты, связанные с частотами UTC, так что на этих передатчиках должны были проводиться технические изменения. По этой причине международный консультативный радиокомитет (IRCC) в 1966 году принял решение, что некоторые сигналы времени передавались бы с $y_U=0$ за счет повторяющихся скачков времени. Размер этих скачков был установлен на 200мс и они вводились только в начале месяца, если было необходимо удерживать ϵ меньше чем 200мс. Это *ступенчатое атомное время* было принято только в Германии, а также на одном передатчике в США. Важно же это, главным образом потому, что был подготовлен путь, одобренный в 1972 году и используемый в настоящее время в UTC.

Мы можем поинтересоваться, почему сигналы времени, а, следовательно, мировое время не были подстроены под международное атомное время, когда эта шкала времени утверждалась официально в 1971 году. Конечно, TAI идет быстрее по сравнению с всемирным временем UT. Через какое-то длительное время 12 часов дня наступят заметно раньше, чем солнце пересечет гринвичский меридиан. Однако такое отклонение порядка одного часа набежит через каждую тысячу лет. Когда мы осознаем, что мы одобрили изменение показаний часов во многих странах на один час дважды в год, и, следовательно, устанавливаем летом время на час вперед по сравнению с солнечным временем, идея подстройки часов на один час назад каждые десять столетий покажется незначительной подстройкой.

Возражения против всеобщего использования TAI являются немного сентиментальными, так как возвращают нас к исходному положению — заветной мечте, что время определяется движениями звезд и немного техникой. Мореходы, использующие астрономические средства навигации были очень сильно настроены против идеи не передавать больше всемирное время, которое им нужно для определения их положения. Поправка, необходимая для того чтобы получить всемирное время UT из TAI может быть предсказана до ближайшей секунды на несколько лет вперед, и этого достаточно для астрономического определения положения в море. Однако морские организации считают, что риск ошибки (например, поправка была сделана в неправильном направлении) слишком велик. Также рискованно передавать два типа сигналов времени, одни в UT и другие в TAI. В 1970 г. после долгих дебатов и больших споров [4.25], Международный консультативный комитет по радиосвязи CCIR был готов рекомендовать, что UTC должно быть определено с $y_U=0$ и B равное целому числу секунд, и изменяемое скачками секундами. Сначала расхождение ϵ (относящееся теперь к UT1, а не к UT2), было установлено на уровне 0,7 с, прежде чем установили 0,9 с в 1974 году. Более

того, сигналы времени должны нести кодированную информацию, которая может быть использована, чтобы получить UT1 в пределах 0,1 с.

Новая UTC была принята согласно правилам, детали которых определены CCIR (см. главу 7). Она официально одобрена на 14-й генеральной конференции по мерам и весам в 1971 году и была внедрена в практику с 1 января 1972 года, путем введения скачков времени, равных скачкам, округленным до секунды. С тех пор она и используется. Система с нарастающим напором подвергается критике, потому что скачущие секунды вводятся с интервалом от одного до двух лет в зависимости от причуд вращения нашей планеты, что является действительным недостатком. Набирает силу идея принятия непрерывной шкалы времени, например путем замораживания на какую-то дату разности между TAI–UTC (2002 год). Но все еще невозможно сказать, каким будет UTC. Человечество еще возможно не готово перейти к чисто атомному времени и поэтому вращение Земли продолжает управлять делами в мире, по крайней мере в случаях, касающихся общего использования времени.

4.6. Финальные заметки

С 1972 года измерения времени официально покоятся на сверхтонком переходе в атоме цезия, но даже если это так, вращение Земли все равно следует приближенным путем. Когда в 1982 году открыли миллисекундные пульсары, то некоторые полагали, что астрономическая мера времени вернется обратно. Мы увидим в главе 8, что такие тела не могут обеспечить определение секунды, каким бы регулярным не было их вращение.

Следует отметить то, как одно определение секунды следует за другим. Под давлением научных и технических требований применение нового определения секунды может даже предшествовать официальному принятию.

Положение для шкал времени совершенно другое. Новая шкала создается в связи с текущим определением секунды, но ранее сформированная шкала не исчезает. Это в какой-то мере может быть объяснено их историческими ролями. Они использовались для датирования событий и последовательно остаются в архивах. Естественно, имеются все причины поддерживать такие архивы в их первоначальной форме. Это справедливо для астрономических наблюдений, датированных в соответствующее время тех мест, где они проводились. Если мы хотим их использовать, даты могут быть преобразованы во всемирное время, или эфемеридное время, хотя это приводит в некоторой степени к интерпретации и результат поэтому неоднозначен, в то время как оригинальные документы остаются аутентичными. Что же касается атомного времени, то оно существует только с 1955 года.

Другая причина в том, что разные шкалы времени, основанные на разных физических явлениях, сохраняют присущее им значение. Всемирное время представляет вращение Земли. Эфемеридное время и различные координатные времена, определенные в контексте общей теории относительности, являются динамическими временами, связанными с динамическими теориями. Кто знает, может быть их долговременные сравнения с атомным временем приведут к исключительно важным данным? В том же духе теперь конструируется *пульсарная шкала*.

Выживание шкал времени, которые использовались раньше, не является проявлением консерватизма. Также и определение новых шкал не является знаком их совершенства, а требуется их приложениями. Мы должны принять, что мы входим в эру многочисленных шкал времени. К несчастью для читателя, мы не способны к упрощению без чувства вины за пробелы. По крайней мере, должно быть оценено то, что идея всемирного времени была сохранена для общественного использования.