

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ
И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 58 (118)

СТАНДАРТГИЗ
МОСКВА—1962







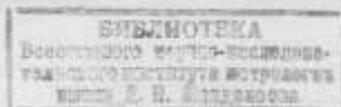
КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР и ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ВРЕМЕНИ

ТРУДЫ ИНСТИТУТОВ КОМИТЕТА

ВЫПУСК 58 (118)



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
МОСКВА — 1962

ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ

Ответственный редактор выпуска
кандидат технических наук

КОНСТАНТИНОВ А. И.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10

Редакционная коллегия:

Г. Д. Бурдун, А. Л. Дуклер, В. И. Ермаков, М. К. Жоховский, Л. М. Закс,
А. И. Константинов, М. П. Орлова, Л. М. Пятигорский, И. Г. Русаков, Н. А. Сорокин,
В. Н. Титов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Статьи, помещенные в настоящем сборнике, по содержанию можно разделить на две группы: к первой группе относятся работы в области астрономического определения времени и методики обработки результатов измерения времени, ко второй группе — работы, содержащие исследование и описание приборов для измерения времени.

В статье А. И. Константинова последовательно изложены принципы построения астрономической системы счисления времени; особое внимание уделено теории эфемеридного времени, необходимого для воспроизведения эталонов времени и частоты на современном уровне точности.

Статья Н. И. Панченко и Е. П. Федорова знакомит читателей с историей и современным состоянием задачи определения координат мгновенного полюса Земли. Рациональное в научном и организационном отношении направление решения этой задачи советскими астрономами обеспечило наиболее точное определение координат и дало возможность поставить перед международными организациями вопрос о пересмотре программы работ Международной службы широты в целях дальнейшего повышения точности воспроизведения эталонного времени.

Д. Ю. Белоцерковский в своей первой статье излагает современную методику обработки материалов служб времени для вычисления эталонного времени, во второй статье — дает анализ некоторых периодических погрешностей кварцевых часов на основе конкретного материала.

Статья Ф. М. Федченко содержит описание созданных им высокоточных маятниковых часов. Предварительные исследования хода часов показали, что часы Ф. М. Федченко обладают вариацией хода на порядок лучше, чем часы типа Шорта.

Теоретическая работа А. Г. Флеера является попыткой найти аналитическое выражение для колебательного процесса несвободного маятника. Предлагаемое автором выражение, связывающее колебательный процесс с параметрами импульсного механизма маятника, показало, что дальнейшее повышение точности маятниковых часов, в основу которых положен принцип часов Шорта, вряд ли возможно. В статье даются рекомендации для оптимальной регулировки импульсного механизма часов Шорта.

Статья Н. А. Тельпуховского содержит оригинальное решение схемы датчика сигналов нового типа. Датчики, описанные в статье, построены автором и используются в настоящее время для передачи сигналов точного времени.

В работе М. Д. Сопельникова рассматривается влияние вязкой среды и вакуума на затухание колебаний маятника. Отмечается наличие области давления, где коэффициент затухания маятника практически не зависит от давления.

В статье А. И. Орловой и Л. А. Соловьевой приведены результаты исследования цапф пассажного инструмента и анализ влияния погрешностей фигуры цапф на азимут инструмента по материалам определения поправок часов.

Редколлегия ВНИИФТРИ выражает благодарность инженеру Комитета стандартов, мер и измерительных приборов И. Дунскому, принимавшему участие в подготовке сборника к изданию.

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА СЧИСЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ

С первых шагов сознательной жизни человек вынужден был считаться с фактором времени. Движение Солнца по небосводу являлось для него не только любопытным явлением, но и обстоятельством, которое диктовало весь распорядок его жизни. В сопоставлении движения Солнца (иногда Луны и звезд) с другими явлениями природы и течением практической жизни осуществлялось и развивалось сознательное представление о времени.

Представление о времени и методика его измерения развиваются в двух направлениях: первое связано с изучением движений Солнца, планет и звезд, второе — с созданием и совершенствованием физических приборов — часов, которые по своей первоначальной идее должны условно имитировать движение Солнца и тем самым давать указание о времени суток. Оба направления в области измерений времени всегда развивались параллельно, дополняя друг друга. Характер их взаимоотношений непрерывно менялся в зависимости от успехов в области астрономии и техники конструирования часовых механизмов. Однако теоретическое определение единицы времени и общая система счета времени всегда являлись чисто астрономическими проблемами.

Астрономические наблюдения за движением Солнца, планет и звезд дали возможность ученым подметить некоторые общие закономерности в их движении. Гелиоцентрическое воззрение, возрожденное Коперником, завоевавшее полное признание благодаря работам Галилея и открытию Кеплером законов движения планет, подготовило почву для гениального открытия Ньютоном закона всемирного тяготения.

Законы механики, по идее Ньютона, должны быть инвариантны только в системе равномерного абсолютного математического времени, позднее названного ньютоновским временем. С математической точки зрения это — время, которое можно представить как движение некоторой инерциальной системы относительно другой инерциальной системы. Другими словами, непрерывная последовательность отрезков времени, ограниченных моментами, фиксируемыми нарастанием расстояния между инерциальными системами по арифметической прогрессии определяет систему абсолютного времени. В природе, в силу действия закона всемирного тяготения, невозможно представить пары независимых инерциальных систем, а поэтому время Ньютона остается математической абстракцией, не находящей физического воплощения в материальном мире.

Современное естественно-научное представление о времени не отрывает его от материи. Изучение природы времени неразрывно связано с материей, с диалектическим взглядом на материю. Время и пространство — формы вечно и закономерно движущейся материи. Форма не отделима от содержания. Следовательно, нет самого по себе текущего времени — реально существует не время вообще, а время, неразрывно связанное с конкретными движениями и изменениями.

Известное высказывание Ньютона: «Возможно, не существует в природе совершенно равномерных движений, которые могли бы послужить для определения точного времени» (Ньютон И. «Математические начала») и по настоящее время представляет глубокий философский и практический интерес. Действительно, как же найти равномерное движение или приблизиться к тому равномерному движению, а следовательно, и времени, относительно которого законы механики были бы инвариантны?

Представим себе несколько материальных точек, движения которых в общей системе координат (для сокращения рассуждений будем рассматривать движения по одной оси координат— x) представлены уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \dots \\ x_2 &= b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \dots \\ x_3 &= c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + \dots \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь a, b, c, \dots — постоянные коэффициенты, которые могут принимать любое значение, в том числе и 0;

t — аргумент, равномерное математическое ньютоновское время, природа которого не известна.

Эта система уравнений движений является математической абстракцией и реального смысла не имеет. Если бы одно из уравнений системы (1) имело бы коэффициенты при t степени выше первой равными 0, то это движение могло бы служить для измерения равномерного времени.

Практически могут быть получены следующие выражения, аналитически связывающие движения ряда точек:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= b'_0 + b'_1 x_1 + b'_2 x_1^2 + b'_3 x_1^3 + \dots \\ x_3 &= c'_0 + c'_1 x_1 + c'_2 x_1^2 + c'_3 x_1^3 + \dots \\ x_4 &= d'_0 + d'_1 x_1 + d'_2 x_1^2 + d'_3 x_1^3 + \dots \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

или

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= a''_0 + a''_1 x_2 + a''_2 x_2^2 + a''_3 x_2^3 + \dots \\ x_3 &= c''_0 + c''_1 x_2 + c''_2 x_2^2 + c''_3 x_2^3 + \dots \\ x_4 &= d''_0 + d''_1 x_2 + d''_2 x_2^2 + d''_3 x_2^3 + \dots \\ &\dots \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

и т. п.

Эти выражения находятся на основе начальных измерений и известных закономерностей в предположении, что x_1 или x_2 , или x_3 и т. д. является абсциссой точки, имеющей равномерное движение. Анализируя группы уравнений системы (2), можно выбрать в качестве аргумента то движение, которое по отношению к другим сопоставляемым с ним движениям будет наиболее равномерным. Критерием для выбора явится степень увязки результатов последующих относительных измерений в группах уравнений системы (2). Наиболее равномерным движением окажется то, которое является аргументом группы, показавшей наилучшую степень увязки.

В системе уравнений (2) может быть рассмотрено движение фиктивной точки, которое складывается из движения материальной точки и поправок к этому движению, выравнивающих движение материальной точки. Эти поправки могут иметь или теоретические предпосылки, или чисто эмпирическое происхождение.

Тогда выбранное движение и принятая в соответствии с ним система измерения времени могут быть представлены выражениями:

$$x_{t'} = x'_{t'} + (\sum \Delta x)_{t'} \quad \text{и} \quad t' = \lambda_0 + \lambda_1 (x' + \sum \Delta x)_{t'}$$

где: $x'_{t'}$ — абсцисса движущейся реальной точки в момент t' ;

- $x_{t'}$ — абсцисса движущейся аналитической точки в момент t' ;
- $\sum \Delta x$ — поправка, выравнивающая движение материальной точки;
- t' — приближение к равномерному времени;
- λ_0 — постоянная, определяющая начало счета времени;
- λ_1 — коэффициент пропорциональности, определяющий единицу времени.

Эта система счисления времени, будучи **относительной**, одновременно наилучшим образом обеспечивает инвариантность законов механики по отношению к рассмотренным движениям.

Открытие новых закономерностей в движении, повышение точности измерений или изучение иных движений в системе выбранной шкалы времени может заставить пересмотреть ее, исправить или принять для счисления времени иное движение, лучше удовлетворяющее всей совокупности известных нам движений в смысле инвариантности законов механики по отношению к этой совокупности.

Принципы построения астрономической системы счисления времени

Астрономическая система счисления времени построена в своей основе на вращении Земли, угловая скорость которой принимается как абсолютная постоянная. Для регистрации относительной скорости и фазы движения определяют:

1. Систему фиксированных направлений на самой вращающейся Земле. Такой системой является система плоскостей, параллельных средней оси вращения Земли и касательных к отвесным линиям в точках наблюдения. Это — астрономические меридианы, связанные с Землей и имеющие условную нумерацию.

2. Точку или систему точек, не принимающих участия во вращении Земли, относительно которых измеряется угловое смещение меридианов вращающейся Земли. Такими точками являются: центр Солнца, точка весеннего равноденствия, звезды.

3. Единицы времени. За единицу времени принимают интервал времени, необходимый для одного оборота Земли относительно упомянутых точек. Соответственно вводятся понятия солнечных и звездных суток.

Процесс определения времени состоит в регистрации положения астрономических меридианов относительно избранных точек, не участвующих во вращении Земли. Эти точки обладают собственным движением, неравномерным относительно средней оси вращения Земли, которое складывается с вращательным движением Земли.

Процесс регистрации движения уже предусматривает знание единиц времени, которые, однако, могут быть определены только из наблюдений. Эта комплексная задача решается весьма распространенным в физических исследованиях методом последовательных приближений.

Скорость смещения некоторого меридиана вращающейся Земли относительно подвижной точки весеннего равноденствия в плоскости экватора складывается из скорости вращения самой Земли относительно неподвижной точки весеннего равноденствия — ω и полной скорости движения точки весеннего равноденствия в плоскости экватора:

$$\frac{dH_s}{dt} = \omega + \frac{d}{dt}(m) + \cos \varepsilon \frac{d}{dt} \Delta \psi, \quad (4)$$

где: (m) — полная прецессия в экваторе, включающая как лунно-солнечную прецессию, так и прецессию от планет;

$\Delta \psi \cdot \cos \varepsilon$ — нутация в экваторе.

Интегрируя (4) в пределах от $t_0=0$ до t , получим выражение для часового угла H_s истинной точки весеннего равноденствия эпохи t в момент t :

$$H_s = \omega t + (m) + \cos \varepsilon \cdot \Delta\psi + c^*.$$

Имея в виду разложение

$$(m) = mt + m_1 t^2,$$

где m — скорость прецессионного движения в экваторе для эпохи $t_0=0$; m_1 — полуускорение прецессионного движения в экваторе, получим

$$H_s = c + (\omega + m)t + m_1 t^2 + \cos \varepsilon \Delta\psi, \quad (5)$$

где t — равномерное ньютонианское время, считаемое от эпохи $t_0=0$, в произвольных единицах.

Долгота истинного солнца для эпохи t , отсчитанная от истинной точки весеннего равноденствия той же эпохи, определяется выражением

$$\lambda' = \lambda_0 + nt + n_1 t^2 + (l) + \Delta\psi + P,$$

где: λ_0 — долгота истинного солнца в начальную эпоху $t_0=0$;

n — средняя угловая скорость центра истинного солнца;

n_1 — полуускорение движения истинного солнца, обусловленное гравитационным влиянием планет на скорость обращения Земли;

(l) — полная прецессия в эклиптике за время t ;

$\Delta\psi$ — нутация в эклиптике;

P — периодический член, обусловленный эксцентриситетом орбиты Земли.

Имея в виду разложение

$$(l) = lt + l_1 t^2,$$

где: l — скорость прецессионного движения в эклиптике для эпохи $t_0=0$;

l_1 — полуускорение прецессионного движения в эклиптике, получим

$$\lambda_1 = \lambda_0 + (n+l)t + (n_1+l_1)t^2 + \Delta\psi + P. \quad (6)$$

Здесь $(n+l)$ — среднее тропическое движение Солнца, выведенное из наблюдений. Оно включает постоянную часть скорости движения точки весеннего равноденствия в эклиптике.

Прямое восхождение истинного солнца для эпохи t , отсчитанное от точки весеннего равноденствия той же эпохи

$$A_{\odot} = \lambda' + \rho = \lambda_0 + (n+l)t + (n_1+l_1)t^2 + \Delta\psi + P + \rho, \quad (7)$$

где ρ — приведение к экватору.

Часовой угол истинного солнца для момента t определяется как разность:

$$H_{\odot} = H_s - A_{\odot} = (c - \lambda_0) + (\omega + m - n - l)t + (m_1 - n_1 - l_1)t^2 + \Delta\psi(\cos \varepsilon - 1) - P - \rho. \quad (8)$$

Выражения для часового угла центра истинного солнца (8) и часового угла истинной точки весеннего равноденствия (5) являются основными в учении о времени; первое из них определяет истинное солнечное время, второе — истинное звездное время.

Интервалы времени, необходимые для изменения часовых углов истинного солнца (H_{\odot}) и истинной точки весны (H_s) на 2π , принимаются за единицы времени; это, соответственно, истинные солнечные сутки и истинные звездные сутки. Часовые углы, выраженные в соответствующих единицах времени и отсчитанные от заданного меридиана, определяют местное истинное солнечное и местное истинное звездное время.

* c — постоянная интегрирования.

Истинные солнечные сутки и истинные звездные сутки можно так же определить как интервалы времени между двумя последовательными верхними (или нижними) кульминациями центра истинного солнца или истинной точки весеннего равноденствия. За начало истинных солнечных суток принимают момент верхней кульминации центра истинного солнца; за начало истинных звездных суток — верхнюю кульминацию истинной точки весеннего равноденствия. Постоянная c в формулах часовых углов определяется меридианом, относительно которого отсчитываются часовые углы.

Из выражений для часовых углов H_{\odot} и H_{*} следует, что ни истинное солнечное, ни истинное звездное время не возрастают линейно относительно аргумента t . Эта неравномерность относительно аргумента t гораздо слабее у истинного звездного, чем у истинного солнечного времени, так как в выражении для H_{*} отсутствуют периодические члены P и p .

В основе определения системы равномерного времени должно лежать равномерное движение. Такое равномерное движение в астрономии осуществляется введением фиктивных точек, движения которых относительно абсолютного времени равномерны и аналитически связаны с движениями реальных точек — центра истинного солнца и истинной точки весеннего равноденствия.

В связи с этим вводятся понятия средней точки весеннего равноденствия, среднего эклиптического и среднего экваториального солнца. Под средним эклиптическим солнцем понимается точка небесной сферы, имеющая равномерное движение в плоскости эклиптики, угловая скорость которой равна среднегодовой угловой скорости истинного солнца. В перигелии и афелии среднее эклиптическое солнце совпадает с центром истинного солнца. Долгота среднего эклиптического солнца в соответствии с определением будет

$$\lambda_m = \lambda_0 + (n+l)t + (n_1+l_1)t^2. \quad (9)$$

Так как часовые углы, которые служат средством для регистрации времени, измеряются в плоскости экватора, вводится понятие среднего экваториального солнца. Под средним экваториальным солнцем понимается точка небесной сферы, лежащая в плоскости экватора, угловая скорость которой равна среднегодовой угловой скорости истинного солнца, а прямое восхождение минимально отличается от долготы среднего эклиптического солнца в один и тот же физический момент. В точках осеннего и весеннего равноденствия среднее экваториальное солнце совпадает со средним эклиптическим солнцем.

Если μ_1 — собственная постоянная скорость звездного движения* экваториального солнца, а A_0 — его прямое восхождение в момент $t_0=0$, то прямое восхождение среднего экваториального солнца в момент t относительно точки весеннего равноденствия эпохи t будет

$$A_{\odot}^m = A_0 + \mu_1 t + (m).$$

Имея в виду разложение

$$(m) = mt + m_1 t^2$$

и приняв обозначение

$$\mu = m + \mu_1,$$

получим

$$A_{\odot}^m = A_0 + \mu t + m_1 t^2. \quad (10)$$

* Под равномерным звездным движением эклиптического или экваториального солнца понимается постоянная скорость движения эклиптического или экваториального солнца в эклиптике или экваторе относительно неподвижной точки весеннего равноденствия.

Данное определение среднего экваториального солнца приводит к следующим условиям:

$$\lambda_0 = A_0 \text{ и } \mu = \mu_1 + m = n + l. \quad (11)$$

Второе условие (11) определяет собственную угловую скорость μ_1 среднего экваториального солнца — так называемое среднее собственное движение солнца в экваторе. Расхождение λ_m (9) и A_{\odot}^m (10) определяется лишь весьма малыми медленно возрастающими членами с квадратами аргумента t .

Введение понятий среднего экваториального солнца и средней точки весеннего равноденствия приводит к выражениям для часовых углов среднего солнца и средней точки весеннего равноденствия:

$$\left. \begin{aligned} H_{\odot}^m &= H_s^m - A_{\odot}^m = c - A_0 + (\omega - \mu_1) t \\ H_s^m &= c + (\omega + m) t + m_1 t^2 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Интервалы времени, необходимые для изменения часовых углов среднего солнца (H_{\odot}^m) и средней точки весеннего равноденствия (H_s^m) на 2π , принимаются за единицы времени; это соответственно — средние солнечные сутки и средние звездные сутки. Часовые углы, выраженные в соответствующих единицах времени и отсчитанные от заданного меридиана, определяют местное среднее солнечное или местное среднее звездное время. Средние солнечные сутки и средние звездные сутки можно так же определить, как интервалы времени между двумя последовательными верхними (или нижними) кульминациями среднего экваториального солнца или средней точки весеннего равноденствия. За начало средних солнечных суток принимают момент нижней кульминации среднего экваториального солнца, за начало средних звездных суток — верхнюю кульминацию средней точки весеннего равноденствия. Постоянная c в формулах часовых углов определяется меридианом, относительно которого отсчитываются часовые углы.

Наличие квадратичного члена $m_1 t^2$ в формуле часового угла средней точки весеннего равноденствия H_s^m заставляет длительность звездных суток относить к определенной эпохе.

Среднее экваториальное солнце и средняя точка весеннего равноденствия являются фиктивными точками; связь между этими точками и реальными точками — центром истинного солнца и истинной точкой весеннего равноденствия — устанавливается аналитически.

Для часового угла среднего экваториального солнца

$$H_{\odot}^m = H_{\odot} + E, \quad (13)$$

где E — уравнение времени.

$$E = -(m_1 - n_1 - l_1) t^2 - \Delta\psi (\cos \varepsilon - 1) + P + \rho. \quad (14)$$

Значение разности $H_{\odot}^0 = 12^h - E$, представляющее собой часовой угол истинного солнца на меридиане Гринича в среднюю гриничскую полночь, публикуется на каждые сутки в Астрономическом ежегоднике. Таким образом, совокупность движения реального (истинного) солнца с известным значением «уравнения времени» воспроизводит шкалу равномерного времени, выраженную в средних солнечных единицах времени — средних сутках, часах, минутах и секундах.

Для часового угла средней точки весеннего равноденствия

$$H_s^m = H_s - \cos \varepsilon \cdot \Delta\psi. \quad (15)$$

Нутация точки весеннего равноденствия в экваторе ($\cos \varepsilon \cdot \Delta\psi$) дается на каждый день в Астрономическом ежегоднике в виде двух членов — долгопериодического и короткопериодического. Совокупность движения ре-

альной точки весеннего равноденствия (геометрической точки) с известным значением нутации воспроизводит шкалу равномерного времени, выраженную в средних звездных единицах времени—звездных сутках, часах, минутах и секундах.

Соотношение длительностей средних солнечных суток и средних звездных суток определяется из выражений (12) для часовых углов среднего солнца и средней точки весеннего равноденствия. Продифференцировав H_{\odot}^m и H_s^m по аргументу t , получим

$$\frac{dH_{\odot}^m}{dt} = (\omega - \mu_1); \quad \frac{dH_s^m}{dt} = (\omega + m) + 2m_1 t.$$

За единицу счета того и другого времени принимают интервал dt , в течение которого H_{\odot}^m и H_s^m возрастают на 24^h (2π). Относя скорость движений ω , m , m_1 , μ и μ_1 к средним солнечным суткам, как единице времени, и имея в виду соотношение (11) $\mu = \mu_1 + m = n + l$, получим

$$\begin{aligned} (\omega + m) j_m &= 2\pi + \mu, \\ (\omega + m) j_s &= 2\pi - 2m_1 t. \end{aligned}$$

С приближением до μ , m_1 получим

$$\frac{j_m}{j_s} = 1 + \frac{\mu}{\pi} + \frac{m_1}{\pi} t, \quad (16)$$

где: j_m — интервал времени, равный средним солнечным суткам;

j_s — интервал времени, равный средним звездным суткам;

μ — суточное тропическое движение Солнца в радианах, включающее постоянную часть прецессионного движения в экваторе точки весеннего равноденствия;

m_1 — суточное полуускорение прецессионного движения в экваторе в радианах.

Из выражения (16) следует, что соотношение длительностей средних солнечных и средних звездных суток является функцией эпохи t .

Связь между моментами времени H_{\odot}^m , измеренными в средних солнечных единицах, и моментами времени H_s^m , измеренными в средних звездных единицах, определяется выражением:

$$H_{\odot}^m = H_s^m - A_{\odot}^m. \quad (17)$$

$A_{\odot}^m = A_{\odot} + \mu \cdot t + m_1 t^2$ — прямое восхождение среднего экваториального солнца; значение A_{\odot}^m дается Таблицами Солнца Ньюкома и на каждый день — в Астрономическом ежегоднике для гриничской полночи в виде двух слагаемых — истинного звездного времени (H_s) и нутации точки весеннего равноденствия ($\cos \epsilon \cdot \Delta\psi$).

Придерживаясь системы астрономических постоянных Ньюкома N_{96} , рекомендованных Международной астрономической конференцией 1896 года, приведем численные значения постоянных и коэффициентов в рассмотренных выше формулах.

Долгота среднего эклиптического солнца или прямое восхождение среднего экваториального солнца для момента 1900, январь 0, средний гриничский полдень относительно среднего равноденствия той же эпохи

$$\lambda_0 = A_0 = 279^{\circ}41'48'',04 - 20'',47 = 279^{\circ}41'27'',57 = 18^h 38^m 45^s,836.$$

При выводе этого значения Ньюком уменьшил долготу Солнца на постоянную годичной аберрации — $20'',47$ (среднее значение аберрации в экваторе), имея в виду удобство обработки наблюдений.

Среднее тропическое движение Солнца по долготе ($n+l$) или среднее тропическое движение Солнца по прямому восхождению (μ_1+m) за одни средние солнечные сутки для эпохи 1900,0

$$\mu = \mu_1 + m = n + l = 0^\circ 59' 08'', 330407 = 3^m 56^s, 5553605. \quad (11')$$

Среднее тропическое движение Солнца не постоянно вследствие ускорения прецессионного движения в эклиптике и ускорения (отрицательного) движения истинного солнца, обусловленного гравитационным влиянием планет на обращение Земли:

$$\text{полуускорение движения } l \dots l_1 = +1'', 109,$$

$$\text{полуускорение движения } n \dots n_1 = -0'', 020.$$

Приведенные значения l_1 и n_1 относятся к интервалу времени в одно юлианское столетие (36525 средних солнечных суток).

Таким образом, согласно формуле (9), для долготы среднего солнца получается выражение:

$$\lambda_m = 279^\circ 41' 27'', 54 + 0^\circ 59' 08'', 330407 j_m + 1'', 089 T^2. \quad (9')$$

Здесь j_m — в средних солнечных сутках, а T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0, средняя гриничская полночь.

По условию прямое восхождение экваториального солнца должно как можно меньше отличаться от долготы эклиптического солнца; поэтому для него сохраняется начальная координата ($A_0 = \lambda_0$) и начальная скорость ($\mu_1 + m = n + l$). Но скорость прецессионного движения m не постоянна. Полуускорение прецессионного движения по экватору $m_1 = +1'', 395 = +0^s, 0929$ за юлианское столетие.

Таким образом, согласно формуле (10), для прямого восхождения экваториального солнца для момента времени и среднего равноденствия t получается выражение:

$$A_{\odot}^m = 279^\circ 41' 27'', 54 + 0^\circ 59' 08'', 330407 j_m + 1'', 395 T^2 = 18^h 38^m 45^s, 836 + 3^m 56^s, 5553605 j_m + 0^s, 0929 T^2. \quad (10')$$

Здесь j_m — в средних солнечных сутках, а T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0, средняя гриничская полночь.

Движение меридиана за одни средние солнечные сутки по отношению к средней точке весеннего равноденствия, или приращение часового угла средней точки весеннего равноденствия

$$\omega + m = 2\pi + \mu = 24^h + 3^m 56^s, 5553605.$$

Согласно (12), выражение для часового угла средней точки весеннего равноденствия, определяющее систему измерения времени в звездных единицах, примет вид:

$$H_s^m = 18^h 38^m 45^s, 836 + (24^h + 3^m 56^s, 5553605) j_m + 0^s, 0929 T^2 - l. \quad (12')$$

Постоянная c формулы (12) определена как

$$c = A_0 - l,$$

где l — долгота места, положительная к западу от Гринича.

Согласно (12), выражение для часового угла среднего экваториального солнца, определяющее систему измерения времени в средних солнечных единицах, примет вид:

$$H_{\odot}^m = H_s^m - A_{\odot}^m = 24^h j_m - l. \quad (12'')$$

Отношение длительности средних солнечных суток к средним звездным суткам после подстановки численных значений в выражение (16) примет вид:

$$\frac{j_m}{j_s} = 1 + \frac{236, 5553605}{86400} + \frac{0, 0929}{43200 \times 36525} T = 1, 00273791 + 0, 006 \cdot 10^{-8} T, \quad (16')$$

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0, средняя гриничская полночь.

Отношение $\frac{J_m}{J_s}$ является функцией эпохи, однако изменение его со временем чрезвычайно мало: только через тысячелетие приведенное значение изменится на пол-единицы последнего десятичного знака.

Среднее солнечное время определяется двойко: теоретически оно может быть определено через звездное время из выражения

$$H_{\odot}^m = H_s^m - A_{\odot}^m$$

и практически — с помощью наблюдений Солнца, позволяющих определить истинное солнечное время H_{\odot} , и уравнения времени E

$$H_{\odot}^m = H_{\odot} + E.$$

E определяется выражением

$$E = 12^h - (m_1 - n_1 - l_1) t^2 - \Delta\psi (\cos \epsilon - 1) + P + p = 12^h - (0^s,0929 + 0^s,0013 - 0^s,0739) T^2 + \Pi = 12^h - 0^s,0203 T^2 + \Pi,$$

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0, средняя гриничская полночь;

Π — сумма периодических членов.

Наличие квадратического члена в выражении E приводит к непрерывно нарастающему разногласию между значениями среднего времени, определенными из наблюдений Солнца и через звездное время (из наблюдений звезд). Это разногласие ($-0^s,0203 T^2$) к настоящему времени уже достигло $0^s,005$ и к 2000 году будет равно $0^s,020$.

В Астрономическом ежегоднике для каждой гриничской ($l=0$) полночи ($H_{\odot}^m=0$) дается: звездное истинное время ($H_s = S^0$), нутация в прямом восхождении ($\Delta\psi \cos \epsilon$) в виде двух членов с долгим и коротким периодом, видимое прямое восхождение истинного солнца относительно истинной точки весеннего равноденствия с учетом короткопериодических членов нутации и часовой угол истинного солнца на долготе Гринича (H_{\odot}^0), причем $E = H_{\odot}^0 - 12^h$. Эти величины связывают между собой время моментов, зафиксированных в истинном солнечном, среднем солнечном, истинном звездном и среднем звездном времени, а также определяют соотношение соответствующих единиц времени.

На практике определение времени моментов, по сути дела, поправок часов относительно времени, измеряемого в тех или иных единицах, сводится к регистрации моментов прохождения звезд через плоскость меридиана. Известные прямые восхождения звезд в момент регистрации последних в плоскости меридиана определяют местное звездное время этих моментов.

Система координат — прямых восхождений звезд, задаваемая фундаментальным каталогом, должна определять собой инерциальную систему, т. е. систему координат, пригодную для решения задач классической механики. Исходя из вышеизложенного, это должна быть такая система координат, которая бы не имела ускорения относительно системы фиктивных точек — средней точки весеннего равноденствия и среднего солнца. Практически такая система осуществляется с некоторым приближением.

Неравномерность вращения Земли и эфемеридное время

Обширной проблемой рациональной механики является небесная механика, в которой рассматриваются только движения, подчиненные закону всемирного тяготения*. Координаты небесных тел определяются

* Закон всемирного тяготения Ньютона является частным случаем проблемы тяготения общей теории относительности для ограниченных значений напряженности гравитационного поля. В некоторых задачах для согласования результатов наблюдений с теоретическими предположениями становится необходимым применять не закон всемирного тяготения Ньютона, а законы для поля тяготения общей теории относительности.

в функции независимой переменной T , именно в функции абсолютного математического равномерного ньютоновского времени. Дифференциальные уравнения движения небесных тел, основанные на гравитационной теории, после интегрирования дают ряд постоянных, определяемых из астрономических наблюдений. Введение численных значений этих параметров в уравнения движения небесных тел уже определяет единицу измерения абсолютного времени классической механики. Эта единица определяется так же, как единица среднего или звездного времени, но относится к средней эпохе определения значений параметров уравнений; в дальнейшем предполагается, что эта единица измерения времени неизменна.

Время, измеряемое в этих единицах, было принято называть эфемеридным временем*, т. е. временем, в котором предвычисляются эфемериды — координаты небесных тел. Единица измерения эфемеридного времени, однажды определенная по результатам астрономических наблюдений, считается неизменной и независимой от скорости вращения Земли.

Ранее рассмотрена система среднего солнечного и звездного времени. Это время (H) повседневно определяется из астрономических наблюдений; в его основе лежит вращение Земли. Оно используется как при обработке астрономических наблюдений, так и во всех отраслях науки и практики. Степень постоянства отношения $\frac{dH}{dt}$ во времени определяет степень равномерности вращения Земли и степень равномерности всемирного времени**.

Была отмечена метафизичность понятия абсолютного времени Ньютона, но в то же время намечен путь для выбора реальной системы счисления времени, наилучшей в смысле инвариантности законов механики по отношению к этой системе.

Рассмотрение относительного движения двух тел вне заданной системы отсчета времени не позволяет выявить неравномерность одного движения по отношению к другому. Система счисления среднего солнечного и звездного времени построена на рассмотрении двух движений: суточного вращения Земли и движения среднего солнца и точки весеннего равноденствия. Движения среднего солнца и точки весеннего равноденствия аналитически связаны через прямое восхождение среднего солнца и должны рассматриваться как одно движение, в связи с чем в этой системе счисления времени скорость вращения Земли по необходимости принимается постоянной.

Для выявления неравномерности всемирного времени или неравномерности вращения Земли должны быть рассмотрены в системе этого времени движения других тел. Из движений этих тел должны быть априорно исключены все неравенства (неравномерности движения) согласно с законом всемирного тяготения. Тогда сопоставление предвычисленных положений (эфемерид) этих тел с наблюдаемыми определит неравномерность вращения Земли. Полученные результаты будут убедительны только в том случае, если будут подтверждены исследованиями движений ряда тел. Естественно, что в системе всемирного времени могут быть рассмотрены не только движения небесных тел, но и другие непрерывные процессы, претендующие с принципиальной точки зрения на равномерность.

* В разделе «Эфемеридное время» вводится иное понятие эфемеридного времени, принципиально отличное от данного.

** В дальнейшем под термином «Всемирное время» будет пониматься эмпирическое среднее солнечное время нулевого меридиана, полученное аналитически из звездного времени, которое, в свою очередь, является результатом наблюдения звезд.

Впервые неравномерность астрономической системы счисления времени была обнаружена из анализа движения Луны в системе этого времени. Гравитационная теория движения Луны не подтверждалась результатами наблюдений над Луной. Уклонения наблюдаемых мест Луны от вычисленных по гравитационной теории превышали погрешности наблюдений и теории.

Исследования движения Луны, Солнца и планет

В 1693 г. Галлей опубликовал результаты своих вычислений древних и средневековых затмений и показал, что средняя скорость обращения Луны должна иметь вековое ускорение. В 1754 г. Кант в своей докторской диссертации «De igne» пришел к выводу, что явление морского приливно-отливного трения должно вызывать непрерывное уменьшение скорости вращения Земли. Т. Майер указал, что с помощью эффекта приливно-отливного трения, можно объяснить «вековое ускорение» движения Луны, найденное Галлеем. Однако гипотеза Т. Майера встретила резонное возражение Лапласа, считавшего, что если ускорение движения Луны можно объяснить замедлением вращения Земли, то вековые ускорения, которые в то время не обнаруживались, должны также наблюдаться в движениях планет.

Позднее (1787 г.) Лаплас нашел, что имеющее место непрерывное уменьшение эксцентриситета орбиты Земли должно вызывать вековое ускорение движения Луны. Увеличение средней долготы Луны, вызываемое этой причиной, было приближенно определено Лапласом и достаточно хорошо подтверждало результаты исследований Галлея. Это позволило Лапласу в работе «Небесная механика» констатировать: «Таким образом, очевидно, что начиная с Гиппарха, продолжительность суток не изменилась ни на одну сотую долю секунды. Если бы по каким-либо неизвестным причинам эта продолжительность испытала бы заметную перемену, то это сказалось бы на движении Луны, наблюдения над которой сами по себе весьма полезные, приобретают ввиду этого соображения новое важное значение».

В 1853 г. Адамс повторил вычисления Лапласа и нашел, что более строгое решение этой задачи дает значение теоретического векового ускорения Луны вдвое меньшее того, которое получил Лаплас. С этого времени опять продолжало существовать противоречие между наблюдениями и теорией Луны.

Дальнейшие исследования движения Луны показали, что разность между наблюдаемыми и предвычисленными значениями долготы Луны не может быть представлена только вековым ускорением. Были обнаружены периодические изменения разности со значительной амплитудой, которые были названы флюктуациями долготы Луны. Причиной этих флюктуаций долготы Луны считают периодические изменения скорости вращения Земли, объясняемые, в свою очередь, периодическими изменениями момента инерции земного шара.

Долгота Луны эпохи T может быть представлена выражением:

$$L_T = L_0 + n_{\zeta} \cdot T + (n_{\zeta}^* + n_{\zeta}^{\bullet} + l_1) T^2 + B, \quad (18)$$

где: L_0 — средняя долгота * Луны эпохи $T_0 = 0$;

n_{ζ} — среднее звездное движение Луны в эклиптике для той же эпохи;

n_{ζ}^* — теоретическое вековое полуускорение Луны в эклиптике, объясняемое изменением эксцентриситета орбиты Земли;

n_{ζ}^{\bullet} — эмпирическое вековое полуускорение Луны в эклиптике, объясняемое приливным торможением вращения Земли;

* Под средней долготой Луны понимается долгота Луны, имеющей равномерное звездное движение n_{ζ} в плоскости эклиптики.

l_1 — вековое полуускорение прецессионного движения точки весеннего равноденствия;

B — эмпирический член периодического характера — флюктуация долготы Луны;

T — время в юлианских столетиях, отсчитанное от $T_0=0$.

Проблема определения неравномерности вращения Земли или проблема неравномерности всемирного времени, таким образом, сводится к трем основным задачам:

1) создание строгой гравитационной теории движения Луны, учитывающей все гравитационные неравенства движения Луны с точностью, превосходящей точность наблюдений;

2) численное определение векового ускорения n_{ζ}^* ;

3) численное определение флюктуаций долготы Луны B .

Рассмотрим каждую из этих задач.

1. Развитие теории движения Луны на первом этапе диктовалось практическими целями. В 17, 18-м и отчасти в первой половине 19-го века для определения долготы корабля, находящегося в плавании, и картографических работ применялся так называемый метод лунных расстояний; применение его не требовало знания времени нулевого меридиана, но были необходимы достаточно точные лунные таблицы.

Первой серьезной попыткой создания теории движения Луны, претендовавшей на представление координат Луны с точностью, сравнимой с точностью наблюдений, явилась теория движения Луны Ганзена. Таблицы Луны, вычисленные на основании этой теории, были изданы английским адмиралтейством в 1857 г. Таблицы Луны Ганзена достаточно хорошо представляли наблюдения Луны, сделанные за период с 1750 по 1850 г. Однако уже в конце 19-го века Ньюкомом было установлено, во-первых, что теория движения Луны Ганзена не представляет наблюдений второй половины 19-го века с удовлетворительной точностью, во-вторых, что она не является чисто гравитационной теорией.

Конечным результатом работы Ньюкома по ревизии теории Луны Ганзена явилась «Предварительно принятая теория движения Луны» [1]. Выражение для долготы Луны в теории Луны Ньюкома не содержит никаких эмпирических периодических членов; вводится лишь член, представляющий вековое ускорение Луны, вызываемое приливным трением ($n_{\zeta}^* T^3$). Коэффициент этого члена — n_{ζ}^* определен Ньюкомом из анализа движения Луны с древних времен по 1900 г. По таблицам Луны Ганзена, исправленным Ньюкомом, вычислялись эфемериды Луны во всех астрономических ежегодниках вплоть до 1923 г.

Ревизия теории Ганзена имела большое принципиальное значение. Ее исправление не только полностью нарушило согласие предвычисленных и наблюдаемых координат Луны, но и вскрыло ряд особенностей в движении Луны. Этими особенностями явились открытые Ньюкомом периодические незакономерные колебания долготы Луны, получившие название флюктуаций. Происхождение этих флюктуаций не объяснялось гравитационной теорией Луны.

В 1919 г. вышли в свет трехтомные таблицы движения Луны Брауна [2]. Таблицы Луны Брауна основываются на пересмотренной им теории движения Луны. Этой теорией были впервые предусмотрены все неравенства в движении Луны с точностью, превосходящей точность наблюдений. Долготы Луны таблиц Брауна включают вековое теоретическое полуускорение средней долготы Луны — n_{ζ}^* , учитывающее изменение эксцентриситета орбиты Земли, согласно вычислениям Ньюкома равное $6'',01$, и вековое полуускорение прецессионного движения точки весеннего равноденствия в эклиптике $l=1'',11$. Таким образом теоретический член векового ускорения долготы Луны относительно подвижной точки

весеннего равноденствия, учитываемый таблицами Брауна, определяется выражением

$$(n_{\zeta} + l_1) T^2 = (6'',01 + 1'',11) T^2 = +7'',12 T^2.$$

Так как таблицы Луны составлялись с целью предвычисления истинных эфемерид Луны, Брауну пришлось ввести в долготу, так называемый, большой эмпирический член, представляющий открытие Ньютоном флюктуации в долготе Луны. Большой эмпирический член Брауна выражен аналитически и представлен тригонометрической формулой $+10'',71 \sin(140^\circ,07 + 240^\circ,7)$,

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0,5, средняя гриничская полночь.

Таким образом согласование достигается одним синусоидальным членом с периодом в 257 лет. Дополнение гравитационной теории Луны эмпирическим членом хотя и позволило удовлетворительно представить наблюдения Луны с 1680 по 1910 г., однако не решило задачу точного предсказания положения Луны на последующие годы. Разности между наблюдаемыми долготами и вычисленными по таблицам Брауна за период с 1680 по 1910 г. не превышают $3''$, однако, начиная с 1920 г., эти разности достигают в некоторые годы десятков секунд.

2. Теория приливного трения, относящаяся к области динамической океанографии, в состоянии подтвердить влияние приливного трения на изменение скорости вращения Земли, однако количественная оценка этого влияния встречает большие трудности. К настоящему времени установлено, что основная часть эффекта торможения возникает в шельфовых морях и проливах. Многими исследователями была выполнена количественная оценка эффекта приливного торможения, давшая значения коэффициента n_{ζ} , близкие к значению n_{ζ} , полученному из наблюдения Луны. Однако недостаточная строгость теории приливов и приливных течений, а также ограниченность сведений о приливных явлениях по всему земному шару не обеспечивают определение коэффициента n_{ζ} геофизическим методом с необходимой точностью.

При определении численного значения эмпирического векового ускорения Луны предполагаются известными теоретическое вековое ускорение Луны ($n_{\zeta} = +6'',01$) и ускорение прецессионного движения точки весеннего равноденствия в эклиптике ($l_1 = +1'',11$); из наблюдений находится сумма всех трех ускорений ($n_{\zeta} + n_{\zeta} + l_1$).

Полное вековое ускорение в долготе Луны выводится из сопоставления положений Луны, вычисленных на основании чисто гравитационной теории, с наблюдаемыми положениями на возможно большем интервале времени. При этом используются древние и средневековые данные о затмениях Луны и проводившиеся с 18-го века наблюдения покрытий звезд Луною, а также меридианные наблюдения Луны. Квадратичный коэффициент параболы, аппроксимирующей разности гравитационных и наблюдаемых долгот, представляет полное полуускорение долготы Луны.

В настоящее время для эмпирического векового ускорения Луны принято значение, найденное де Ситтером [3]. Вычисления де Ситтера основываются на материалах предшествующих исследователей: Фатеринга, получившего вековое ускорение $n_{\zeta} = 4'',8$, и Шоха, получившего $n_{\zeta} = 5'',08$. Оригинальность работы де Ситтера заключается в том, что он ставил своей целью наилучшим образом разделить два вида эмпирической неравномерности обращения Луны — вековое ускорение и флюктуации. Это им было достигнуто путем совместного определения векового ускорения и флюктуаций из общих начальных уравнений. Значение

эмпирического векового полуускорения по де Ситтеру $n_{\zeta}^{\circ} = 5''{,}22 \pm 0''{,}45$ (средняя квадратическая погрешность).

Для достижения наилучшей сходимости между вычисленными значениями долготы Луны и современными наблюдениями де Ситтер одновременно с определением n_{ζ}° и B определяет поправку (ΔL_0) к начальному значению средней долготы Луны и поправку (Δn_{ζ}) к значению среднего движения Луны в эклиптике таблиц Луны Брауна. Эти поправки не имеют никакого принципиального значения, а только как бы относят определенные совместно с ними n_{ζ}° и B к начальной эпохе $T_0=0$.

Таким образом де Ситтер получил поправку к долготам Луны, вычисленным по таблицам Брауна, из которых предварительно исключается «большой эмпирический член» Брауна

$$+ 10''{,}71 \sin(140^{\circ}{,}0 \cdot T + 240^{\circ}{,}7).$$

Эта поправка де Ситтера определяется выражением

$$\Delta L_{\zeta} = \Delta L_0 + \Delta n_{\zeta} T + n_{\zeta}^{\circ} T^2 + B = 4''{,}65 + 12''{,}96 T + 5''{,}22 T^2 + B, \quad (19)$$

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0,5, средняя гриничская полночь.

Численные значения коэффициентов в выражении для ΔL_{ζ} определены под условием, что за 250 лет (1680—1930) алгебраическая сумма флюктуаций B в долготе Луны равна нулю.

Коэффициент эмпирического векового ускорения Луны складывается из двух частей, имеющих общее физическое происхождение — приливное трение, но проявляющихся различным образом.

Первая часть его является прямым следствием влияния приливно-го трения на скорость вращения Земли.

Вторая часть является обратным влиянием изменения скорости вращения Земли на скорость обращения Луны. Вследствие замедления вращения Земли количество движения Земли уменьшается; однако количество движения системы Земля + Луна должно оставаться постоянным. Возникающий дефицит в системе восполняется увеличением количества движения Луны вокруг центра тяжести системы. Это увеличение количества движения Луны происходит за счет изменения средних размеров и эксцентриситета орбиты Луны, приводящих, в свою очередь, к изменению скорости движения Луны по орбите. Эта часть члена n_{ζ}° не отражает изменения скорости вращения Земли. Аналитически эти два явления разделить невозможно.

Таким образом непосредственное использование векового ускорения долготы Луны для определения векового изменения скорости вращения Земли не представляется возможным. Однако определение этого ускорения совершенно необходимо для вычисления флюктуаций долготы Луны, которые наилучшим образом отражают периодические изменения в скорости вращения Земли.

Вековые изменения в скорости вращения Земли могут быть получены через значения вековых ускорений Солнца и планет, являющихся следствием приливного торможения вращающейся Земли. Для Солнца и планет обратным воздействием приливного трения на их скорости обращения можно пренебречь.

3. В настоящее время флюктуации в долготе Луны целиком относят за счет неравномерности вращения Земли. Изменения скорости вращения Земли, также носящие название флюктуации, связывают с перемещением масс внутри Земли; эти перемещения вызывают изменения момента инерции Земли. При сохранении количества движения изменение момента инерции должно вызывать изменение угловой скорости вращения Земли. Естественно, что в случае флюктуаций, изменения скорости вращения Земли не вызывают изменений параметров орбиты Луны и скорости ее обращения.

Уже упоминалось, что попытка Брауна представить флюктуации аналитическим членом не дала удовлетворительных результатов. Теперь считают, что флюктуации носят случайный характер и точное значение флюктуаций для каждого момента времени может быть получено только из наблюдений.

Для определения флюктуаций в долготе Луны используются наблюдения покрытий звезд Луною и меридианные наблюдения Луны. Такие наблюдения производились с конца 17-го века и позволили ряду исследователей вычислить флюктуации долготы Луны. Значительный практический интерес представляет способ наблюдения Луны путем фотографирования ее на фоне звезд, методика которого и аппаратура для наблюдения разработаны и применены (с 1952 г.) В. Марковицем.

В настоящее время все определения флюктуаций Луны основываются на теории движения Луны Брауна. Из долгот Луны, вычисляемых по таблицам Луны Брауна, исключается большой эмпирический член Брауна и вводится эмпирическая поправка де Ситтера. Разности наблюдаемых долгот Луны и вычисленных по таблицам Брауна с упомянутыми исправлениями представляют флюктуации долготы Луны.

Таким образом, флюктуации B определяются согласно с выражением:

$$B = L_{набл} - (L_{Браун} - \text{большой эмпирический член} + \Delta L_0 + \Delta n_{\zeta} \cdot T + n_{\zeta}^* \cdot T^2),$$

которое после замены коэффициентов их численными значениями примет вид:

$$B = \Delta L_{Браун} + 10'' \cdot 71 \sin(140^\circ \cdot 0 \cdot T + 240^\circ \cdot 7) - 4'' \cdot 65 - 12'' \cdot 96 \cdot T - 5'' \cdot 22 T^2, \quad (20)$$

где $\Delta L_{Браун}$ — разность наблюдаемой долготы и долготы, вычисленной по таблицам Брауна.

Значения флюктуаций Луны за 18 и 19-й века вычислены Джонсом [4]; в основу этих вычислений легли ряды наблюдений Луны, обработанные Ньюкомом [1]. Значения B , по Джонсу, приведены в табл. 1. Даты в таблице выбраны так, чтобы значения флюктуаций, относящиеся к этим датам, определялись равными количествами наблюдений.

Таблица 1
Флюктуации в долготе Луны по Джонсу

Эпоха	B	Эпоха	B
1681,0	-12",72	1857,5	+ 2",40
1710,0	- 3,92	1862,5	+ 0,91
1727,0	+ 2,15	1867,5	- 1,57
1737,0	+ 5,97	1872,5	- 6,38
1747,0	+ 8,49	1877,5	- 9,38
1755,0	+10,34	1882,5	-11,31
1771,0	+13,54	1887,5	-13,05
1785,0	+14,84	1891,5	-14,34
1792,0	+14,53	1894,5	-15,23
1801,5	+13,09	1897,5	-15,99
1809,5	+11,80	1900,5	-15,87
1813,0	+11,23	1903,5	-14,50
1821,8	+10,02	1906,5	-13,43
1831,5	+ 6,85	1909,5	-12,78
1837,4	+ 4,91	1912,5	-11,62
1843,1	+ 4,31	1915,5	-10,35
1848,8	+ 3,97	1918,5	-10,20
1852,5	+ 3,37	1921,5	-10,18

За период с 1900 по 1943 г. имеется несколько рядов определений флюктуаций, основанных частично на различном материале и различном подходе к обработке наблюдений Луны. Представление о точности определения флюктуаций за этот период дает сводная табл. 2. Значительные расхождения между отдельными рядами B в основном носят систематический характер и, главным образом, обусловлены систематической разностью между определениями долгот Луны, полученными через наблюдения покрытия звезд и меридианные наблюдения. Эти систематические разности объясняются чисто физиологическим явлением неоднородности процессов наблюдения покрытий и меридианных наблюдений и неровностями профиля Луны, проблема учета которых к настоящему времени полностью еще не решена.

Приведенные в табл. 2 ряды определений флюктуаций B основаны:

1) Клеменса [5] — на наблюдениях покрытий звезд и меридианных наблюдениях в Гриниче и Вашингтоне; значение B получено как среднее из рядов наблюдений покрытий и меридианных наблюдений в Гриниче и меридианных наблюдений в Вашингтоне;

2) Брауера [6] — на тех же наблюдениях, что и Клеменса, но меридианным наблюдениям придан меньший вес;

3) Джонса [4, 7] — только на наблюдениях покрытий звезд;

4) Брауна [8] — только на наблюдениях покрытий звезд;

5) Брауера-Ваттса [9] — на наблюдениях покрытий звезд и меридианных наблюдениях в Гриниче и Вашингтоне; меридианные наблюдения исправлены за неровности лунного профиля.

Таблица 2

Сопоставление значений флюктуаций B , определенных различными авторами

Эпоха	1 Клеменс	2 Брауер	3 Джонс	4 Браун	5 Брауер- Ваттс
1900,5	-15",72	-15",71	-15",87	—	—
1901,5	-15,47	-15,54	-15,35	—	—
1902,5	-14,96	-14,69	-14,86	—	—
1903,5	-14,55	-14,39	-14,50	—	—
1904,5	-14,27	-14,20	-14,16	—	—
1905,5	-13,92	-13,91	-13,79	—	—
1906,5	-13,59	-13,48	-13,43	—	—
1907,5	-13,32	-13,22	-13,18	—	—
1908,5	-13,03	-12,90	-13,04	—	—
1909,5	-12,70	-12,58	-12,78	—	—
1910,5	-12,24	-11,95	—	—	—
1911,5	-11,95	-11,51	—	—	—
1912,5	-11,76	-11,73	-11,62	—	—
1913,5	-11,35	-11,12	—	—	—
1914,5	-11,01	-10,91	—	—	—
1915,5	-10,80	-11,24	-10,35	—	—
1916,5	-10,42	-10,75	—	—	—
1917,5	-10,34	-10,38	—	—	—
1918,5	-10,65	-11,18	-10,20	—	—
1919,5	-10,83	-11,00	—	—	—
1920,5	-10,82	-11,02	—	—	—
1921,5	-10,85	-11,13	-10,18	—	—
1922,5	-11,00	-11,16	—	—	—
1923,5	-11,33	-11,66	—	-10",71	—
1924,5	-11,68	-11,81	-11,82	-11,09	—
1925,5	-11,98	-12,11	—	-11,51	—
1926,5	-12,37	-12,45	-12,11	-11,87	—

Продолжение

Эпоха	1 Клеменс	2 Брауер	3 Джонс	4 Браун	5 Брауер- Ваттс
1927,5	-12",87	-12",94	—	-12",33	—
1928,5	-13,42	-13,56	-12",90	-13,05	—
1929,5	-13,86	-13,92	—	-13,51	—
1930,5	-14,29	-14,27	-13,83	-13,80	—
1931,5	-14,74	-14,71	—	-14,40	—
1932,5	-15,19	-15,04	-14,81	—	-15",53
1933,5	-15,70	-15,63	—	—	-16,13
1934,5	-16,00	-16,02	-15,98	—	-16,59
1935,5	-16,47	-16,57	—	—	-17,08
1936,5	-17,07	-17,13	-16,48	—	-17,69
1937,5	-17,59	-17,62	—	—	-18,23
1938,5	-17,91	-17,92	—	—	-18,49
1939,5	-18,55	-18,55	—	—	-19,15
1940,5	-18,86	-18,86	—	—	-19,49
1941,5	-18,96	-18,96	—	—	-19,55
1942,5	-19,50	-19,50	—	—	-20,12

С 1944 по 1952 г. ежегодные значения флюктуаций долготы Луны вычислялись Институтом морского ежегодника в Англии (Nautical Almanac Office) и публиковались в *Astronomical Journal*. Обработка N. A. O. согласуется с обработкой Брауера-Ваттса за 1932,5—1942,5 в отношении принятой системы координат звезд (FK-3) и в отношении использования только вступлений в темный диск Луны.

В табл. 3 приведены значения $\Delta L_{\text{Браун}}$ и флюктуации B , общие в том смысле, что они получены в системе наблюдений покрытий звезд

Таблица 3

Флюктуация долготы Луны с 1923,5 по 1958,25 г.

Эпоха	B	Автор	Эпоха	B	Автор		
1923,5	-10",71	Браун	1943,5	-20",14	N. A. O.		
1924,5	-11,09		1944,5	-20,54			
1925,5	-11,51		1945,5	-21,02			
1926,5	-11,87		1946,5	-21,96			
1927,5	-12,33		1947,5	-21,35			
1928,5	-13,05		1948,5	-21,68			
1929,5	-13,51		1949,5	-21,97			
1930,5	-13,80		1950,5	-22,37			
1931,5	-14,40						
1932,5	-15",53		Брауер и Ваттс	1952,75		-22",65	Маркович
1933,5	-16,13			1953,25		-22,31	
1934,5	-16,59			1953,75		-22,81	
1935,5	-17,08			1954,25		-23,22	
1936,5	-17,69	1954,75		-23,71			
1937,5	-18,23	1955,25		-23,73			
1938,5	-18,49	1955,75		-24,07			
1939,5	-19,15	1956,25		-24,13			
1940,5	-19,49	1956,75		-24,60			
1941,5	-19,55	1957,25		-24,74			
1942,5	-20,12	1957,75		-24,56			
		1958,25		-25,07			

Луною. Эти значения с 1923,5 по 1931,5 — Брауна; с 1932,5 по 1942,5 — Брауера и Ваттса и с 1943,5 по 1950,5 — по N. A. O. Значение флюктуаций с 1952,75 по 1958,25 получены по результатам наблюдений Луны с помощью лунной камеры Марковица на Морской обсерватории США и отнесены к системе каталога N 30.

Выше упоминалось, что из наблюдений Луны невозможно получить вековое замедление вращения Земли, так как параметры орбиты Луны вследствие ее малой массы и близости к Земле изменяются под воздействием приливно-отливного эффекта. Эффект векового замедления вращения Земли практически в чистом виде определяется из сопоставления эфемеридных положений Солнца и планет с их наблюдаемыми положениями. Геоцентрические движения этих тел по сравнению с движением Луны малы, поэтому выявление эффекта периодической неравномерности вращения Земли из анализа движений Солнца и планет весьма затруднительно и требует высокоточных наблюдений.

Вековое ускорение Солнца обнаружено в 1906 г. Ковелем [10]. Первое уверенное доказательство неравномерности движений Венеры и Меркурия принадлежит Брауну [11]. Основные исследования по изучению неравномерности движений Солнца, Меркурия и Венеры выполнены Брауном [12], де Ситтером [3] и Джонсом [4, 7]. Эти исследования окончательно подтвердили земное происхождение флюктуаций в долготе Луны и дали численное значение коэффициента векового замедления вращения Земли.

При исследовании неравномерности движения Солнца и планет, так же как и при исследовании движения Луны, рассматриваются разности $\Delta L = \text{«наблюдаемые положения — эфемеридные положения»}$. Эфемериды Солнца, Венеры и Меркурия извлекаются из таблиц Ньюкома.

Для определения векового полуускорения c_{\odot} долготы Солнца решалась система уравнений вида:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{\odot} &= a_{\odot} + b_{\odot} T + c_{\odot} T^2 + \frac{n_{\odot}}{n_{\zeta}} B, \\ \Delta L_{\text{М}} &= a_{\text{М}} + b_{\text{М}} T + \frac{n_{\text{М}}}{n_{\odot}} c_{\odot} T^2 + \frac{n_{\text{М}}}{n_{\zeta}} B, \\ \Delta L_{\text{В}} &= a_{\text{В}} + b_{\text{В}} T + \frac{n_{\text{В}}}{n_{\odot}} c_{\odot} T^2 + \frac{n_{\text{В}}}{n_{\zeta}} B, \end{aligned} \right\} (21)$$

где: a_{\odot} , $a_{\text{М}}$ и $a_{\text{В}}$ — поправки к начальным значениям долгот Солнца, Меркурия и Венеры;

b_{\odot} , $b_{\text{М}}$ и $b_{\text{В}}$ — поправки к средним вековым движениям Солнца, Меркурия и Венеры;

c_{\odot} — вековое полуускорение долготы Солнца;

B — флюктуации в долготе Луны.

Коэффициенты при c_{\odot} выражают отношение скорости движения Меркурия и Венеры к скорости движения Солнца; коэффициенты при B — отношение скорости движения Солнца, Меркурия и Венеры к скорости движения Луны. Априорное введение последних коэффициентов в уравнения вносит предположение, что флюктуации долготы Луны B являются результатом внутривселенных явлений. B определяется из наблюдений Луны и в уравнениях считается известным. Определению подлежат a_{\odot} , b_{\odot} , c_{\odot} , $a_{\text{М}}$, $b_{\text{М}}$, $a_{\text{В}}$ и $b_{\text{В}}$.

После подстановки известных коэффициентов уравнения принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_{\odot} &= a_{\odot} + b_{\odot} T + c_{\odot} T^2 + 0,0748B, \\ \Delta L_{\text{М}} &= a_{\text{М}} + b_{\text{М}} T + 4,15c_{\odot} T^2 + 0,310B, \\ \Delta L_{\text{В}} &= a_{\text{В}} + b_{\text{В}} T + 1,50c_{\odot} T^2 + 0,112B. \end{aligned} \right\} (21')$$

Определение коэффициентов a и b для Солнца, Меркурия и Венеры производилось отдельно, причем для вычисления a_{\odot} и b_{\odot} использовались ряды определений прямых восхождений и склонений Солнца, для вычисления $a_{\text{М}}$ и $b_{\text{М}}$ — майские и ноябрьские прохождения * Меркурия и для вычисления $a_{\text{В}}$ и $b_{\text{В}}$ — майские прохождения * Венеры. Для вычисления c_{\odot} объединялись все три группы уравнений.

Полученные таким образом значения a , b и c_{\odot} подставлялись в систему исходных уравнений (21) и из них определялись B , которые на этот раз считались неизвестными. Удовлетворительная сходимость B , полученных по трем видам уравнений, указывала на общую причину происхождения — их влияние на движение Солнца, Меркурия и Венеры оказывалось пропорциональным коэффициентам $\frac{n_{\odot}}{n_{\text{З}}}$, $\frac{n_{\text{М}}}{n_{\text{З}}}$ и $\frac{n_{\text{В}}}{n_{\text{З}}}$, что являлось возможным только в том случае, если флюктуации B обусловлены неравномерностью вращения Земли.

Из рассмотрения системы уравнений (21') вытекает, что c_{\odot} определяется с наибольшим весом из уравнения поправок к движению Меркурия и с наименьшим весом из уравнения для Солнца. Однако вследствие относительной ограниченности наблюдений планет и больших систематических ошибок в этих наблюдениях * значение ускорения долготы Солнца практически определяется только из наблюдений самого Солнца. Используются главным образом наблюдения склонений Солнца, обладающие меньшей систематической ошибкой, чем наблюдения прямых восхождений.

Полученные таким образом значения поправок к долготам Солнца, Меркурия и Венеры приведены в работе Джонса [7]. Здесь будет уместно привести только выражение для поправки к долготе Солнца в таблицах Солнца Ньюкома, так как оно имеет прямое отношение к неравномерности всемирного времени, отождествляемого с приращением часового угла среднего Солнца относительно нулевого меридиана:

$$\Delta L_{\odot} = +1'',00 + 2'',97 T + 1'',23 T^2 + 0,0748040 B'', \quad (22)$$

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0,5, средняя гриничская полночь.

Введение поправки ΔL_{\odot} в среднюю долготу Солнца не ставит под сомнение теорию Солнца Ньюкома. Необходимость введения поправки ΔL_{\odot} в долготы таблиц Солнца Ньюкома следует из того, что время наблюдения не может быть выражено в тех единицах времени, в которых составлены таблицы Солнца. Время таблиц Ньюкома является абсолютным равномерным временем; в действительности длительность средних солнечных суток переменна, такими они выступают и в наблюдениях.

Таким образом ΔL_{\odot} является средством преобразования одной системы времени в другую, а не средством улучшения таблиц Солнца Ньюкома. $\Delta L_{\odot} = 1'',00$ представляет поправку средней долготы Солнца за счет введения в долготу средней флюктуации B ; коэффициент

* Имеются в виду наблюдения прохождений планет по диску Солнца.

$\Delta p_{\odot} = 2''{,}97$ компенсирует введение в значение средней долготы члена $c_{\odot} T^2$, для начальной эпохи $T = 0$ член $2''{,}97 \cdot T = 0$.

Эфемеридное время

Выше эфемеридное время было определено как абсолютное равномерное время небесной механики, единицы измерения которого определялись так же, как единицы всемирного времени, из астрономических наблюдений, но впредь считались неизменными — независимыми от скорости вращения Земли. Изучение движения Солнца, Луны и планет позволило найти неравномерность вращения Земли, которая выражается в виде отраженной неравномерности движения Солнца формулой (22). Поэтому намечается возможность определения шкалы эфемеридного времени через всемирное время и эмпирическую поправку. Таким образом полученное эфемеридное время не тождественно абсолютному времени Ньютона, однако является наилучшим приближением к нему.

Поправка к всемирному времени за неравномерность вращения Земли получается из выражения поправки к средней долготе Солнца, вычисленной по таблицам Солнца Ньюкома

$$\Delta L_{\odot} = +1''{,}00 + 2''{,}97T + 1''{,}23T^2 + 0{,}0748040B''$$

где T — в юлианских столетиях по 36 525 средних солнечных суток от 1900, январь 0,5, средняя гриничская полночь.

Средняя долгота Солнца увеличивается на одну угловую секунду за 24,349480 средних солнечных секунд. Считая источником неравномерности движения Солнца неравномерность вращения Земли, получим поправку к часовому углу среднего Солнца

$$\Delta t^s = 24{,}349480 \Delta L_{\odot} = +24^s{,}349 + 72^s{,}318T + 29^s{,}950T^2 + 1^s{,}82144B. \quad (23)$$

Δt выражает разность между эфемеридным временем и средним солнечным временем и является средством преобразования среднего солнечного времени в эфемеридное. С точки зрения равномерности эфемеридного времени введение первых двух членов поправки Δt не является необходимым. Первые два члена только наилучшим образом согласовывают начало и длительность эфемеридных суток с началом и длительностью средних солнечных суток в пределах эпохи определения флюктуаций B (1680—1930 гг.).

Производная $\frac{d\Delta t}{dt}$, если коэффициенты при T отнести к суткам, определит поправку к длительности средних солнечных суток эпохи T для приведения к длительности эфемеридных суток

$$\frac{d\Delta t}{dt} = +0^s{,}0020 + 0^s{,}00164 \cdot T + 0^s{,}00005 \frac{dB}{dt}, \quad (24)$$

где T — в юлианских столетиях от 1900, январь 0,5, средняя гриничская полночь.

Благодаря введению численно определенного эфемеридного времени достигается:

1) согласие между наблюдаемыми местами и эфемеридными местами небесных тел;

2) воспроизведение нового эталона времени, отвечающего основному требованию метрологии — постоянству единицы измерения во времени.

Определение эфемеридного времени через среднее время и эмпирическую поправку Δt удовлетворяет потребности теоретической астрономии. Однако определение времени в системе эфемеридных единиц на текущий момент остается пока неразрешенной проблемой. Трудности, связанные с использованием эфемеридного времени в практике Служ-

бы времени и частоты, заключаются в определении члена $1,82144 \cdot B$ формулы (23). Флюктуации B определяются из наблюдений Луны. Видимая угловая скорость движения Луны относительно звезд приблизительно в 27 раз меньше угловой скорости суточного движения звезд. Наблюдения покрытий или фотографирование Луны на фоне звезд вследствие неровностей диска Луны и ее либрации отягощены значительными случайными и систематическими ошибками; точность определения положения Луны относительно звезд значительно ниже точности регистрации прохождений звезд, являющейся средством определения среднего времени. Поэтому для получения надежных значений B необходима совместная обработка большого ряда наблюдений Луны. В настоящее время для определения B принято объединять наблюдения за год и получать среднегодовые значения флюктуаций B .

На Международном совещании в Париже [13] в 1950 г., посвященном фундаментальным постоянным астрономии и геодезии, была принята следующая рекомендация Международному астрономическому союзу: «Конференция рекомендует во всех случаях, когда средняя солнечная секунда вследствие ее изменчивости недостаточно точна как единица времени, применять как единицу времени длину звездного года 1900,0; время, измеряемое в этих единицах, называть эфемеридным временем; перевод среднего солнечного времени в эфемеридное время осуществляется посредством поправки Δt . Через выражение для Δt определяется так же секунда эфемеридного времени. Не рекомендуется и не предусматривается вводить какие-либо изменения ни в понятие, ни в способы определения всемирного времени».

Парижское совещание также рекомендовало для согласования эфемерид Солнца и Луны в долготы Луны, вычисляемые по таблицам Луны Брауна после исключения большого эмпирического члена, вводить поправку

$$-8^{\circ},72 - 26^{\circ},75 \cdot T - 11^{\circ},22 \cdot T^2, \quad (a)$$

Эта поправка складывается из поправки де Ситтера

$$\Delta L_{\zeta} = 4^{\circ},65 + 12^{\circ},96 \cdot T + 5^{\circ},22 T^2 \quad (b)$$

и части поправки Джонса

$$24^{\circ},349 + 72^{\circ},318 T + 29^{\circ},950 \cdot T^2,$$

которая при учете угловой скорости движения Луны (за 1^е времени — 0,055) дает поправку к средней долготе Луны

$$-13^{\circ},37 - 39^{\circ},71 \cdot T - 16^{\circ},44 \cdot T^2. \quad (c)$$

Сумма (b) и (c) дает поправку (a). Введение этой поправки в долготы Луны, вычисленные по таблицам Луны Брауна (после исключения большого эмпирического члена), позволит рассматривать значения

$$1,82144 \cdot B^*$$

как поправки к среднему солнечному времени для получения эфемеридного времени, так как члены $24^{\circ},349 + 72^{\circ},318 \cdot T + 29^{\circ},950 \cdot T^2$ уже содержатся в новом значении B .

Упомянутые рекомендации Международного совещания по фундаментальным постоянным астрономии были подтверждены 8-м съездом Международного астрономического союза (Рим, 1952 г.).

Более целесообразным за единицу времени было бы принять не звездный год, а тропический, т. е. интервал времени между последовательными прохождениями Солнца через точку весеннего равноденствия; тропический год совпадал бы со звездным годом, если бы прецессия не

* Имеется в виду, что B определена как разность наблюдаемой долготы Луны и долготы, вычисленной указанным способом.

перемещала точку весеннего равноденствия. Тропический год определяется непосредственно таблицами Солнца Ньюкома, а звездный год определяется через известную прецессию. Если принимать за единицу времени звездный год, то единица может измениться, если будет принято новое значение постоянной прецессии в результате ее более точного определения.

Вероятно, в связи с изложенными соображениями, 9-й съезд Международного астрономического союза в 1955 г. за единицу эфемеридного времени рекомендовал принять тропический год, эпохи 1900,0*.

В октябре 1960 г. в Париже состоялась XI Генеральная конференция по мерам и весам. Она приняла важные решения об установлении единой международной системы единиц — нового эталона метра, выраженного через длину световой волны, и утвердило определение секунды, рекомендованное 9-м съездом Международного астрономического союза.

Сутки определяются отношением

$$\frac{1}{365,24219878177}$$

где знаменателем является продолжительность тропического года в средних сутках в эпоху 1900,0.

Секунда определяется как $\frac{1}{86400}$ суток или $\frac{1}{31556925,9747}$

тропического 1900,0 года.

В некоторых случаях представление об эфемеридном времени связывают с движением эфемеридного меридиана относительно гриничского меридиана. Под эфемеридным меридианом понимают гриничский меридиан, который непрерывно вращается вне зависимости от истинной скорости вращения Земли со скоростью, которую имел гриничский меридиан в 1900 году.

Долгота эфемеридного меридиана $\Delta\lambda_e$ относительно гриничского меридиана определяется выражением:

$$\Delta\lambda_e = \frac{1}{4} (1 + \mu) \Delta t,$$

где Δt выражено в секундах времени, а $\Delta\lambda_e$ — в минутах дуги;

$\mu = 0,00273791$ — суточное тропическое движение среднего солнца в радианах [см. формулу (16)].

В связи с введением понятия эфемеридного меридиана возникают новые определения времени:

1. Всемирное время — есть часовой угол среднего солнца относительно гриничского меридиана $+12^h$.

2. Эфемеридное время — есть часовой угол среднего солнца относительно эфемеридного меридиана $+12^h$.

3. Гриничское звездное время — есть часовой угол точки весеннего равноденствия относительно гриничского меридиана.

4. Эфемеридное звездное время — есть часовой угол точки весеннего равноденствия относительно эфемеридного меридиана.

В табл. 4 приводятся поправки Δt для интервала времени с 1681,0 по 1958,25: с 1681,0 по 1921,5 — по Джонсу; с 1923,5 по 1931,5 — по Брауну; с 1932,5 по 1942,5 — по Брауну и Ваттсу; с 1943,5 по 1950,5 — по Nautical Almanac Office и с 1952,75 по 1958,25 — по Марковицу.

* Эпоха 1900,0 является началом 1900 тропического года, близким к 1 января и соответствующим моменту, когда непериодическая часть уравнения долготы Солнца равна $279^\circ 41' 48'', 04$.

Таблица 4

Поправки Δ = эфемеридное время — среднее солнечное время

$$\Delta t = +24^s,349 + 72^s,318 T + 29^s,950 T^2 + 1,82144 B = I + II + III + IV$$

Эпоха	I+II+III	IV	Δt	Автор
1681,0	+ 9 ^s ,62	-23 ^s ,17	-13 ^s ,55	Джонс
1710,0	- 4,94	- 7,14	-12,08	
1727,0	-11,12	+ 3,92	- 7,20	
1737,0	-13,96	+10,87	- 3,09	
1747,0	-16,19	+15,46	- 0,73	
1755,0	-17,54	+18,83	+ 1,29	
1771,0	-19,10	+24,66	+ 5,56	
1785,0	-19,21	+27,03	+ 7,82	
1792,0	-18,82	+26,47	+ 7,65	
1801,5	-17,83	+23,84	+ 6,01	
1809,5	-16,57	+21,49	+ 4,92	
1813,0	-15,90	+20,55	+ 4,65	
1821,8	-13,89	+18,25	+ 4,36	
1831,5	-11,14	+12,48	+ 1,34	
1837,4	- 9,19	+ 8,94	- 0,25	
1843,1	- 7,10	+ 7,85	+ 0,75	
1848,8	- 4,83	+ 7,23	+ 2,40	
1852,5	- 3,24	+ 6,14	+ 2,90	
1857,5	- 0,98	+ 4,37	+ 3,39	
1862,5	+ 1,44	+ 1,66	+ 3,10	
1867,5	+ 4,01	- 2,86	+ 1,15	
1872,5	+ 6,73	-11,62	- 4,89	
1877,5	+ 9,59	-17,09	- 7,50	
1882,5	+12,61	-20,60	- 7,99	
1887,5	+15,78	-23,77	- 7,99	
1891,5	+18,42	-26,12	- 7,70	
1894,5	+20,46	-27,74	- 7,28	
1897,5	+22,56	-29,12	- 6,56	
1900,5	+24,71	-28,91	- 4,20	
1903,5	+26,92	-26,41	+ 0,51	
1906,5	+29,18	-24,46	+ 4,72	
1909,5	+31,49	-23,28	+ 8,21	
1912,5	+33,86	-21,17	+12,69	
1915,5	+36,28	-18,85	+17,43	
1918,5	+38,75	-18,58	+20,17	
1921,5	+41,28	-18,54	+22,74	
1923,5	+43,00	-19,51	+23,49	Браун
1924,5	+43,86	- 20,20	+23,66	
1925,5	+44,74	-20,96	+23,78	
1926,5	+45,62	-21,62	+24,00	
1927,5	+46,50	-22,46	+24,04	
1928,5	+47,39	-23,77	+23,62	
1929,5	+48,29	-24,61	+23,68	
1930,5	+49,19	-25,14	+24,05	
1931,5	+50,10	-26,23	+23,87	
1932,5	+51,02	-28,29	+22,73	
1933,5	+51,94	-29,38	+22,56	
1934,5	+52,86	-30,22	+22,64	
1935,5	+53,80	-31,11	+22,69	
1936,5	+54,74	-32,22	+22,52	
1937,5	+55,68	-33,20	+22,48	
1938,5	+56,63	-33,68	+22,95	
1939,5	+57,59	-34,88	+22,71	
1940,5	+58,55	-35,50	+23,05	
1941,5	+59,52	-35,61	+23,91	
1942,5	+60,49	-36,65	+23,84	

Эпоха	I+II+III	IV	Δt	Автор
1943,5	+61 ^s ,47	-36 ^s ,68	+24 ^s ,79	Н. А. О.
1944,5	+62,46	-37,41	+25,05	
1945,5	+63,45	-38,29	+25,16	
1946,5	+64,45	-40,00	+24,45	
1947,5	+65,46	-38,89	+26,57	
1948,5	+66,47	-39,49	+26,98	
1949,5	+67,48	-40,02	+27,46	
1950,5	+68,51	-40,75	+27,76	
1952,75	+70,83	-41,25	+29,58	
1953,25	+71,35	-40,63	+30,72	
1953,75	+71,87	-41,55	+30,32	Марковиц
1954,25	+72,39	-42,29	+30,10	
1954,75	+72,92	-43,18	+29,74	
1955,25	+73,45	-43,23	+30,22	
1955,75	+73,98	-43,84	+30,14	
1956,25	+74,51	-43,95	+30,56	
1956,75	+75,03	-44,80	+30,23	
1957,25	+75,57	-45,07	+30,50	
1957,75	+76,10	-44,73	+31,37	
1958,25	+76,63	-45,67	+30,96	

Если вращающуюся Землю рассматривать как часы, то Δt будет являться поправкой этих часов, приводящей их показания к системе эфемеридного времени. Причем, когда Δt отрицательное — «земные часы» спешат, Земля вращается быстрее, когда Δt положительное — «земные часы» отстают, Земля вращается медленнее. Крайние по величине значения поправок «земных часов» приходятся на начало и конец исследованного отрезка времени, именно: 1681 год — (-13,6) и 1957,75 год — (+31,4); это объясняется прогрессивным членом 23,9507, характеризующим влияние приливо-отливного трения на скорость вращения Земли.

Трение приливов вызывает непрерывное увеличение длительности суток, выражающееся членом $0,001647$ формулы (24); каждые последующие сутки на $4,5 \cdot 10^{-8}$ сек. длиннее предшествующих, приращение длительности суток за столетие составит $0,00164$ сек. Амплитуда изменения длительности суток вследствие флюктуаций скорости вращения Земли за исследованный период достигала $0,0064$ сек. (-0,0047 сек. в 1870—1871 гг. и +0,0017 сек. в 1901—1910 гг.).

Существование неправильных флюктуаций скорости вращения Земли было обнаружено из сравнения орбитальных движений Луны и вращения Земли. Невысокая точность определения положения Луны не позволяла выяснить характер этих изменений скорости — являются ли они внезапными, скачкообразными или являются следствием накопления малых случайных изменений скорости.

Новые возможности для исследования эфемеридного времени и новые средства для его воспроизведения дает применение атомных и молекулярных эталонов частоты. С помощью цезиевого генератора в предположении, что линия поглощения цезия имеет постоянную частоту, начиная с 1955 г. Эссеном и Марковицем [14] определялось изменение скорости вращения Земли путем численного интегрирования кажущихся изменений частоты цезиевого генератора в единицах времени TU_2 . Постоянные интегрирования — значение атомного времени (TA)

в начальную эпоху и частота цезиевого генератора относительно эфемеридного времени определены за период 1955—1958 гг. под условием:

$$\sum (\Delta t - \Delta t_a)^2 = \min,$$

где:

$\Delta t = TE - TU2$ — получены по наблюдениям с лунной камерой (см. табл. 4);

$$\Delta t_a = TA - TU2.$$

Ниже приведены значения Δt_a и $\frac{d\Delta t_a}{dt}$ для эпохи 1955,5 и 1958,0, полученные после уравнивания:

Год	Δt_a	$\frac{d\Delta t_a}{dt}$
1955,5	30 ^s ,20	+0,20 <i>ms</i> ·год ⁻¹
1958,0	31,10	+0,58 <i>ms</i> ·год ⁻¹

Применение атомных и молекулярных эталонов времени и частоты дает возможность интерполировать и экстраполировать эфемеридное время. Не исключая в основе эфемеридное время, атомное время позволяет решать задачу воспроизведения астрономической системы счисления времени с высокой степенью точности.

Движение полюсов и сезонная неравномерность вращения Земли

Рассмотренные изменения положения оси вращения Земли в пространстве и изменение скорости ее вращения (прогрессивное замедление) обусловлены воздействием внешних причин — полем тяготения Солнца, планет и Луны.

Кроме внешних сил, вызывающих эти явления, действуют силы, заключенные в самой Земле, приводящие как к изменению положения оси вращения в теле Земли, так и к изменению скорости вращения Земли. Эти процессы протекают таким образом, что количество движения вращающейся Земли сохраняется. Первое явление принято называть колебанием полюса, второе — сезонной неравномерностью вращения Земли.

В настоящее время точность астрономических определений времени и воспроизведение времени с помощью часов вполне сопоставима с неравномерностью астрономической системы времени, вызываемой этими явлениями.

А. Колебание полюсов

Выражение для часового угла средней точки весны, определяющего моменты времени в системе звездных единиц и для часового угла среднего экваториального солнца, определяющего моменты времени в системе средних единиц имеет вид:

$$H_s^m = 18^h 38^m 45^s,836 + (24^h + 3^m 56^s,5553605)j_m + 0^s,0930T^2 - l,$$

$$H_{\odot}^m = 24^h j_m - l,$$

где l — долгота меридиана, относительно которого отсчитываются часовые углы.

Условие равномерности астрономической системы счисления времени требует неподвижности меридианных плоскостей в теле Земли или учета их перемещения. Положение каждой меридианной плоскости определяется касательной к отвесной линии в точке наблюдения и мгновенной осью вращения Земли. Таким образом изменение направления касательной или положения мгновенной оси вращения в теле Земли сопровождается изменением направления меридианной плоскости, а следовательно, и часового угла точки весны и среднего солнца.

Изменение направления касательной и отвесной линии, вызывающее так называемое **неполярное изменение долготы**, связано с местными тектоническими процессами, носит случайный характер, невелико по амплитуде и в равнинных районах маловероятно.

Изменение направления оси вращения Земли, вызывающее так называемое **полярное изменение долготы**, связано как с начальными условиями вращения Земли (свободная нутация), так и с перемещениями масс по поверхности Земли сезонного характера; изменение носит квазипериодический характер.

В конце восемнадцатого столетия Эйлер, считая Землю изолированным в пространстве, абсолютно твердым однородным эллипсоидом вращения, теоретически показал, что ось вращения Земли **может** совершать движение в теле Земли, являясь образующей конуса с очень малым углом в центре с периодом около десяти месяцев; теория может определить только период, но не дает значения угла.

Движение полюсов Земли было обнаружено только в середине девятнадцатого века, когда астрономические наблюдения достигли достаточной точности. Поводом для изучения этого явления послужило периодическое изменение широт астрономических обсерваторий. Пионерами исследования изменчивости широт были пулковские астрономы: Петерс, Гюльден и Нюрен. Впервые периодическое изменение широты места было подмечено Петерсом в 1842—1843 гг. из наблюдений зенитных расстояний Полярной. В 1875 г. Нюрен окончательно приходит к выводу, что широта Пулкова не остается постоянной: то увеличивается, то уменьшается. Период изменения широты Нюрен оценивает в 430 суток. В конце девятнадцатого века Костинский дает формулу (25), связывающую изменение широты места на заданном меридиане с обстоятельствами движения полюса.

Дальнейшие теоретические исследования и наблюдения установили, что мгновенный полюс Земли непрерывно перемещается в направлении суточного вращения Земли, описывая сложную кривую вокруг **среднего полюса**, не удаляясь от него более чем на 13 м (0,3"). Движение мгновенного полюса Земли по ее поверхности объясняется несовпадением мгновенной оси вращения Земли с наименьшей главной осью эллипсоида инерции Земли.

Принято разлагать общее движение полюса на два составляющих движения. Первое движение называют **свободной или эйлеровской нутацией**. Движение мгновенного полюса вследствие свободной нутации есть движение равномерное и происходит по траекториям, близким к окружностям, с центрами в полюсах инерции. Период этого движения, выведенный Чандлером из большого количества наблюдений и называемый **чандлеровским периодом**, в среднем равен 430 суткам; период является функцией упругих свойств Земли.

Перемещение масс по поверхности Земли с годичным циклом изменяет положение главных осей инерции эллипсоида Земли с тем же периодом. Это обстоятельство обуславливает годичную вариацию в эйлеровском движении полюса, которую и рассматривают как вторую составляющую общего движения. Вследствие годичной составляющей мгновенный полюс Земли описывает эллиптическую траекторию, которая по вычислениям Орлова А. Я. [15] имеет длину большой полуоси около $0",088$, а малой— $0",075$. Сезонная составляющая сохраняет постоянство только в среднем за большой отрезок времени, а от года к году может изменяться по амплитуде и фазе в силу неустойчивости метеорологических факторов. В результате свободной и сезонной нутации ось вращения Земли совершает около наименьшей оси инерции сложное движение с чандлеровским, годовым и еле заметным полугодовым периодом.

В настоящее время движение полюса определяют из наблюдений над изменением широт обсерваторий. Координаты мгновенного полюса X и Y можно определить решением системы не менее двух уравнений вида:

$$\varphi - \varphi_0 = X \cos \lambda_0 + Y \sin \lambda_0, \quad (25)$$

где: φ — мгновенная широта места наблюдения;
 φ_0 и λ_0 — средняя широта и долгота места наблюдения, соответствующие положению среднего полюса;
 X и Y — прямоугольные координаты мгновенного полюса относительно среднего полюса (ось X направлена к Гриничу).

В 1898 г. решением 12-й Международной геодезической конференции была создана Международная служба широты (МСШ). В настоящее время МСШ состоит из пяти широтных станций — Китаб, Карлофорте, Гейтерсбург, Укия и Мидзусава. В задачу МСШ входит наблюдение за изменением широт на перечисленных станциях и вычисление по результатам наблюдений координат мгновенного полюса.

Координаты мгновенного полюса, вычисленные МСШ, относятся к среднему полюсу некоторой условной эпохи (1900—1905 гг.). Положение среднего полюса этой эпохи определяется средними широтами той же эпохи. По исследованию Орлова, с течением времени средние широты станций медленно меняются; причины этих изменений носят **неполярный** характер. Благодаря этому средний полюс прежней эпохи уже не находится в центре траектории мгновенного полюса, определяемого координатами данной эпохи. Поэтому Орлов [16] предложил метод обработки наблюдений широтных станций, основанный на отрицании заметного **векового** полярного изменения средних широт станций, как следствия векового перемещения среднего полюса. Положение среднего полюса Орлов определяет средними широтами эпохи наблюдения, а координаты мгновенного полюса данной эпохи — относительно среднего полюса той же эпохи.

Программа наблюдений и методика обработки, принятая МСШ, не позволяет получить координаты полюса непосредственно после окончания наблюдений данной эпохи, а требует завершения определенного ряда наблюдений, вследствие чего координаты полюса вычисляются с опозданием более чем на один год. Теоретические и экспериментальные исследования коллектива Полтавской обсерватории АН УССР под руководством Орлова привели к созданию новой оригинальной программы наблюдений и метода их обработки, позволяющих получать координаты полюса на эпоху последних наблюдений, не ожидая результатов последующих наблюдений.

Орлов [15] разработал также методику вычисления предварительных значений координат полюса по наблюдениям широты на одной станции, приняв по результатам анализа многочисленных наблюдений для годовых составляющих координат полюса выражения:

$$X = +0^{\circ},089 \cos(36^{\circ}t + 112^{\circ}),$$

$$Y = -0^{\circ},075 \sin(36^{\circ}t + 112^{\circ}),$$

где t — в десятых долях года от начала года. Чандлеровская составляющая получается из наблюдений данной эпохи.

С точностью до малых величин первого порядка поправка $\Delta\lambda$ в мгновенное значение долготы для приведения ее к среднему полюсу определяется выражением

$$\Delta\lambda_t = \frac{1}{15} \operatorname{tg} \varphi (Y_t \cos \lambda - X_t \sin \lambda). \quad (26)$$

Поправка за приведение к средней долготе поправки часов, полученной из астрономических наблюдений

$$\Delta U_{\lambda t} = \frac{1}{15} \operatorname{tg} \varphi (X_t \sin \lambda - Y_t \cos \lambda). \quad (27)$$

Практически астрономическая система счисления времени воспроизводится в виде радиосигналов точного времени и поправок к ним. Время момента подачи этих сигналов (H_m) получается как весовое среднее из времени моментов (H), определяемых отдельными наблюдателями. В общем виде для H_m имеем

$$H_m = \frac{[HP]}{[P]},$$

где P — вес определения времени данным наблюдателем, или

$$H_m = \frac{[H'P]}{[P]} + \frac{[\Delta U_{\lambda t} P]}{[P]} = H'_m + \Delta H_{\lambda t}, \quad (28)$$

где $\Delta H_{\lambda t}$ — поправка к времени подачи сигналов за приведение мгновенных долгот астрономических инструментов к средним долготам.

В развернутом виде выражение для $\Delta H_{\lambda t}$ примет вид:

$$\Delta H_{\lambda t} = \frac{1}{15} X_t \frac{[\sin \lambda \operatorname{tg} \varphi P]}{[P]} - \frac{1}{15} Y_t \frac{[\cos \lambda \operatorname{tg} \varphi P]}{[P]} = AX_t - BY_t.$$

Значение поправки $\Delta H_{\lambda t}$ зависит от координат мгновенного полюса (X_t и Y_t), от долгот (λ) и широт (φ) астрономических инструментов и от весов, придаваемых наблюдениям на этих инструментах. Вообще представляется возможным выбрать такое расположение служб времени по широте и долготе, которое обеспечит минимальное значение (и даже нулевое) для поправки $\Delta H_{\lambda t}$. В этом случае должно иметь место равенство:

$$[\sin \lambda \operatorname{tg} \varphi P] - [\cos \lambda \operatorname{tg} \varphi P] = 0.$$

Значение коэффициентов A и B для системы Государственной службы времени СССР в среднем равно 0,055. Погрешность поправки ΔH_{λ} в зависимости от ошибок (m_x и m_y) в координатах мгновенного полюса определяется:

$$m_{\Delta H_{\lambda}} = \pm \sqrt{A^2 m_x^2 + B^2 m_y^2}.$$

Если считать, что $m_x = m_y$, а $A = B = 0,055$, то $m_{\Delta H_{\lambda}} = \pm 0,078 m''_{xy}$.

Достаточно объективное суждение о точности определения координат полюса в настоящее время дать невозможно, так как и собственно наблюдения и методика их совместной обработки отягощены систематическими ошибками, превышающими их случайные погрешности.

Карнера [17] в отчете о деятельности МСШ оценивает погрешность (вероятная ошибка) определения координат полюса $\pm 0''{,}01$, тогда

$$m_{\Delta H_{\lambda}} = \pm 0,001 \text{ сек.}$$

Сопоставление координат полюса за 1948,9—1950,9 гг., вычисленных Орловым [18] по данным станций МСШ и по результатам наблюдений широты только в СССР, дают возможность сделать вывод, что средняя квадратическая ошибка координат полюса не превышает $\pm 0''{,}03$; в этом случае

$$m_{\Delta H_{\lambda}} = \pm 0,003 \text{ сек.}$$

А. М. Стойко приводит в Bulletin Horaire [19] значения координат полюса, вычисленные Международным бюро времени (SIR) и Международной службой широты (SIL). Сопоставление поправок в моменты Heure Definitive, вычисленных по этим двум рядам значений координат полюса, дает периодические отклонения от $-0,8$ до $+4,6$ мсек. Соответ-

ствующие значения для эталонного времени Службы времени СССР будут от $-1,5$ до $+9,0$ мсек, а

$$m_{\Delta H_\lambda} = \pm 0,005 \text{ сек.}$$

Служба времени СССР для вычисления эталонного времени использовала с 1953 г. координаты полюса, вычисляемые Полтавской обсерваторией АН УССР на основе наблюдений ряда широтных станций, а с 1961 г. — координаты полюса SIR.

Точность определения эталонного времени оценивается средней квадратической погрешностью $\pm 0,003$ сек. Таким образом можно считать, что точность эталонного времени лимитируется погрешностями определения координат полюса.

Принципиально является возможным определение координат мгновенного полюса из результатов определения времени на станциях, расположенных соответствующим образом по долготе. Предположив, что станции расположены на широте 56° ($\text{tg } \varphi = 1,5$), а по долготе удалены друг от друга на 90° , можно написать уравнение, связывающее погрешность в определении разности долгот с ошибкой координат полюса:

$$m_{xy} = \pm 7 \cdot m_{\Delta \lambda}^2.$$

Приняв ошибку определения разности долгот на 15-дневном интервале $\pm 0,010$ сек., что соответствует работе лучших служб времени, получим для средней квадратической ошибки определения координат полюса

$$m_{xy} = \pm 0,07.$$

Государственная служба времени СССР не располагает достаточным количеством станций, благоприятно расположенных для определения колебаний широты, а две-три пары станций при существующей точности наблюдения времени не могут обеспечить определение координат полюса с необходимой надежностью; однако постановка исследований в этом направлении представляет несомненный интерес.

Для суждения о влиянии применения тех или иных координат полюса на систему эталонного времени Службы времени СССР в табл. 5 приведены разности $\Delta H_0 - \Delta H_\lambda$ на середину месяца, где: ΔH_0 — поправки за колебание полюса в систему эталонного времени, вычисленные по координатам полюса Полтавской обсерватории; ΔH_λ — поправки за колебание полюса в систему эталонного времени, вычисленные по координатам полюса SIR (по 1956 г.) и SIR (с 1957 г.).

Таблица 5

Месяц	$\Delta H_0 - \Delta H_\lambda$ в мсек				
	1955	1956	1957	1958	1959
Январь	0	+10	+4	+2	0
Февраль	+4	+11	+4	+4	0
Март	+13	+15	+4	+7	+1
Апрель	+12	+8	+8	+9	+2
Май	+8	+7	+9	+9	+1
Июнь	+6	+3	+8	+7	-1
Июль	+7	+5	+9	+6	-2
Август	+4	+10	+10	+6	-3
Сентябрь	+5	+13	+9	+7	-2
Октябрь	+4	+10	+9	+8	-1
Ноябрь	+3	+7	+5	+3	0
Декабрь	+1	+5	+3	+3	-3

Приведенные значения разностей $\Delta H_0 - \Delta H_A$ указывают на наличие в координатах полюса как систематических, так и случайных ошибок; ясно выступает периодическая ошибка с периодом около года и амплитудой около 0,005 сек.

До второй половины 1958 г. Международное бюро времени вычисляло координаты мгновенного полюса в той же системе, что и Международная служба широты, т. е. относительно среднего полюса эпохи 1900—1905 гг. Со второй половины 1958 г. вычисление координат мгновенного полюса МБВ производит относительно среднего полюса эпохи наблюдения, т. е. так же, как и Советская служба широты. Результат этого сказался в хорошей согласованности поправок за движение полюса в эталонное время с конца 1958 г.

Для службы времени наиболее существенным является исключение периодического влияния движения полюса на измерение времени. Поэтому согласованное с Советской службой широты решение МБВ о вычислении мгновенных координат полюса относительно среднего полюса эпохи наблюдения является положительным для службы времени.

С точки зрения дальнейшего развития и повышения точности работы службы времени и частоты, максимальной предельной погрешностью определения координат мгновенного полюса необходимо считать $0''{,}01$, при вычислении значения координат через 0,05 года. Эта погрешность вносит ошибку в определение эталонного времени около 0,001 сек. И в определение действительного значения частоты около $1-2 \cdot 10^{-9}$.

Б. Сезонная неравномерность вращения Земли

Неравномерность вращения Земли, носящая прогрессивный характер или имеющая долгий период, приводит к значительным отклонениям времени наблюдаемых астрономических явлений от времени тех же явлений, вычисленного по гравитационной теории. Уклонение, являющееся следствием прогрессивного замедления, достигает за 1200 лет одного часа* и поэтому самые примитивные астрономические наблюдения времени античной эпохи позволили Галлею обнаружить ускорение обращения Луны. Долгопериодические изменения скорости вращения Земли, имея большую амплитуду, не дают столь значительных отклонений; так из приведенной выше табл. 4 следует, что с 1785 по 1897 г. отклонение наблюдаемого времени от эфемеридного не превышает одной минуты**. Естественно, что обнаружить подобные отклонения во времени наступления астрономических явлений удалось только из наблюдений послегалилеевской эпохи, когда учет неравенств орбитальных движений достиг высокого совершенства, а точность астрономических наблюдений несравненно выросла.

В предположении, что изменение скорости вращения Земли годичного периода имеет тот же порядок, как и для изменения долгого периода, например $\pm 0{,}002$, отклонение наблюдаемого времени от эфемеридного будет $\pm 0,1$ сек., что соответствует неравенству в долготе Луны $\pm 0''{,}05$. Это значит, что для выявления годичной неравномерности вращения Земли необходимо уметь определять положение Луны относительно звезд со средней погрешностью не превышающей $\pm 0''{,}01$; даже при современной технике астрономических наблюдений эта точность недостижима.

Проблема сезонной неравномерности вращения Земли возникла лишь после того, как точность измерения времени с помощью часов

* Это соответствует неравенству (отклонению) в долготе Луны, составляющему $33'$.

** Это соответствует неравенству в долготе Луны, составляющему $33''$.

оказалась достаточной для выявления этого эффекта. Использование пьезоэлектрического свойства природных кристаллов кварца для стабилизации частоты электронных генераторов тока высокой частоты позволило создать сначала генераторы стабильных частот, а позднее использовать их в качестве регулятора хода часов, названных «кварцевыми» часами.

Исследования показаний кварцевых часов в системе астрономического времени (*TU1*) выявили сезонное закономерное изменение хода часов или сезонную неравномерность астрономического счета времени. Почти все исследования сезонной неравномерности, начатые с 1935 г., связаны с изучением хода кварцевых часов. Сезонное изменение впервые было надежно определено Н. М. Стойко в 1937 г.

Принято представлять сезонную неравномерность длительности суток в виде суммы синусоидальных членов с годичным и полугодичным периодом:

$$\Delta\tau = a_1 \sin \frac{2\pi}{365} (j+j_1) + a_2 \sin \frac{4\pi}{365} (j+j_2), \quad (29)$$

где: j — порядковый номер суток от начала года;

j_1 и j_2 — номера суток от начала года, соответствующие нулевому значению слагаемых;

a_1 и a_2 — амплитуда годичных и полугодичных членов.

Интегрирование выражения $\Delta\tau$ в пределах от 0 до j дает формулу поправки в астрономическую систему счисления времени *TU1* для получения квазиравномерного времени *TU2**:

$$\begin{aligned} \Delta T = & -A_1 \cos \frac{2\pi}{365} (j+j_1) - A_2 \cos \frac{4\pi}{365} (j+j_2) = A_1 \sin \frac{2\pi}{365} (j+j_1-91,2) + \\ & + A_2 \sin \frac{4\pi}{365} (j+j_2-45,6), \end{aligned} \quad (30)$$

где:

$$A_1 = \frac{365}{2\pi} a_1;$$

$$A_2 = \frac{365}{4\pi} a_2.$$

Формула (29) может быть представлена в виде выражения

$$\Delta\tau = a_1 \sin \frac{2\pi}{365} j + \beta_1 \cos \frac{2\pi}{365} j + a_2 \sin \frac{4\pi}{365} j + \beta_2 \cos \frac{4\pi}{365} j,$$

связанного с формулой (29) соотношениями:

$$a_1 = \sqrt{\alpha_1^2 + \beta_1^2}; \quad a_2 = \sqrt{\alpha_2^2 + \beta_2^2};$$

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi}{365} j_1 = \frac{\beta_1}{\alpha_1}; \quad \operatorname{tg} \frac{4\pi}{365} j_2 = \frac{\beta_2}{\alpha_2}.$$

При определении сезонной неравномерности с помощью кварцевых часов рассматриваются ходы или поправки этих часов в системе астрономического времени *TU1*. Радиоспециалисты утверждают, что собственная частота колебаний пьезокварцевого элемента кварцевых часов постепенно стабилизируется и со временем делается постоянной; процесс

* Квазиравномерным временем называется время, определяемое вращением Земли, свободным от неравномерностей короткого периода.

стабилизации, называемый старением кварца, протекает по экспоненте. Изучение кривых хода многих кварцевых часов показывает, что эта закономерность не находит в них своего отражения. Очевидно поведение кварцевых часов, содержащих, кроме кварцевых элементов, ряд других деталей, подверженных влиянию внешних условий эксплуатации, не подчиняется экспоненциальному закону. Парабола или гипербола в ограниченной области может достаточно хорошо приближаться к экспоненте, в то же время давая более широкие возможности аппроксимации хода часов. Опыт показывает, что аппроксимация по гиперболе, параболе или экспоненте, если это возможно, дает разногласия, лежащие за пределами погрешностей окончательных результатов [20], поэтому целесообразно использовать для аппроксимации хода часов квадратичную параболу, позволяющую свести к минимуму вычислительные операции.

В этом случае выражение, представляющее ход часов, будет иметь вид:

$$g = g_0 + \Delta g j + \delta g j^2 + \alpha_1 \sin \frac{2\pi}{365} j + \beta_1 \cos \frac{2\pi}{365} j + \alpha_2 \sin \frac{4\pi}{365} j + \beta_2 \cos \frac{4\pi}{365} j, \quad (31)$$

где j — в сутках от начала года.

Применение выражения (31) для определения сезонной неравномерности

$$\Delta \tau = \alpha_1 \sin \frac{2\pi}{365} j + \beta_1 \cos \frac{2\pi}{365} j + \alpha_2 \sin \frac{4\pi}{365} j + \beta_2 \cos \frac{4\pi}{365} j$$

возможно только в случае использования для аппроксимации интервала не менее двух лет. При использовании интервала менее двух лет (например, годичного) аппроксимация в общем случае невозможна, так как создается значительная неопределенность соотношения параметров параболического и синусоидального членов.

Практически идентичные результаты дает метод последовательного определения сначала параболического члена, а затем синусоидальных членов с годичным и полугодичным периодом; применение этого метода значительно экономит время.

Исходя из ожидаемой точности определения неравномерности вращения Земли можно считать вполне достаточным ее вычисление по дискретным значениям хода через $1/12$ года, взятым как среднее за этот интервал; при этом максимальная возможная погрешность в определении неравномерности за счет линейного осереднения на интервале $1/12$ года не превысит 3—4% от ее амплитуды.

Автором были получены значения $\Delta \tau$ и ΔT за период с 1951 по 1960 г. по кварцевым часам Харьковского государственного института мер и измерительных приборов в системе эталонного времени Службы времени СССР.

Аппроксимировались среднемесячные ходы часов g_j на интервале в два года сначала по формуле

$$g_j = g_0 + \Delta g \cdot j + \delta g \cdot j^2 + v_j,$$

а затем остаточные отклонения

$$\Delta \tau_j = g_j - (g_0 + \Delta g \cdot j + \delta g \cdot j^2)$$

по формуле

$$\Delta \tau = \alpha_1 \sin \frac{2\pi}{365} j + \beta_1 \cos \frac{2\pi}{365} j + d_2 \sin \frac{4\pi}{365} j + \beta_2 \cos \frac{4\pi}{365} j.$$

В каждом случае группы по 24 условных уравнения решались методом наименьших квадратов. Результаты определения неравенства длительности суток $\Delta \tau$ и поправки ΔT к астрономическому времени TUT приве-

дены в табл. 6. Как $\Delta\tau$, так и ΔT представляют совместное влияние сезонной неравномерности вращения Земли и местных периодических факторов, оказывающих воздействие на ход кварцевых часов. В них так же находит отражение периодическая погрешность астрономических

Таблица 6

Совместное влияние сезонной неравномерности вращения Земли и местных факторов на ходы и поправки кварцевых часов (в мсек)

$$\Delta T = A_1 \sin \frac{2\pi}{365} (J + J'_1) + A_2 \sin \frac{4\pi}{365} (J + J'_2); \quad \Delta\tau = a_1 \sin \frac{2\pi}{365} (J + J'_1) + a_2 \sin \frac{4\pi}{365} (J + J'_2).$$

Эпоха определения	Часы	A_1	J'_1	A_2	J'_2	a_1	J'_1	a_2	J'_2
VII. 1951—VI. 1953	3	+62	-41	+11	+75	+1,05	+50	+0,37	+121
VII. 1952—VI. 1954	3	+58	-41	+6	+98	+0,99	+50	+0,20	+144
XI. 1952—X. 1954	2	+37	-19	+10	+72	+0,63	+72	+0,34	+118
XII. 1953—XI. 1955	2	+46	-34	+8	+70	+0,78	+57	+0,27	+116
VI. 1953—VI. 1955	3	+53	-47	+8	+65	+0,90	+44	+0,27	+111
VII. 1953—VI. 1955	4	+25	-32	+6	+71	+0,42	+59	+0,20	+117
XII. 1953—XI. 1955	2	+44	-42	+17	+58	+0,75	+49	+0,58	+104
XII. 1953—XI. 1955	3	+45	-41	+11	+75	+0,76	+50	+0,37	+121
XII. 1953—XI. 1955	4	+22	-40	+6	+74	+0,37	+51	+0,20	+120
XII. 1954—XI. 1956	3	+50	-45	+9	+58	+0,85	+46	+0,31	+104
XII. 1954—XI. 1956	4	+30	-48	+5	+59	+0,51	+43	+0,17	+105
XII. 1954—XI. 1956	2	+53	-52	+7	+69	+0,90	+39	+0,24	+115
XII. 1955—XI. 1957	2	+26	-67	+7	+59	+0,44	+24	+0,24	+105
XII. 1955—XI. 1957	4	+28	-58	+4	+63	+0,48	+33	+0,14	+109
III. 1958—II. 1959	3 мин.	+26	-40	+6	+63	+0,44	+51	+0,20	+109
III. 1959—II. 1960	3 мин.	+27	-16	+9	+70	+0,46	+75	+0,31	+116

определений времени, послуживших для образования системы эталонного времени.

ΔT и $\Delta\tau$ табл. 6 являются редукциями, которые необходимо прибавить к поправкам или ходам часов, определенным в системе эталонного времени ($TU1$) для приведения показаний этих часов в систему квазиравномерного времени ($TU2$).

Значение амплитуды ΔT с годовым периодом убывает с 60 миллисекунд в 1950 г. до 25 миллисекунд к 1959 г. Таким образом амплитуду ΔT нельзя считать от года к году постоянной.

Геофизические исследования, выполненные за последние годы рядом авторов, подтверждают земное происхождение сезонной неравномерности: причину возникновения сезонной неравномерности находят в трении перемещающихся в том или ином направлении в зависимости от времени года масс воздуха о земную поверхность. Значение амплитуды ΔT , объясняемой этим явлением, у различных авторов получается в пределах от 15 до 30 миллисекунд. Достаточно определенное объяснения для происхождения полугодового члена сезонной неравномерности пока не найдено.

В настоящее время определение сезонной неравномерности вращения Земли с более высокой точностью, чем с кварцевыми часами может быть выполнено путем использования для этой цели атомных или молекулярных эталонов частоты.

В последних двух строках табл. 6 приведены коэффициенты уравнения сезонной неравномерности вращения, найденные из сопоставления эталонного времени ($TU1$) с «атомным временем» (AT), полученным с помощью молекулярного генератора (мазера) и кварцевых часов ХГИМИП. Ниже по вычислениям Н. М. Стойко [21] приведены аналогичные выражения сезонной неравномерности вращения Земли относительно цезиевого репера частоты с 1955 по 1958 г. в системе оконча-

тельного времени Международного бюро времени (МБВ), в системе эталонного времени СССР (ЭВ) и в системе времени, полученного по двум зенитным трубам в Вашингтоне и Ричмонде (ЗТ)

$$\text{МБВ} \dots \Delta T = 27^{ms} \sin \frac{2\pi}{365} (j-34) + 9^{ms} \sin \frac{4\pi}{365} (j+72),$$

$$\text{ЭВ} \dots \Delta T = 26^{ms} \sin \frac{2\pi}{365} (j-37) + 8^{ms} \sin \frac{4\pi}{365} (j+65),$$

$$\text{ЗТ} \dots \Delta T = 23^{ms} \sin \frac{2\pi}{365} (j-31) + 3^{ms} \sin \frac{4\pi}{365} (j+81).$$

Несмотря на то, что формула годичной флюктуации от года к году несколько изменяется вследствие геофизических причин и погрешностей определения, своевременный учет годичной флюктуации вполне оправдывается. По представлению МБВ для текущей работы Служб времени Генеральная ассамблея МАС (1955 г.) рекомендовала использовать выражение для

$$\Delta T = 28^{ms} \sin \frac{2\pi}{365} (j-38) + 9^{ms} \sin \frac{4\pi}{365} (j+70). \quad (32)$$

Определение ΔT по исследованию показаний кварцевых часов и цезиевых реперов частоты за период 1955—1958 гг. [21] дало выражение для

$$\Delta T = +26^{ms} \sin \frac{2\pi}{365} (j-31) + 8^{ms} \sin \frac{4\pi}{365} (j+65). \quad (33)$$

Имея в виду, что погрешность определения или случайное изменение ΔT от года к году имеет порядок разности параметров этих выражений, для последующего применения МБВ рекомендована ранее введенная формула (32).

Заключение

Непрерывно повышающиеся требования к точности воспроизведения шкалы времени и частоты заставляют исследователей работать как в области изучения теоретических принципов, положенных в основу воспроизведения времени, так и в области создания новых более совершенных приборов для определения времени с помощью астрономических наблюдений и приборов для хранения времени.

Развитие ракетной и баллистической техники движения, давая в перспективе исследователям новые средства для изучения природы времени, предъявляет уже сейчас исключительно высокие требования к организации и точности воспроизведения шкалы времени. Геофизические исследования требуют независимости шкалы времени от физических свойств Земли и характера ее вращения.

Благодаря применению таких совершенных средств хранения времени и частоты, как атомные и молекулярные часы, становится актуальным вопрос о контроле и в дальнейшем об определении с помощью физического эталона времени некоторых параметров, положенных в основу астрономической системы счисления времени.

Эфемеридное время, ранее имевшее смысл только для изучения движения небесных тел, теперь становится необходимым звеном в работе Службы времени и частоты. Систематическое определение эфемеридного времени становится задачей сегодняшнего дня. Повышение точности астрономических определений времени благодаря введению в эксплуатацию новых астрономических инструментов вызвало необходимость ревизии организации и методики работы Службы широты. Несколько лет назад результаты определения сезонной неравномер-

ности вращения Земли являлись предметом дискуссии, так как точность этих определений была сопоставима с самой величинной сезонной неравномерности. Использование высокостабильных кварцевых и молекулярных часов позволило систематически и уверенно определять параметры сезонной неравномерности вращения Земли и использовать их в повседневной работе Службы времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Newcomb. Resarches on the motion of the Moon. *Astronom. pap. Americ. Ephem.*, vol. 9, Washington, 1912.
2. E. Brown. *Tables of the motion of the Moon*. New Chewn, 1918.
3. W. de Sitter. On the secular accelerations and the fluctuations of the longitudes of the Moon, the Sun, Mercury and Venus. *B. A. N.*, № 124, 1927.
4. H. Spenser Jones. Discussion of observations of occultations of stars by the Moon 1671—1908, being a revision of Newcombs. *Ann. Cape obs.*, vol. 13, 1932.
5. G. Clemens. On the system of astronomical constants. *A. J.* 53, 1948.
6. D. Brouwer. A study of the changes in the rate of rotation of the Earth. *A. J.* 57, 1952.
7. H. Spenser. The rotation of the Earth and the secular accelerations of the Sun, Moon and planetes. *M. N.* 99, 1939.
8. E. Brown. The motion of the Moon, 1923—1931. *M. N.* 93, 1933.
9. D. Brouwer and C. Watts. A comparison of the results of occultations and meridian observations of the Moon. *A. J.* 52, 1947.
10. P. Cowell. On the secular accelerations of the Earth's orbital motion. *M. N.* 66, 1906.
11. Report of the British association for the advancement of science. London, 1914.
12. E. Brown. The evidence for changes in the rate of the rotation of the Earth and their geophysical consequences, with a summary and discussion of the deviation of the Moon and Sun from their gravitational orbits. *Jale Trans.*, vol. 3, part. 6, 1926.
13. *Colloques Internationaux du Centre National de la Recherche Scientifique Constans Fundamentales de l'Astronomie*. Paris, 1950.
14. L. Essen and W. Markowitz. Variation in the speed of rotation of the Earth since June 1955. *Nature*, vol. 181, № 4615, 1958.
15. А. Я. Орлов. О среднем годовом движении главных осей инерции Земли. *ДАН СССР*, том IX, № 7, 1946.
16. А. Я. Орлов. Координаты полюса с 1892 по 1939 г. *ДАН СССР*, том XXXVII, № 9, 1942.
17. *Resultate des Internationalen Breiten dienstes*. Band VIII, 1940, Berlin.
18. А. Я. Орлов. Полудня 1948,9—1950,9 по международным данным и по одним только наблюдениям в Пулковско. *А. Ц.* № 126, 1952.
19. *Bulletin Horaire Bureau International de l'Heure (BIH)*, № II (serie F), september 1956.
20. А. И. Константинов. Исследование неравномерности астрономической системы счисления времени. Труды 12-й Астрометрической конференции. Изд-во АН СССР, 1957.
21. Н. М. Стойко. Периодические и случайные вариации вращения Земли. *Астрономический журнал* № 5, 1959.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ПОЛЮСА ДЛЯ НУЖД СЛУЖБЫ ВРЕМЕНИ

1. Обзор истории вопроса

Первые указания на то, что полюсы Земли не сохраняют неизменного положения на ее поверхности, были получены еще в середине прошлого столетия. Однако для получения надежных данных о движении полюсов требовались систематические широтные наблюдения в нескольких пунктах, достаточно удаленных друг от друга по долготе, что могло быть обеспечено только объединенной работой астрономов нескольких стран. Результаты такого рода кооперированной работы — данные о движении полюса — были необходимы также для изучения механических свойств Земли, для повышения точности геодезических работ и астрономических определений времени, а также при определении склонений звезд.

В 1898 г. была создана Международная служба широты как единый вычислительный центр для определения координат полюса по данным наблюдений обсерваторий различных стран.

План деятельности МСШ в основном состоял в следующем. Несколько станций, расположенных на одной параллели, ведут наблюдения по общей программе и присылают свои результаты в Центральное бюро, где они подвергаются совместной обработке и используются для вычисления координат полюса. Принципиальные достоинства такого плана не вызывают сомнений, однако практическую деятельность МСШ нельзя назвать успешной.

В чем же состоят основные недостатки деятельности Международной службы широты?

Во-первых, координаты полюса публикуются в виде отдельных, не связанных между собою рядов. Во-вторых, даже в пределах каждого отдельного ряда, координаты полюса не всегда относятся к одному и тому же началу отсчетов. В-третьих, до последнего времени центральное бюро Международной службы широты не использовало для улучшения координат полюса наблюдений, выполненных обсерваториями, не входящими в число международных станций. Наконец, результаты вычислений Международной службы широты публикуются с очень большим запозданием, что делает невозможным использование этих результатов для нужд службы времени.

По мере того, как уточнялись наши представления о движении полюсов и колебаниях широт и повышались требования к точности данных об этих явлениях, становилась все более очевидной необходимость коренной реорганизации работы службы широты. Имея это в виду, 8-й съезд Международного астрономического союза (Рим, 1952 г.) одобрил следующую рекомендацию [1]:

«Рекомендуется созвать во время ассамблеи Международного геодезического и геофизического союза, которая состоится в 1954 г. в Риме, специальное совещание заинтересованных лиц с целью

рассмотрения вопросов, касающихся определения вариаций широты, в том числе предложений об изменении методов наблюдений и их обработки, а также тех мер, которые должны быть приняты, чтобы сделать предварительные результаты Центрального бюро более доступными для обсерваторий, занимающихся определением времени».

Здесь нужно подчеркнуть, что еще до того, как эта рекомендация была принята, советские астрономы не только отдавали себе ясный отчет в необходимости максимально ускорить сообщение данных о движении полюса заинтересованным организациям, но и сделали практические шаги в этом направлении. В 1949 г. в Полтавской обсерватории была составлена новая программа широтных наблюдений, рассчитанная на то, чтобы получать значения широты на следующий же день после наблюдений [2]. Летом того же года были начаты практические испытания новой программы [3]. При этом были внесены существенные изменения в ранее принятую методику обработки наблюдений, и установлен такой порядок, при котором значения широты вычислялись, как правило, не позже, чем через 12 часов, считая от среднего момента ночных наблюдений.

Оставалось решить вторую часть задачи: так же быстро вычислять по этим данным координаты полюса. Но здесь встретились серьезные трудности. Как уже было сказано, для уверенного определения координат полюса нужно располагать данными наблюдений на нескольких станциях, значительно удаленных по долготе. Тогда, составив для каждой станции уравнение

$$x \cos \lambda + y \sin \lambda = \Delta\varphi, \quad (1)$$

где: λ — долгота станции, $\Delta\varphi$ — разность между наблюдаемой и средней широтой, можно найти координаты полюса x и y по способу наименьших квадратов. Вычисление x и y можно было бы выполнять в кратчайший срок, если бы несколько станций, расположенных хотя бы в пределах 90° по долготе, быстро обрабатывали свои наблюдения и без задержки высылали их для совместной обработки в единый вычислительный центр. Вслед за Полтавской обсерваторией Пулковская обсерватория, Китабская широтная станция и Астрономическая обсерватория им. Энгельгардта организовали ускоренную обработку своих наблюдений. Но эти обсерватории расположены настолько близко друг от друга по долготе, что вычисление координат полюса с помощью формулы (1) не могло дать достаточно надежных результатов. Зарубежные обсерватории в то время не могли обеспечить обработку и сообщение данных наблюдений в приемлемо короткие сроки.

Организация систематических широтных наблюдений в нескольких пунктах на востоке нашей страны дала бы возможность определять координаты полюса только по наблюдениям советских обсерваторий, что означало бы создание Советской службы широты, независимой от Международной.

Мысль о необходимости организации Советской службы широты была впервые высказана еще в 1919 г. А. М. Грачевым [4]. А. Я. Орлов в течение многих лет настойчиво добивался практического осуществления этого мероприятия. По его предложению В. К. Абольд начал систематические широтные наблюдения в Иркутске [5]. К сожалению, из-за малых размеров инструмента (зенит-телескоп Бамберга, отверстие объектива 90 мм) и его непригодности к работе в условиях сибирской зимы эти наблюдения не могли дать достаточно хороших результатов, а в 1937 г. они были вообще прекращены.

В 1939 г. в Полтаве была созвана первая Всесоюзная широтная конференция, которая приняла следующую резолюцию по вопросу об организации Советской службы широты.

«Приветствуя начало регулярных широтных наблюдений в Полтавской обсерватории, конференция считает, что ценность их весьма возрастет при организации на широте Полтавы второй широтной станции на Дальнем Востоке. При организации этой станции и возобновлении широтных наблюдений в Иркутске шесть советских широтных станций дадут возможность определять движение полюса независимо от Международной службы широты».

В 1940—1941 гг. А. Я. Орловым были проведены подготовительные мероприятия по организации широтной станции в Комсомольске-на-Амуре, но завершению этой работы помешала Отечественная война.

Забегая несколько вперед, отметим, что в настоящее время на востоке Сибири уже созданы и ведут систематические наблюдения две обсерватории, снабженные первоклассными зенит-телескопами: Иркутская и Благовещенская. Кроме того, тесный контакт с Советской службой широты поддерживают недавно построенные широтные станции в Тяньцзине и Улан-Баторе. Но в конце 40-х годов исходными данными для срочного вычисления координат полюса могли служить только материалы наблюдений четырех советских обсерваторий, скученных в пределах 37° по долготе, что, естественно, не могло обеспечить хороших результатов, если пользоваться обычным методом. Нужно было найти другой путь получения предварительных данных о движении полюса, необходимых для службы времени СССР.

А. Я. Орлов [6] предложил новый способ вычисления приближенных координат полюса по наблюдениям на одной станции.

Поскольку для применения способа А. Я. Орлова не обязательно иметь несколько наблюдательных станций, значительно удаленных друг от друга по долготе, задача определения координат полюса только по данным советских обсерваторий становилась практически осуществимой, а тем самым обеспечивалась возможность создания Советской службы широты, независимой от международной.

Так в первом приближении была решена задача обеспечения советских служб времени предварительными координатами полюса.

Координаты полюса, используемые службами времени СССР, вычисляются способом А. Я. Орлова, сущность которого изложена нами в разделе «Советская служба широты».

Имея в виду существенное ускорение получения данных о движении полюса Международной службой широты, советские астрономы предложили, чтобы для международных станций была принята также программа полтавского типа, которая практически давала возможность получать данные об изменениях широты в максимально сжатые сроки. Это предложение и сама программа для международной параллели были опубликованы сначала в материалах 8-го съезда МАС, а затем с подробными разъяснениями и обоснованием в отдельном сборнике [7].

Действующая программа Международной службы широты, принятая еще в 1935 г., к тому времени, о котором мы пишем, сделалась совсем неподходящей для наблюдений: из-за прецессии многие пары «разошлись» и условие компенсации положительных и отрицательных зенитных расстояний было для некоторых групп нарушено в такой степени, что относительно небольшие погрешности в принятой цене оборота винта окулярного микрометра могли приводить к грубо ошибочным значениям широты.

В середине 1953 г. Международная геодезическая ассоциация разослала членам комиссии 19 МАС (эта комиссия осуществляет общее научное руководство и координацию работ по изучению движения полюса) и отдельным заинтересованным ученым «Записку об изменении программы наблюдений МСШ в 1955 г.», составленную директором Центрального бюро МСШ Дж. Чеккини и председателем комиссии 19

П. Соленбергером. В ней предлагалось на обсуждение три варианта новой программы. Ознакомившись с этой запиской, советские астрономы, члены комиссии 19, пришли к единодушному заключению, что при составлении предлагаемых вариантов совершенно не была принята во внимание приведенная выше рекомендация 8-го съезда МАС об ускорении информации относительно движения полюса. Обращая на это внимание председателя комиссии 19, советские астрономы сообщили, что они не могут высказаться в пользу какого-либо из трех проектов новой программы, предложенных директором Центрального бюро МСШ, и настаивали на том, что решение вопроса о будущей программе МСШ не должно сводиться к выбору одного из них.

Несмотря на это, 1—4 февраля 1954 г. в Париже состоялось узкое совещание, на которое советские представители приглашены не были, посвященное именно обсуждению проектов новой программы, предложенных директором Центрального бюро МСШ. Одобрен был третий вариант, согласно которому в течение ночи должны наблюдаться три (а не две, как было со времени организации МСШ) двухчасовые группы.

В соответствии с рекомендацией 8-го съезда МАС в сентябре 1954 г., было созвано более представительное совещание в Риме, посвященное рассмотрению вопросов, касающихся определений вариаций широты. На этот раз, кроме проектов программы, предложенных Центральным бюро МСШ, обсуждалось также предложение советских астрономов. По существу этого предложения серьезных возражений выдвинуто не было, но большинству участников совещания оно казалось слишком радикальным. Поэтому было принято компромиссное решение: перейти с начала 1955 г. на наблюдения по программе, составленной в согласии с третьим проектом Центрального бюро МСШ, но после окончания обработки наблюдений, выполненных в течение Международного геофизического года, вновь рассмотреть взаимно связанные вопросы о замене инструментов и изменении программы МСШ в свете тех новых данных, которые будут получены во время МГГ.

Отсюда видно, что в отношении обеспечения службы времени срочными данными о движении полюса Римское совещание, по существу, никаких мер не наметило.

В наименьшей степени это затрагивало советскую службу времени, поскольку в СССР уже в 1953 г. было организовано срочное вычисление предварительных координат полюса. Зарубежные службы времени вообще были лишены возможности учитывать поправки за движение полюса в своей текущей работе. Астрономы Гриничской службы времени для приведения своих результатов к среднему полюсу стали пользоваться данными о колебаниях широты Вашингтона, которые приближенно представляют составляющую колебаний полюса в плоскости, перпендикулярной гриничскому меридиану. Астрономы Оттавской обсерватории решили определять приближенные координаты полюса только по своим собственным широтным наблюдениям, т. е. поставили перед собою ту же задачу, которую решил А. Я. Орлов. Однако способ ее решения, примененный Оттавской обсерваторией, был очень грубым и ни в какое сравнение с методом А. Я. Орлова его ставить нельзя [8].

Положение значительно осложнилось: некоторые службы времени вообще не вводили в результаты своих наблюдений поправок за движение полюса; другие вводили, но получали эти поправки разными методами и на основании различных исходных данных.

Руководитель Международного бюро времени Н. М. Стойко подчеркивал большие трудности, возникающие при сводной обработке результатов отдельных служб времени, и настоятельно указывал на

необходимость принять срочные меры, чтобы исправить сложившееся положение.

Вопрос о том, какие именно меры следует принять, обсуждался на 9-м съезде Международного астрономического Союза (Дублин, 1955 г.). В результате была достигнута договоренность об организации **срочной службы широты**. План ее деятельности и методы работы будут нами рассмотрены в разделе «Срочная служба широты».

2. Советская служба широты

Третья Всесоюзная широтная конференция (Полтава, 27—31 мая 1952 г.), учитывая важность своевременного получения и сообщения заинтересованным организациям данных о движении полюса, необходимых при сводной обработке результатов служб времени, приняла решение [9]: «...образовать временную комиссию для составления плана работ по обеспечению геодезических организаций и Государственной службы времени СССР нужными им данными о движении полюса. В этом плане должны быть предусмотрены сроки и порядок получения данных о колебаниях широт обсерваторий Советской службы широты, способы обработки этих данных для вывода координат полюса, сроки и порядок сообщения полученных результатов заинтересованным организациям».

Все подготовительные мероприятия были завершены к концу 1952 г. и 10-й Всесоюзной астрономической конференцией (Пулково, 8—11 декабря 1952 г.) был одобрен следующий план деятельности Советской службы широты [10].

1. Предварительные координаты полюса вычисляются на основании широтных наблюдений ГАО АН СССР, Полтавской обсерватории, Китабской широтной станции и АОЭ. Вычисления производятся способом А. Я. Орлова.
2. Вычисление координат полюса и их сообщение заинтересованным организациям выполняет Полтавская гравиметрическая обсерватория АН УССР. Остальные обсерватории сообщают по телеграфу в Полтаву результаты своих наблюдений, а именно: дату и значение широты для каждой новой нормальной точки.
3. Полтавская обсерватория согласовывает с заинтересованными организациями сроки и порядок сообщения им данных о движении полюса.
4. Началом регулярной работы по вычислению координат полюса на основании наблюдений обсерваторий СССР и сообщения результатов заинтересованным организациям установить май 1953 г.

После утверждения этого плана Астрономическим Советом АН СССР в мае 1953 г. Советская служба широты начала вычисление предварительных координат полюса для нужд службы времени.

Эти вычисления ведутся по методу А. Я. Орлова, который мы кратко излагаем.

Известно, что периодическая часть движения полюса Земли может быть представлена в виде суммы двух составляющих: *годовой* и *чандлеровской* (период около 1,2 года). А. Я. Орлов принимает, что годовое движение происходит по эллипсу, форма и положение которого относительно Земли не меняются. Из анализа многолетних данных он получил следующие уравнения этого движения:

$$\left. \begin{aligned} x_a &= 0''{,}088 \cos(36^\circ t + 112^\circ), \\ y_a &= -0''{,}075 \sin(36^\circ t + 112^\circ), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где t — время, выраженное в десятых долях года.

Чандлеровское или свободное движение имеет неправильный характер: его амплитуда C и начальная фаза c непрерывно и иногда довольно

быстро меняются. Но, как показал опыт, можно все же считать, что в течение небольших промежутков времени, не превосходящих, например, 1,2 года, чандлеровское движение является круговым и равномерным. Отметим это обстоятельство, А. Я. Орлов записывает уравнения свободного движения в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x_c &= C \cos(30^\circ t + c), \\ y_c &= -C \sin(30^\circ t + c), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

причем C и c — постоянные.

Теперь, пользуясь формулой (1), можно представить периодические изменения широты любой точки в такой форме

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_a + C \cos(30^\circ t + c + \lambda), \quad (4)$$

где

$$\Delta\varphi_a = x_a \cos \lambda + y_a \sin \lambda. \quad (5)$$

Значения $\Delta\varphi$ получаются из наблюдений, $\Delta\varphi_a$ — с помощью уравнения (5). Таким образом, уравнение (4) может служить для определения неизвестных C и c . Схема вычислений будет особенно простой, если взять 12 значений $\Delta\varphi$ через 0,1 года. Тогда по способу наименьших квадратов получаем

$$\left. \begin{aligned} 3C \cos(c + \lambda) &= \Delta_0 + 0,866(\Delta_1 + \Delta_5) + 0,500(\Delta_2 - \Delta_4), \\ -3C \sin(c + \lambda) &= \Delta_3 + 0,500(\Delta_1 + \Delta_5) + 0,866(\Delta_2 + \Delta_4), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\Delta_t = \frac{(\varphi - \Delta\varphi_a)_t - (\Delta\varphi - \Delta\varphi_a)_{t+6}}{2}. \quad (7)$$

Определив неизвестные C и c , мы с помощью формул (3) находим x_c и y_c , а затем и x , y .

Ниже мы приводим пример применения способа А. Я. Орлова; заметим, что, кроме годовой полярной волны $\Delta\varphi_a$, из наблюдений исключался также и годовой неполярный z -член, о котором мы подробнее скажем в дальнейшем. Исходные и вспомогательные данные, а также результаты чандлеровской волны в колебаниях широты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Определение свободных колебаний широты по наблюдениям на зенит-телескопе в Пулково

$$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$$

в $0'',01$

Дата	t	$\Delta\varphi$	$\Delta\varphi_a$	z	$\Delta\varphi_c$
1952,6	0	53	+4,4	-2,0	50,6
,7	1	73	+7,9	-2,9	68,0
,8	2	91	+8,4	-2,7	85,3
,9	3	86	+5,6	-1,5	81,9
1953,0	4	69	+0,7	+0,4	67,9
,1	5	55	-4,4	+2,0	57,4
,2	6	38	-7,9	+2,9	43,0
,3	7	20	-8,4	+2,7	25,7
,4	8	16	-5,6	+1,5	20,1
,5	9	20	-0,7	-0,4	21,1
,6	10	30	+4,4	-2,0	27,6
,7	11	45	+7,9	-2,9	40,0

Анализ значений $\Delta\varphi_c$, выполненный по схеме А. Я. Орлова, приводит к следующему выражению чандлеровской волны в колебаниях широты Пулково за время 1952,6—1953,7:

$$\Delta\varphi_c = 0'',317 \cos(30^\circ t + 282^\circ,9).$$

Поскольку долгота Пулково равна $-30^\circ,3$, мы можем переписать предыдущее выражение так:

$$\Delta\varphi_c = 0'',317 \cos(30^\circ t + 313^\circ,2 + \lambda) = 0'',317 \cos(30^\circ t + 313^\circ,2) \cos \lambda - 0'',317 \sin(30^\circ t + 313^\circ,2) \sin \lambda,$$

откуда непосредственно следует:

$$x_c = 0'',317 \cos(30^\circ t + 313^\circ,2); \quad y_c = -0'',317 \sin(30^\circ t + 313^\circ,2).$$

Дальнейший ход вычислений приведен в табл. 2.

Таблица 2

Определение координат полюса по данным широтных наблюдений в Пулково с 1952,6 по 1953,7 в $0'',01$

Дата	x_c	x_a	x	y_c	y_a	y
1952,6	+21,3	+7,5	+29	+22,6	+4,1	+27
,7	+29,8	+8,9	+39	+9,0	-0,4	+9
,8	+30,3	+6,9	+37	-7,1	-4,7	-12
,9	+22,6	+2,3	+25	-21,3	-7,2	-28
1953,0	+9,0	-3,2	+6	-29,8	-7,0	-37
,1	-7,1	-7,5	-15	-30,3	-4,1	-34
,2	-21,3	-8,9	-30	-22,6	+0,4	-22
,3	-29,8	-6,9	-37	-9,0	+4,7	-4
,4	-30,3	-2,3	-33	+7,1	+7,2	+14
,5	-22,6	+3,2	-19	+21,3	+7,0	+28
,6	-9,0	+7,5	-2	+29,8	+4,1	+34
,7	+7,1	+8,9	+16	+30,3	-0,4	+30

Практически работа организована следующим образом. Обсерватории, участвующие в Советской службе широты, сообщают в Полтавскую обсерваторию по телеграфу нормальные значения широты (по мере их получения). Здесь эти данные, а также данные наблюдений в самой Полтаве, наносятся на графики и со сглаженных кривых снимаются значения широты на каждую десятую долю года. Затем по описанной выше схеме вычисляются координаты полюса по данным каждой обсерватории в отдельности и, наконец, берутся средние из отдельных результатов. Этот заключительный этап вычислений иллюстрируется табл. 3, которая также дает возможность судить, в какой мере сходятся между собою значения координат полюса, полученные по данным отдельных обсерваторий.

Для получения этих значений были использованы следующие материалы.

Пулково, ГАО АН СССР

Наблюдения на зенит-телескопе Фрейберга по международной программе (Pu).

Полтава, Гравиметрическая обсерватория АН УССР

1. Наблюдения на зенит-телескопе Цейсса по программе, состоящей из четырех двухчасовых групп (PoZ).

2. Наблюдения на зенит-телескопе Бамберга по той же программе (PoB).

3. Наблюдения двух ярких зенитных звезд на зенит-телескопе Цейсса (Зен. зв.).

Казань, Астрономическая обсерватория им. Энгельгардта

Наблюдения на зенит-телескопе Бамберга по программе, состоящей из четырех двухчасовых групп (E).

Китоб. Широтная станция им. Улуг-Бека

Наблюдения на зенит-телескопе Бамберга по международной программе (K).

Таблица 3

Сравнение координат полюса, полученных по одновременным наблюдениям четырех обсерваторий, участвующих в Советской службе широты в 0",01

Дата	Pu	Po Z	Po B	Зен. зв.	Po среднее	E	K	Общее среднее
<i>Координата x</i>								
1952,6	+29	+29	+31	+32	+31	+28	+27	+29
,7	+39	+38	+39	+40	+39	+35	+35	+37
,8	+37	+35	+36	+36	+36	+33	+33	+35
,9	+25	+22	+23	+22	+22	+20	+21	+22
1953,0	+6	+3	+3	+1	+2	+2	+3	+3
,1	-15	-16	-17	-19	-17	-16	-15	-16
,2	-30	-31	-32	-33	-32	-29	-29	-30
,3	-37	-36	-37	-38	-37	-33	-33	-35
,4	-33	-30	-32	-31	-31	-28	-28	-30
,5	-19	-16	-17	-16	-16	-15	-16	-17
,6	-2	+1	+1	+3	+2	+2	+1	+1
,7	+16	+18	+19	+20	+19	+17	+17	+17
<i>Координата y</i>								
1952,6	+29	+24	+25	+24	+24	+22	+23	+24
,7	+9	+6	+6	+4	+5	+5	+6	+6
,8	-12	-14	-15	-16	-15	-13	-12	-13
,9	-28	-29	-30	-32	-30	-27	-27	-28
1953,0	-37	-36	-38	-38	-37	-34	-34	-36
,1	-34	-32	-34	-33	-33	-30	-30	-32
,2	-22	-19	-20	-19	-19	-18	-18	-19
,3	-4	-2	-2	0	-1	-1	-2	-2
,4	+14	+16	+17	+19	+17	+16	+15	+16
,5	+28	+29	+30	+31	+30	+27	+27	+28
,6	+34	+33	+35	+35	+34	+31	+31	+32
,7	+30	+28	+29	+29	+29	+25	+26	+28

Остановимся несколько подробнее на вопросе об исключении годовых неполярных изменений широты при вычислении координат полюса по методу А. Я. Орлова. Обычно при выводе кривой колебаний широты из наблюдений по способу Талькотта приходится определять по данным этих же наблюдений поправки к предварительным склонениям центров звездных пар. Чаще всего для этого применяется так называемый цепной способ, которым пользовалось и Центральное бюро МСШ в начале своей деятельности (до 1912 г.). При этом в ко-

лебаниях широт международных станций обнаруживалась годовая волна, не зависящая от движения полюса. Чтобы учесть это обстоятельство, Кимура предложил ввести в (1) третий член z .

$$\Delta\varphi = x \cos \lambda + y \sin \lambda + z. \quad (8)$$

Кимура считал, что z -член одинаков для всех станций. Доказательства этому он дать не мог; ему просто пришлось сделать такое допущение, так как в противном случае задачу определения координат полюса вообще нельзя было бы решить. Однако позже Центральное бюро МСШ нашло объяснение этому допущению в том, что главной причиной появления z -члена являются систематические ошибки склонений, полученных цепным способом. Если это так, то вообще отпадает необходимость в предварительном исправлении склонений. Поправки склонений центров групп можно определять попутно с координатами полюса при решении уравнения (8). Так теперь и поступает Центральное бюро МСШ.

Если бы этот метод применялся Центральным бюро Международной службы широты с самого начала ее деятельности, то, естественно, никаких указаний на существование годового z -члена в колебаниях широт из наблюдений международных станций получить было бы нельзя. Но то обстоятельство, что вначале при обработке этих наблюдений применялся цепной метод, сыграло в известном смысле положительную роль: выявление неполярной составляющей в изменениях широт международных станций явилось стимулом для многочисленных исследований характера и природы этой составляющей с использованием также и наблюдений отдельных обсерваторий, не входящих в МСШ. Для определения z -члена пришлось применять метод, существенно отличающийся от описанного выше. Он состоит в следующем.

Уравнение (8) можно переписать так:

$$z = \Delta\varphi - (x \cos \lambda + y \sin \lambda). \quad (8')$$

Выражение, заключенное в скобки, представляет собою полярные колебания широты пункта с долготой λ , вычисленные по координатам полюса x , y ; $\Delta\varphi$ получается из наблюдений. Из формулы (8') легко вычислить z -член при том условии, что координаты полюса заранее известны. При этом, разумеется, нельзя ожидать, что для разных обсерваторий он будет иметь одно и то же значение, хотя бы уже потому, что систематические ошибки склонений будут разными, так как программы составлены из различных звезд и выравнивание склонений делается по наблюдениям каждой обсерватории в отдельности.

Понятно, что при вычислении координат полюса по методу А. Я. Орлова желательно по возможности освобождать наблюдённые изменения широты от неполярной составляющей. Поскольку для выделения этой составляющей нужно уже иметь данные о движении полюса, задачу приходится решать следующим образом.

По данным нескольких годичных циклов наблюдений и координатам полюса находятся разности между наблюдёнными и вычисленными значениями широты рассматриваемой обсерватории: $\varphi_n - \varphi_n$.

Затем берутся средние значения этих разностей для каждой десятой доли года. Принимается, что эти средние представляют собою наиболее вероятные значения z -члена и для последующих лет. Можно выделить в разностях $\varphi_n - \varphi_n$ правильную годовую волну, т. е. представить z -член в такой форме:

$$z = K \cos(36^\circ t + k), \quad (9)$$

где t — время, выраженное в десятых долях года.

Делается допущение, что полученным таким путем выражением z -члена можно пользоваться для исправления текущих наблюдений.

Законно ли такое допущение? Ответ на этот вопрос в значительной мере зависит от решения вопроса о том, какова природа неполяр-

ной волны в результатах широтных наблюдений. Если, как это считает Центральное бюро МСШ, неполярная волна появляется в основном из-за систематических ошибок склонений, полученных цепным методом, то z -член должен более или менее устойчиво сохранять как свою амплитуду, так и начальную фазу. В противном случае картина может быть иной.

Вопросу о природе z -члена посвящена довольно обширная литература; ее обзор дан А. Е. Филипповым [11], который после критического рассмотрения взглядов различных авторов приходит к следующему заключению:

«Годовые неполярные волны (или z -член) в колебаниях широты — есть результат влияния на наблюдения целой совокупности самых разнообразных факторов, происхождение которых в конечном счете связано с годовым движением Земли вокруг Солнца и суточным вращением ее вокруг мгновенной оси.

Что же касается основных, главных причин этих волн, и, в частности, главных причин общей для всех международных станций годовой неполярной составляющей колебания широты, то этот вопрос остается в настоящее время еще нерешенным».

Следовательно, и вопрос об устойчивости неполярных колебаний широты нельзя решать на основании выводов о природе этого явления. Остается чисто эмпирический путь: исследовать поведение z -члена, не входя в рассмотрение причин его возникновения, т. е. проверить непосредственно по материалам достаточно продолжительных рядов наблюдений, насколько значительно меняются со временем амплитуды и начальные фазы этого члена (9). К сожалению, вопрос этот достаточно подробно еще не изучался. В упомянутой работе А. Е. Филиппова [11] приведены только некоторые данные, не позволяющие пока сделать определенных выводов.

Любопытную картину дают, в частности, наблюдения по так называемой расширенной программе в Пулково с 1929 по 1941 г. В среднем за все это время годовое колебание получается довольно слабым и может быть представлено так:

$$z = 0''{,}019 \cos(36^\circ t - 235^\circ).$$

В работе А. Е. Филиппова [11, табл. 8] даны остаточные уклонения, полученные путем исключения этого колебания из исходных значений z -члена. А. Е. Филиппов отмечает, что в отдельные годы они достигают значительной величины (до $0''{,}07$) и имеют отчетливо выраженный систематический характер.

Чтобы более полно характеризовать эти отклонения, мы построили их корреляционную функцию $B(\tau)$. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4
Корреляционная функция значений $z - z_{\text{средн}}$, полученных по данным широтных наблюдений в Пулково

τ в десятых долях года	B_τ	τ в десятых долях года	B_τ	τ в десятых долях года	B_τ
0	+14,0	7	- 0,1	14	- 0,5
1	+ 8,6	8	+ 1,6	15	- 1,0
2	+ 5,3	9	+ 3,0	16	- 1,5
3	+ 3,4	10	+ 3,3	17	- 1,8
4	+ 1,3	11	+ 2,3	18	- 1,7
5	- 0,4	12	+ 0,9	19	- 0,6
6	- 0,9	13	0,0		

Из данных табл. 4 можно сделать вывод, который на первый взгляд кажется несколько парадоксальным: после исключения правильной го-

довой волны неполярные изменения широты Пулковского представляют собой сумму периодических колебаний, а наибольшую амплитуду все еще имеет колебание с годовым периодом. Спектральный анализ корреляционной функции подтверждает этот вывод. По-видимому, преобладающим колебанием является годовое, но амплитуда и, главное, начальная фаза колебания значительно меняются, так что при осреднении за несколько лет оно почти исчезает. В подобных случаях исключение волны вида (9) лишь в незначительной степени освобождает результаты наблюдений от неполярной составляющей. Более того, если для определения z -члена взят недостаточно продолжительный ряд предшествующих наблюдений, применение полученного результата при обработке текущих наблюдений может в отдельных случаях даже ухудшить эти данные в том смысле, что вместо исключения неполярной составляющей в них будет внесена фиктивная годовая волна.

Нельзя считать, что формула (8) позволяет выделить неполярные колебания широты, так сказать, в чистом виде. Дело в том, что сами координаты полюса, которыми мы пользуемся для подстановки в эту формулу, неизбежно содержат некоторые ошибки. Эти ошибки повлияют и на значения z -члена. Весь процесс вычислений координат полюса по методу А. Я. Орлова будет тогда неизбежно сопровождаться переносом погрешностей x и y с предшествующих на последующие годы.

Все эти обстоятельства внушают некоторые сомнения в том, следует ли вообще исключать z -член при вычислении координат полюса по методу А. Я. Орлова.

Обычно z -член подвержен значительным изменениям, когда его амплитуда относительно мала. Наоборот, при большой амплитуде неполярных колебаний z -член, в большинстве случаев, бывает устойчив.

Поскольку в начале деятельности Советской службы широты невозможно было сделать никаких предположений относительно характера неполярных колебаний широт станций, было решено исключать эти колебания, пользуясь значениями z -члена, полученными для каждой обсерватории по материалам нескольких предшествующих лет.

Значения z -члена до 1957 г. включительно определялись по координатам полюса, полученным А. Я. Орловым только по данным международных станций [12].

Постепенно накапливавшиеся материалы давали возможность уточнять значения z -члена, и с 1958 г. эти значения стали вычисляться по более надежным координатам полюса, опубликованным Н. И. Панченко [13] и Ло Дин-Цзяном, Н. И. Панченко и А. П. Цаповой [14]. Значения z -члена приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения z -членов, принятых при вычислении координат полюса по методу А. Я. Орлова в $0^{\circ},0,1$

Доля года	Пулково		Полтава Цейсс		Полтава Бамберг		Полтава Зен. зв.	Казань	Китаб	
	z_1	z_2	z_1	z_2	z_1	z_2	z_1	z_1	z_1	z_2
0	+0,4	+0,9	+5,2	+3,0	+4,4	+4,6	+0,4	+5,3	+5,9	+3,4
1	+2,0	+1,0	+6,0	+1,6	+6,5	+3,8	+2,4	+5,1	+4,8	+1,4
2	+2,9	+0,8	+4,4	-0,3	+6,0	+1,6	+3,4	+3,0	+1,9	-1,2
3	+2,7	+0,2	+1,1	-2,1	+3,3	-1,2	+3,2	-0,3	-1,7	-3,4
4	+1,5	-0,4	-2,5	-3,2	-0,7	-3,6	+1,7	-4,3	-4,7	-4,2
5	-0,4	-0,9	-5,2	-3,0	-4,4	-4,6	-0,4	-5,3	-5,9	-3,4
6	-2,0	-1,0	-6,0	-1,6	-6,5	-3,8	-2,4	-5,1	-4,8	-1,4
7	-2,9	-0,8	-4,4	+0,3	-6,0	-1,6	-3,4	-3,0	-1,9	+1,2
8	-2,7	-0,2	-1,1	+2,1	-3,3	+1,2	-3,2	+0,3	+1,7	+3,4
9	-1,5	+0,4	+2,5	+3,2	+0,7	+3,6	-1,7	+4,3	+4,7	+4,2

z_1 —с 1953 по 1957 г.; z_2 —с 1958 г.

С 1958 г. вычисление координат полюса по наблюдениям ярких зенитных звезд в Полтаве производится без предварительного исключения z -члена, так как z -член в этих наблюдениях очень мал, а его амплитуда и начальная фаза заметно меняются от года к году.

Определение нового z -члена для Казани выполнить не удалось, так как, начиная с середины 1956 г., нормальные значения широты АОЭ получались настолько нерегулярно и в них намечался такой значительный разброс, что построение сглаженной кривой колебаний широты сделалось невозможным.

3. Срочная служба широты (SIR)

В первом разделе мы изложили те обстоятельства, которые побудили 9-й съезд Международного астрономического союза принять рекомендацию об организации Срочной службы широты.

На съезде был принят следующий план ее деятельности [15].

1. Результаты наблюдений на фотографических зенитных трубах, астролябиях и других инструментах обсерваторий, желающих участвовать в этой службе, должны еженедельно посылаться директору Центрального бюро МСШ (Турин, Италия).

2. Результаты должны сообщаться за предшествующую неделю. Если наблюдений не было, об этом также посылается сообщение.

3. Директор Центрального бюро должен производить сводную обработку этих материалов с тем, чтобы получать сглаженные данные о движении полюса, и еженедельно высылать эти данные директору Международного бюро времени.

4. Ежемесячные исходные данные о колебаниях широт, упомянутые в п. 1, директор Центрального бюро должен рассылать всем участникам совместной работы, которые пожелают их иметь.

В соответствии с этим планом Центральное бюро МСШ приступило к ускоренному вычислению координат полюса с января 1956 г.

При практическом осуществлении первоначальный план подвергся существенным изменениям.

В связи с тем, что Центральное бюро МСШ иногда задерживало сообщение координат полюса Международному бюро времени, руководитель Международного бюро времени Н. М. Стойко был вынужден организовать их независимое вычисление непосредственно по результатам наблюдений обсерваторий, участвующих в Срочной службе широты.

Полученные данные стали публиковаться в циркулярах Международного бюро времени и рассылаться всем службам времени для приведения результатов астрономического определения времени к среднему полюсу.

В основу методики вычислений координат полюса, принятой Центральным бюро МСШ, положен следующий принцип.

Основой для определения значения средних широт φ_m , а также поправок склонений центров групп или значений z -члена (если наблюдения ведутся не по групповой системе) должна оставаться международная полодия, поскольку она свободна от влияния ошибок положений наблюдаемых звезд [16].

Пользуясь этим принципом, Чеккини в 1955 г. нашел по данным наблюдений нескольких предшествующих лет значения средних широт φ_m ; затем они уточнялись по мере получения дополнительных данных.

Для всех обсерваторий, кроме Карлофорте и Мидзусавы, φ_{m2} отличается от φ_{m1} , причем в отдельных случаях довольно значительно

(например, для Вашингтона разность составляет $+0''{,}091$). Постоянство средних широт Карлофорте и Мидзусавы не является следствием каких-либо особенностей инструментов, программы или условий наблюдений на этих станциях; оно объясняется тем методом или, точнее, теми исходными допущениями, на которых основан метод определения координат полюса, принятый Центральным бюро МСШ. Тем же можно объяснить зависимость разности $\varphi_{m2} - \varphi_{m1}$ от долготы обсерватории. К этим вопросам мы еще вернемся в дальнейшем.

При определении поправок склонений Центральное бюро МСШ стремилось к тому, чтобы наблюденная кривая колебаний широты наилучшим образом согласовывалась с координатами полюса, полученными по наблюдениям одних только международных станций. В тех случаях, когда достижение такой согласованности путем исправления склонений было затруднительно, вместо этого производилось определение и исключение z -члена. Не останавливаясь на подробностях, приведем здесь только общую оценку результатов анализа исходных материалов, которую дает в своем отчете Чеккини.

«Неполярные колебания широты почти незаметны в Карлофорте и Мидзусаве; заметны, но невелики в Полтаве и Пулково; довольно значительны и неправильны в Белграде; очень велики в Оттаве, Париже и Ричмонде» [16]. До 1957 г. Чеккини не использовал вашингтонские наблюдения ввиду их явных расхождений с данными о движении полюса; по той же причине с 1957 г. он исключил наблюдения в Белграде.

Исходя из основного положения методики Центрального бюро МСШ, что полодия МСШ должна быть «пробным камнем» для проверки правильности результатов Срочной службы широты, Чеккини сравнивает эти результаты с данными о движении полюса, полученными только по наблюдениям на международных станциях, и приходит к следующим выводам.

1. Сравнение показывает «удивительное и неожиданное согласие»: расхождения весьма малы и в основном находятся в пределах средних ошибок, с которыми вычисляются координаты полюса.

2. Можно предположить, что при увеличении числа наблюдений, уточнении средних широт обсерваторий, участвующих в Срочной службе широты, и более тщательном изучении систематических ошибок наблюдений, согласие между двумя полодиями будет улучшаться.

Оба эти вывода, по нашему мнению, вызывают серьезные возражения. Ничего неожиданного в хорошем согласии двух полодий нет. Наоборот, было бы странно, если бы результаты оказались иными, поскольку метод, применяемый Чеккини, состоит в «подгонке» наблюдений на изолированных станциях к данным МСШ. Если брать короткие промежутки времени, то путем такой подгонки можно добиться почти полного совпадения обеих полодий. Такое совпадение вовсе не подтверждает правильности результатов Срочной службы широты, а свидетельствует только о том, что примененный метод использования наблюдений на изолированных станциях не может привести к сколь угодно существенному уточнению данных МСШ.

Далее, Чеккини имеет в виду по мере получения новых данных только уточнять значения средних широт, а не изучать их изменения. Но если средние широты меняются (а это, несомненно, так), то результат получится как раз обратным тому, какой ожидает получить Чеккини: значения средних широт, найденные по продолжительным рядам наблюдений, будут более заметно уклоняться от истинных значений для последовательных эпох, чем значения, полученные по коротким рядам.

Так например, по данным наблюдений до 1956 г. и до 1958 г. Чеккини получает соответственно следующие значения средней широты Вашингтона: $38^{\circ} 55' 16''{,}983$ и $38^{\circ} 55' 17''{,}074$. Из сопоставления этих чи-

сел, по нашему мнению, с несомненностью вытекает, что средняя широта Вашингтона заметно увеличилась и это увеличение необходимо учитывать при определении координат полюса. Но Чеккини считает, что второе число просто точнее первого и, вычисляя координаты полюса, всегда принимает в качестве средних широт некоторые постоянные числа. Результатом этого, как показали уже первые годы деятельности Срочной службы широты, явилось постепенное расхождение полюдов Срочной и Международной служб широты.

В своих отчетах [16, 17] Чеккини сопоставляет координаты полюса, полученные Срочной службой широты (SIR) и МСШ (SIL). Если для периода 1955,0—1957,1 в расхождениях этих координат замечается только периодическая составляющая, то для периода 1957,2—1958,1 все разности Δy (взяты в смысле SIL—SIR) получаются положительными и в среднем дают $+0''{,}024$. Следует ожидать, что при сохранении методики, принятой Центральным бюро МСШ для получения срочных данных о движении полюса, эти систематические расхождения будут все более и более возрастать.

Как мы уже упоминали, координаты полюса, вычисляемые Центральным бюро МСШ, часто публикуются с большим опозданием и практически не могут быть использованы службами времени.

Советские службы времени для приведения результатов своих наблюдений к среднему полюсу получают данные от Полтавской обсерватории, зарубежные — от Международного бюро времени.

На том, как ведутся вычисления координат полюса Полтавской обсерватории, мы остановились выше. Подробное изложение методики, принятой Международным бюро времени, дано в статье А. Стойко и Н. Стойко [18]. Поэтому мы только вкратце коснемся этого вопроса.

А. Стойко и Н. Стойко также пользуются координатами полюса МСШ для исправления наблюдений на изолированных станциях, но в отличие от Чеккини, который пытался всегда, когда это оказывалось возможным, исправлять принятые склонения, они во всех случаях определяют значения z -члена по формуле (8'). Если, как считает Чеккини, именно систематические ошибки склонений являются причиной появления z -члена, то имеет смысл определять общий для всех международных станций z -член, поскольку на всех этих станциях наблюдаются одни и те же звезды. Но программы наблюдений тех обсерваторий, которые не входят в МСШ, составлены из разных звезд, и поэтому нет оснований ожидать, что влияние ошибок склонений на результаты широтных наблюдений будет для всех этих станций одинаково. Тем не менее А. Стойко и Н. Стойко вычисляют по обычной формуле общий z -член для всех обсерваторий, участвующих в Срочной службе широты. Они продельвают это вычисление дважды: сначала — пользуясь непосредственно данными наблюдений, а затем — пользуясь разностями между наблюдаемыми широтами и широтами, вычисленными по координатам полюса МСШ. Вполне понятно, что результаты получаются тождественными.

Вычисление средних широт выполнялось также двумя различными способами: способом Центрального бюро МСШ и по формуле А. Я. Орлова. В первом случае по данным наблюдений за время 1954,0—1957,0 для каждой обсерватории было получено одно значение широты. Вычисления велись по формуле

$$\varphi_m = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (\varphi_i - x_i \cos \lambda - y_i \sin \lambda),$$

где: φ_i — наблюдаемая широта,

x_i и y_i — координаты полюса для даты 1954,0 + i , причем i выражается в десятых долях года, а $n=31$.

Применение формулы А. Я. Орлова позволило А. Стойко и Н. Стойко установить, что на протяжении трех рассматриваемых лет средние широты всех станций, участвующих в Срочной службе широты, несколько менялись. Особенно значительные изменения были обнаружены у Белграда (+0",066) и Вашингтона (+0",137).

Комбинируя различные методы определения z -члена и средних широт, Стойко получают в общей сложности девять различных систем координат полюса. Авторы приходят к выводу, что наилучшие результаты получаются, если из данных наблюдений предварительно исключить z -член, вычисленный по формуле (8'), и изменения средней широты, вычисленные по формуле А. Я. Орлова.

В общем, как это видно из работы А. Стойко и Н. Стойко [18], при выработке методики определения координат полюса Международное бюро времени с большой тщательностью испытало на практике ряд вычислительных схем. Вместе с тем приходится отметить, что оно не всегда достаточно критически относилось к данным наблюдений, которые использовались при вычислениях. По-видимому, в тех случаях, когда наблюдения на той или иной обсерватории явно не согласуются со всей совокупностью остальных данных, эти наблюдения можно и нужно было исключать. Так, Чеккини был прав, исключив наблюдения в Белграде, поскольку оказалось невозможным подобрать такие поправки склонений, с помощью которых удалось бы привести кривую колебаний широты Белграда к удовлетворительному согласию с данными о движении полюса МСШ. Попытка исправить эти наблюдения иным методом, предпринятая И. И. Глаголевой в Полтавской обсерватории, также не дала положительных результатов. Поэтому мы полагаем, что использование белградских наблюдений Международным бюро времени не улучшало, а скорее ухудшало вычисленные им координаты полюса.

Мы не останавливаемся здесь на том, по каким именно наблюдениям Международное бюро времени вычисляло координаты полюса до 1957,0, поскольку подробные сведения об этом можно найти в статье А. Стойко и Н. Стойко [18]. В настоящее время используются наблюдения на следующих инструментах: *зенит-телескопы*—в Белграде, Карлофорте, Китабе, Мидзусава, Полтаве, Пулково; *фотографические зенитные трубы*—в Вашингтоне, Гриниче, Оттаве, Ричмонде, Токио; *призмные астролябии Данжона*—в Алжире, Париже.

4. О приведении координат полюса к общей системе

Координаты полюса нужны службам времени для приведения результатов астрономического определения времени к среднему полюсу. Аналогично тому, что имеет место при редукции положений звезд, здесь также следует различать две задачи: приведение к среднему полюсу эпохи наблюдений и приведение к среднему полюсу некоторой начальной эпохи. Первой задаче, т. е. приведению к среднему полюсу эпохи наблюдений, А. Я. Орлов посвятил ряд работ, в которых дал ее законченное решение.

Сущность метода А. Я. Орлова заключается в следующем:

1. Для каждой обсерватории и для каждого момента определяется значение средней широты. Это определение делается с помощью простой формулы, которая позволяет исключить все известные периодические составляющие изменений широты.

2. Координаты полюса вычисляются по отклонениям мгновенных широт от средних, взятых для тех же моментов.

3. Полученные таким путем значения x и y будут представлять только периодическую часть движения полюса, а, стало быть, пользуясь этими значениями, мы можем приводить широты и долготы любой точки на поверхности Земли к среднему полюсу эпохи наблюдений.

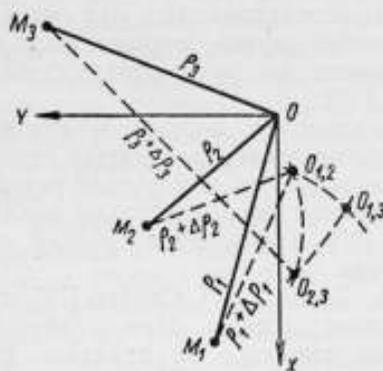


Рис. 1. Графическая схема решения задачи о перемещении среднего полюса

Первая часть задачи будет, таким образом, решена.

Вторая часть представляет значительно большие трудности, и какой-либо окончательной схемы ее решения мы пока не имеем. Чтобы привести широты и долготы к среднему полюсу некоторой начальной эпохи, нужно, очевидно, знать, как изменилось положение полюса между этой начальной эпохой и эпохой наблюдений. Напомним, что отдельные циклы наблюдений на международных станциях обрабатывались Центральным бюро МСШ независимо и что при обработке каждого цикла для каждой станции принимались некоторые постоянные значения средних широт. Это предположение о неизменности средних широт на протяжении нескольких лет приводит к полной неопределенности в вопросе о положении среднего полюса.

Поясним это с помощью геометрической схемы, приведенной на рис. 1.

Пусть мы имеем на плоскости точки M_1, M_2, M_3 . Поместим в точку O начало прямоугольной системы координат и определим положение остальных точек с помощью их полярных координат λ_i и r_i .

Допустим, что повторные измерения расстояний точек M_1, M_2, M_3 от O дали вместо прежних некоторые новые величины $r_1 + \Delta r_1, r_2 + \Delta r_2, r_3 + \Delta r_3$.

Это может произойти из-за того, что:

- 1) переместилась точка O , а все остальные остались неподвижными;
- 2) точка O не изменила своего положения, а точки M_1, M_2, M_3 (или некоторые из них) либо приблизились к точке O , либо от нее удалились;
- 3) переместились как точка O , так и точки M_1, M_2, M_3 . Приращения $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3$ нам известны. Но установить с полной достоверностью, с каким именно случаем мы имеем дело, не удастся. Единственное, что мы можем сделать, это выяснить, совместима ли первая гипотеза с имеющимися значениями Δr_i . Действительно, эта гипотеза допустима только в том случае, если все окружности радиусов $r_1 + \Delta r_1, r_2 + \Delta r_2, r_3 + \Delta r_3$ с центрами в точках M_1, M_2, M_3 соответственно пересекутся в одной точке. Эту точку мы можем принять за новое начало координат O' .

В противном случае будет невозможно с помощью переноса начала координат добиться того, что все Δr_i получат заданные приращения: окружности с центрами в M_1 и M_2 пересекутся в одной точке, окружности с центрами в M_2 и M_3 — в другой и т. д. Это будет служить очевидным доказательством ошибочности предположения о неподвижности точек M_1, M_2, M_3 .

В задаче об определении перемещения среднего полюса мы имеем полную аналогию приведенного геометрического построения: точка O соответствует полюсу начальной эпохи, точка O' — среднему полюсу эпохи наблюдений. При обработке отдельных циклов наблюдений Центральное бюро МСШ не учитывало возможности существования местных неполярных изменений средних широт, т. е. допускало без предварительной проверки правильность первой из трех рассмотренных выше гипотез. Следствием этого ошибочного допущения было то, что определить положения среднего полюса оказалось вообще невозможным: беря попарно любые две международные станции, мы каждый раз будем получать различные точки.

Этот вывод наглядно подтверждается результатами определения перемещения среднего полюса, опубликованными Чеккини [17]. Так например, Чеккини находит координаты среднего полюса для 1958 г. относительно центра полудня 1923—1930 гг. сначала по наблюдениям на станциях Карлофорте, Гейтерсберг и Юкайя, а затем — на станциях Мидзусава, Китаб и Карлофорте. Первая комбинация дает для смещения по оси $OY + 0''.103$, вторая — $0''.012$.

Эти исследования привели Чеккини к следующим выводам.

«Следствием смещения центров инструментов (или изменения направлений отвесов) за время, в течение которого для станций сохранялась одна и та же система средних широт, будет не только фиктивное смещение барицентра полодии, но также и разногласия между координатами полюса, выведенными по различным комбинациям станций».

Далее Чеккини пишет: «...мы приходим к выводу, что вековое движение полюса не может быть определено с точностью, необходимой для того, чтобы уловить последовательные положения среднего полюса или, что то же самое, что невозможно связать между собою различные полодии с 1900 г.».

Однако ранее Чеккини придерживался противоположного взгляда. В 1950 г. он опубликовал в *Bulletin Géodésique* статью о движении полюса [19], к которой редактор этого журнала предпослал следующее предисловие.

«Редактор *Bulletin Géodésique* обращает внимание читателей на исключительную важность статьи проф. Чеккини о вариациях широт и движении полюса Земли, опубликованную ниже. Автор после тщательного изучения масштабов микрометрических измерений вновь пересматривает все наблюдения, выполненные с 1900 г., и приходит к выводу о том, что широта станции Мидзусава уменьшилась на $0''{,}120$ в промежутке между 1911 и 1925 гг., а широта Китаба увеличилась на $0''{,}070$ за время от 1934 до 1949 г. Можно считать, что остальные станции сохраняют свои средние широты неизменными.

Весьма тщательные исследования побудили автора сделать попытку объединить различные системы, к которым за последние 50 лет были отнесены отдельные участки траектории полюса. Общий вывод сводится к доказательству почти абсолютной неподвижности среднего полюса для периода 1900—1935 гг. и его тенденции к смещению в западном направлении в последующие годы».

Указанные выводы Чеккини и явились основой для приведения всех данных о движении полюса к некоторой общей системе, названной Чеккини системой «барицентра полодии 1900—1905 гг.». Иначе говоря, Чеккини в то время считал, что ему удалось привести координаты полюса к среднему полюсу начальной эпохи. Однако это мнение разделяли далеко не все астрономы, а если судить по приведенной выдержке из отчета Чеккини [17], он сам от этого мнения отказался. Тем не менее, в этом же отчете таблица VI, в которой приводятся координаты полюса МСШ, озаглавлена так: «Мгновенные координаты полюса вращения в системе 1900—1905». Остается непонятным, каким образом, признав, что «невозможно связать между собою различные полодии», Чеккини считает, что координаты полюса даются в настоящее время в той же системе, как и в первые годы деятельности МСШ, т. е., что они редуцированы к среднему полюсу периода 1900—1905 гг.

При организации работ Срочной службы широты Центральное бюро МСШ и Международное бюро времени, по существу, одним и тем же способом решили задачу определения средних широт обсерваторий, участвующих в этой службе: средние широты определялись так, чтобы полодия Срочной службы широты наилучшим образом согласовывались с полодией МСШ. Тем самым был сделан выбор системы координат полюса Срочной службы широты: была принята та же «система барицентра полодии 1900—1905 гг.», что и при выводе координат полюса по наблюдениям только на международных станциях.

Средние широты обсерваторий, полученные в этой системе, не согласуются со средними широтами, найденными непосредственно из наблюдений с помощью формулы А. Я. Орлова (φ_{m4}). Редуцировать данные наблюдений к этой системе имело бы смысл, если бы у нас была уверенность в том, что современное положение среднего полюса по отношению к барицентру полудни 1900—1905 гг. найдено правильно. Но такой уверенности нет даже у Чеккини. Мы же полагаем, что с помощью примененного им способа решения задачи о движении среднего полюса вообще нельзя получить определенных данных об этом движении, как это видно из приведенной нами выше геометрической схемы решения (см. рис. 1). Напомним, что перед организацией Срочной службы широты поправки за движение полюса учитывались в работах только некоторых служб времени (в том числе всех советских). Теперь указанные поправки вводятся в результаты всех служб времени, но делается это по-разному. Применяя способ А. Я. Орлова, Советская служба широты определяет только периодическую часть движения полюса и, таким образом, результаты советских служб времени приводятся к среднему полюсу эпохи наблюдений.

Международное бюро времени до второй половины 1958 г. вычисляло координаты полюса в той же системе, что и Центральное бюро МСШ, а это значит, что оно приводило наблюдения всех служб времени к так называемому «барицентру полудни 1900—1905 гг.».

Понятно, что координаты полюса, вычисляемые Советской службой широты, с одной стороны, и Международной и Срочной службами широты, с другой, систематически между собой различаются. Как это видно из табл. 6, расхождения получаются особенно значительными для координаты y .

Таблица 6
Разности между координатами полюса, вычисленными Полтавской обсерваторией в системе среднего полюса эпохи наблюдений и Центральным бюро МСШ в системе «барицентра полудни 1900—1905 гг.»
в $0'',01$

Эпоха	Δx	Δy	Эпоха	Δx	Δy
1952,0	+2	+12	1953,6	+ 3	+10
,1	+1	+13	,7	+ 6	+15
,2	+2	+12	,8	+ 6	+14
,3	+3	+ 8	,9	0	+10
,4	+1	+ 8	1954,0	-11	+ 8
,5	+2	+ 9	,1	- 8	+ 3
,6	+3	+12	,2	- 3	+ 2
,7	+4	+14	,3	- 2	+ 2
,8	+5	+12	,4	- 6	+ 3
,9	0	+14	,5	+ 3	+ 8
1953,0	-4	+12	,6	+ 8	+11
,1	+2	+12	,7	+ 6	+14
,2	-2	+ 9	,8	+ 2	+13
,3	-1	+ 6	,9	- 1	+12
,4	-1	+ 6	1955,0	- 5	+12
,5	+2	+ 7			

Поскольку попытка Чеккини привести все данные о движении полюса МСШ к однородной системе оказалась несостоятельной, естественно возник вопрос: имеет ли какой-либо смысл редуцировать результаты определения времени к «барицентру полудни 1900—1905 гг.»? Н. М. Стойко предложил обсудить этот вопрос на заседании Комиссии 19

во время 10-го съезда Международного астрономического союза в августе 1958 г. В итоге обсуждения была принята рекомендация исключать изменения средних широт из результатов наблюдений всех станций до использования этих результатов для вычислений координат полюса.

Исключая изменения средних широт, можно получать данные только о периодической части движения полюса, т. е. именно те данные, которые необходимы для приведения результатов астрономического определения времени к среднему полюсу эпохи наблюдения.

Переход к этой системе (которой Советская служба широты пользуется с начала своей деятельности) был осуществлен Международным бюро времени постепенно в последние месяцы 1958 г. Центральное бюро МСШ продолжает вычислять координаты полюса в системе «барического полюса 1900—1905 гг.». На рис. 2 видно, как полюс Международного бюро времени отходит от полюса Центрального бюро МСШ и постепенно приближается, а потом почти сливается с полюсом Советской службы широты.

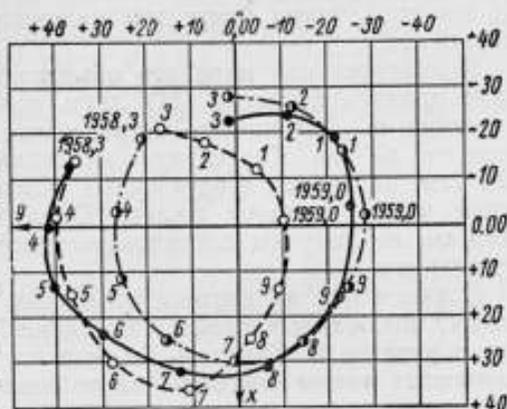


Рис. 2. Движение полюса по данным Международного бюро времени (сплошная линия), Советской службы широты (штрихпунктирная линия) и Международной службы широты (пунктирная линия).

5. Об оценке точности определения координат полюса

Астрономов, занимающихся определением времени, естественно интересует вопрос о том, какова точность данных о движении полюса, которыми они пользуются при обработке своих наблюдений. Однако при попытке ответить на этот вопрос мы встречаемся с значительными затруднениями.

Конечно легко дать формальную характеристику точности координат полюса, определив средние ошибки значений x и y , если эти значения получены путем решения системы условных уравнений вида

$$x \cos \lambda_i + y \sin \lambda_i = \Delta \varphi_i + v_i, \quad (10)$$

где v_i — остаточные уклонения.

Действительно, эти ошибки легко находятся по формулам

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{p(x)(n-r)}}; \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{p(y)(n-r)}}, \quad (11)$$

в которых n — число условных уравнений и r — число неизвестных, в нашем случае равное двум.

Веса неизвестных $p(x)$ и $p(y)$ зависят от расположения наблюдательных станций по долготе, поскольку

$$p(x) = [\cos^2 \lambda_i] - \frac{[\sin \lambda_i \cos \lambda_i]^2}{[\sin^2 \lambda_i]}; \quad p(y) = [\sin^2 \lambda_i] - \frac{[\sin \lambda_i \cos \lambda_i]^2}{[\cos^2 \lambda_i]}. \quad (12)$$

Однако такой способ годится только для того, чтобы выяснить, насколько хорошо полученные значения x и y удовлетворяют совокупности исходных данных о колебаниях широт n станций, наблюдениями которых мы воспользовались. При этом оказывается, что с увеличением n ошибки координат полюса уменьшаются незначительно или даже

возрастают, в то время как исходя из теории погрешностей очевидно, что эти координаты будут тем надежнее и точнее, чем больше число станций l .

В значительной мере это объясняется следующим: мы имели бы право принять формулу (11) лишь при том условии, что остаточные отклонения v_i — случайные независимые величины. Но в действительности это не так. Как следует из анализа неполярных колебаний широты (см. раздел 2), в остаточных отклонениях v_i содержится периодическая часть — годовой z -член. Однако и после исключения этой части мы не получим последовательности случайных некоррелированных величин.

Остановимся на вопросе об оценке точности предварительных координат полюса, вычисленных по схеме А. Я. Орлова, которую мы описали в разделе 2. Казалось бы, что расхождения в значениях x и y , полученных таким способом по наблюдениям отдельных станций, дадут возможность определить ошибки координат полюса. Посмотрим, так ли это в действительности. Для примера возьмем данные о движении полюса с 1952,6 по 1953,7, полученные Советской службой широты. Координаты полюса были вычислены независимо по наблюдениям каждой из четырех обсерваторий, участвующих в этой службе, затем были образованы их общие средние x_m , y_m и, наконец, взяты отклонения отдельных значений x и y от этих общих средних. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Разности между координатами полюса, полученными по наблюдениям отдельных станций и их общим средним
в $0''01$

Дата	$x-x_m$				$x'-x_m$	$y-y_m$				$y'-y_m$
	Пулково	Полтава	Казань	Китаб		Пулково	Полтава	Казань	Китаб	
1952,6	0	+2	-1	-2	-7	+5	0	-2	-1	+4
,7	+2	+2	-2	-2	+1	+3	-1	-1	0	+9
,8	+2	+1	-2	-2	+4	+1	-2	0	+1	+11
,9	+3	0	-2	-1	+8	0	-2	+1	+1	+12
1953,0	+3	-1	-1	0	+6	-1	-1	+2	+2	+5
,1	+1	-1	0	+1	+4	-2	-1	+2	+2	-3
,2	0	-2	+1	+1	0	-3	0	+1	+1	-11
,3	-2	-2	+2	-2	-2	-2	+1	+1	0	-10
,4	-3	-1	+2	+2	-3	-2	+1	0	-1	-6
,5	-2	+1	+2	+1	-3	0	+2	-1	-1	-2
,6	-3	+1	+1	0	-2	+2	+2	-1	-1	-1
,7	-1	+2	0	0	+3	+2	+1	-3	-2	+4

По данным этой таблицы мы получили

$$\sum (x-x_m)^2=132; \quad \sum (y-y_m)^2=133,$$

а отсюда следует, что средние ошибки x_m и y_m равны $\pm 0''017$.

Однако неправильно считать, что эта ошибка характеризует действительную точность определения координат полюса Советской службы широты, в чем можно легко убедиться путем сравнения этих координат с такими данными о движении полюса, которые основаны на более обширных данных наблюдений и получены более строгим способом. Наиболее достоверными координатами полюса для рассматриваемого периода нужно считать координаты, опубликованные Н. И. Паиченко [13]. Обозначим их через x' и y' . Разности $x'-x_m$ и $y'-y_m$ даны в

табл. 7. Сразу видно, что среднее квадратическое этих разностей будет значительно превосходить ту величину, которую можно было бы ожидать на основании приведенной выше оценки точности координат x_m , y_m . Кроме того, можно заметить, что разности $x' - x_m$ и $y' - y_m$ не представляют собой независимых случайных величин. Чтобы вполне в этом убедиться, мы продолжили табл. 7 до даты 1957,4. Анализ, полученных таким путем, более обширных данных показал, что средние ошибки разностей $x' - x_m$, $y' - y_m$ равны соответственно

$$\varepsilon_x = \pm 0''{,}034; \quad \varepsilon_y = \pm 0''{,}039,$$

а их корреляционные функции $B_x(\tau)$ и $B_y(\tau)$ явно указывают на присутствие в этих разностях колебания с годовым периодом (табл. 8).

Таблица 8

Корреляционные функции разностей координат полюса
 $x' - x_m$ и $y' - y_m$

τ	$B_x(\tau)$	$B_y(\tau)$	τ	$B_x(\tau)$	$B_y(\tau)$
0,0	+11,2	+15,3	1,1	+3,1	+ 8,5
,1	+ 8,2	+10,9	,2	-0,9	+ 5,6
,2	+ 2,4	+ 3,5	,3	-3,2	+ 0,3
,3	- 3,5	- 2,9	,4	-3,3	- 5,3
,4	- 6,8	- 7,0	,5	-2,9	-10,5
,5	- 7,8	- 8,8	,6	-1,5	-10,6
,6	- 6,2	- 7,5	,7	+0,6	- 7,2
,7	- 2,2	- 3,4	,8	+2,8	- 2,2
,8	+ 2,9	+ 3,8	,9	+3,0	+ 1,4
,9	+ 6,6	+ 7,0	2,0	+1,3	+ 5,7
1,0	+ 6,4	+ 8,9	2,1	-0,8	+ 8,5

Из приведенных соображений видно, что для повышения точности координат полюса необходимо прежде всего тщательное изучение систематических ошибок координат полюса и их исключение.

6. Экстраполяция координат полюса

Даже при наиболее оперативной организации работ по определению координат полюса невозможно полностью устранить некоторое запаздывание в получении предварительных результатов прежде всего потому, что при построении кривых колебаний широты приходится получать нормальные точки путем осреднения данных наблюдений не менее, чем за 10 дней. Этот интервал иногда значительно удлиняется из-за неблагоприятных метеорологических условий, а так как при выводе координат полюса приходится ожидать поступления исходных данных по возможности от всех сотрудничающих обсерваторий, заканчивать вычисление координат полюса удается в лучшем случае через 10—15 дней после той даты, на которую они даются.

Такое положение не вполне устраивает службы времени, поскольку координаты полюса необходимы им в текущей работе по определению и экстраполяции поправок часов. Так возникает необходимость прибегать к экстраполяции данных о движении полюса с тем, чтобы своевременно удовлетворять запросы служб времени.

Нужно заметить, что первые опыты экстраполяции координат полюса не были связаны с этой практической задачей. Они заключались в попытках представить посредством аналитических выражений дан-

ные о движении полюса за несколько предшествующих лет или даже десятилетий с тем, чтобы, пользуясь этими выражениями, предвычислять движение полюса на последующие годы. Так поступал, например, Кимура [20]. Он представил значения x и y , полученные за время с 1900 по 1940 г. с помощью сумм нескольких десятков периодических членов. Понятно, что при таком числе составляющих колебаний Кимура имел возможность путем подбора произвольных постоянных (амплитуд и начальных фаз) добиться достаточно хорошего согласия вычисленных значений координат полюса с наблюдаемыми на всем рассматриваемом интервале времени. Однако для экстраполяции движения полюса формулы Кимура все же оказались непригодными. Это выяснилось, когда Икеда вычислил по формулам Кимура координаты полюса с 1940 по 1954 г. [21]. При сравнении результатов с наблюдениями обнаружилось значительные расхождения, достигающие в конце периода $0''{,}3$.

Такая неудача попытки многолетнего прогноза движения полюса, по-видимому, не случайна: элементы годовой и особенно чандлеровской составляющей движения полюса подвержены, как известно, значительным изменениям. Существенно то, что эти изменения, по крайней мере у чандлеровской составляющей, не носят характера случайных отклонений от некоторых средних величин. Амплитуда меняется хотя и неправильно, но обычно в течение довольно продолжительных промежутков времени сохраняет завышенное или заниженное значение: начальная фаза иногда испытывает значительные изменения за относительно короткое время. Так например, как это было независимо замечено А. Я. Орловым, Данжоном и Гино, Ледерштегером и др., в 1924—1926 гг. начальная фаза чандлеровской составляющей изменилась почти на 180° .

Отсутствие видимой закономерности в изменениях элементов свободного движения полюса наглядно иллюстрируется графиками, изображенными на рис. 3. Для построения этих графиков мы взяли координаты полюса, опубликованные А. Я. Орловым [22] и, исключив из них годовую составляющую, перешли к полярным координатам, положив

$$x_c = C \cos \theta; \quad y_c = -C \sin \theta.$$

Заметим, что такой вид принимают формулы (3), если в них заменить $30^\circ t + c$ на θ . На рис. 3 приводятся графики изменения величины C и c , причем в формуле

$$c = \theta - 30^\circ t$$

за начало отсчета времени принята эпоха 1926,1.

Из графика видно, что период Чандлера менее 1,2 года — на это указывает общий подъем кривой $c(t)$, — и, что фазовый угол θ подвержен дополнительным изменениям; наиболее значительные изменения θ произошли в 1928—1929, 1934—1935, 1938—1939 и 1943—1945 гг.

Итак мы видим, что долгосрочный прогноз движения полюса не может дать надежных результатов, по крайней мере при современном состоянии знаний об этом явлении.

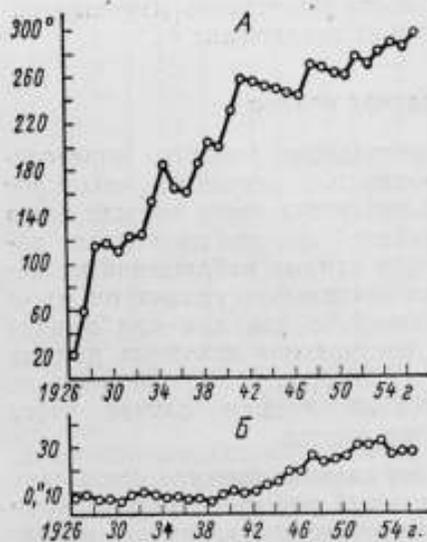


Рис. 3. Изменение фазового угла (кривая А) и радиуса-вектора (кривая Б) чандлеровской составляющей движения полюса

Экстраполировать координаты полюса можно только на короткий период, не более 0,5 года, что, впрочем, вполне достаточно для практических нужд. В основе всех способов экстраполяции лежит допущение, что в течение такого ограниченного времени элементы движения полюса меняются настолько незначительно, что можно пользоваться теми их значениями, которые были получены за предшествующий цикл Чандлера.

Особенно просто экстраполировать предварительные координаты полюса, вычисленные методом А. Я. Орлова. Поскольку значения C и c уже найдены, остается только продолжить ряды значений x_c и y_c пользуясь формулами (3), и добавить x_a и y_a , полученные по формулам (2). Этот простой способ мы поясняем примером экстраполяции данных табл. 2.

	x_c	x_a	x	y_c	y_a	y
1953,8	+21,3	+6,9	+28	+22,6	-4,7	+18
1953,9	+29,8	+2,3	+32	+9,0	-7,2	+2

Для повышения точности изложенного метода Е. П. Федоров предложил учитывать изменения амплитуды свободного движения полюса [23]. Если заменить траекторию полюса в его свободном движении за небольшой промежуток времени (1—2 года) дугой архимедовой спирали, т. е. представить x_c и y_c в следующем виде:

$$x_c = (C_0 + C_1 t) \cos(c + 30^\circ t); \quad y_c = -(C_0 + C_1 t) \sin(c + 30^\circ t),$$

то начальную фазу C можно вычислить по способу наименьших квадратов из решения 12 условных уравнений:

$$(x_c \cos 30^\circ t - y_c \sin 30^\circ t) \operatorname{tg} c = -y_c \cos 30^\circ t - x_c \sin 30^\circ t,$$

где $t = 0, 1, 2, \dots, 11$.

Значения C_0 и C_1 находятся из решения 12 условных уравнений такого вида

$$C_0 + C_1 t = \sqrt{x_c^2 + y_c^2} = r_c.$$

В качестве материала для проверки метода были взяты данные о движении полюса с 1900 по 1936 г. Выяснилось, что при экстраполяции до 0,4 года разности вычисленных и наблюдаемых координат не превосходят $0''{,}05$; средняя ошибка координат, экстраполированных на 0,1—0,4 года, равна $\pm 0''{,}023$.

Для обеспечения служб времени необходимыми им данными о движении полюса Международному бюро времени также пришлось заняться вопросом об экстраполяции координат полюса. Был принят следующий метод [18]. Экстраполяция по каждой координате делается независимо с помощью следующих выражений

$$\begin{aligned} x &= a \sin(36^\circ t + \alpha) + b \sin(30^\circ t + \beta), \\ y &= c \sin(36^\circ t + \gamma) + d \sin(30^\circ t + \delta), \end{aligned}$$

причем амплитуды a, b, c, d и начальные фазы определяются по данным о движении полюса за предшествующие 1,2 года. Точность экстраполяции координат полюса этим методом приблизительно такая же, как методом Е. П. Федорова [23].

7. Заключение

Советские службы времени не считали возможным пользоваться теми координатами полюса, которые рассылает Международное бюро времени, поскольку до второй половины 1958 г. эти координаты вычислялись в системе, начало которой, по существу, было взято произ-

вольно*. Именно отсюда возникла необходимость продолжать независимое определение координат полюса в системе среднего полюса эпохи наблюдений, что и составляло содержание работ Советской службы широты.

Пользуясь разными системами координат полюса, советские и зарубежные службы времени решали по разному задачу приведения своих результатов к среднему полюсу: первые приводили эти результаты к среднему полюсу эпохи наблюдений, вторые — к так называемому «барицентру полудни 1900—1905 гг.». Такое положение нельзя было считать нормальным, и мы можем с удовлетворением отметить, что теперь оно устранено благодаря тому, что Международное бюро времени также перешло к вычислению координат полюса в системе среднего полюса эпохи наблюдений. Тем самым устраняется основная причина, по которой советские службы времени не могли пользоваться теми же данными о движении полюса, что и зарубежные обсерватории.

Тем не менее, Советская служба широты будет еще в течение некоторого времени продолжать свою деятельность. Нужно ожидать, что ближайшие годы будут периодом коренной перестройки всей организации работ по определению координат полюса и, имея в виду необходимость тщательной подготовки будущего плана этих работ, мы считаем желательным продолжение испытаний различных методов.

Кроме того, уже теперь имеется возможность повысить точность результатов Советской службы широты. До сих пор основным ее недостатком было то, что обсерватории, участвующие в этой службе, были недостаточно рассредоточены по долготе, и из-за этого координата y получалась с меньшей точностью, чем координата x . Теперь благодаря тому, что систематические широтные наблюдения начаты в Иркутске и Благовещенске (а также отчасти и потому, что на Китабской широтной станции и Астрономической обсерватории им. Энгельгардта вступили в строй зенит-телескопы ЗТЛ-180), точность определения координаты можно будет значительно повысить.

Начиная с эпохи 1959,5, Советская служба широты уже использует в своих вычислениях результаты наблюдений на семи инструментах пяти обсерваторий. Как это видно из табл. 9, привлечение новых данных не оказало заметного влияния на систему предварительных координат полюса, но безусловно повысило их точность. В дальнейшем ее можно будет еще более повысить путем привлечения результатов наблюдений на втором зенит-телескопе и фотографической зенитной трубе в Пулково, призменной астролябии Данжона в Полтаве, зенит-телескопа и фотографической зенитной трубе в Москве (ГАИШ) и зенит-телескопа в Благовещенске.

Вообще данные о движении полюса, полученные за последние 60 лет, далеко не всегда удовлетворяют тем требованиям, которые предъявляются к ним при решении некоторых, главным образом, геофизических задач. Нужно думать, что в дальнейшем требования к точности и однородности этих данных будут еще более повышаться. Отсюда возникает необходимость пересмотра и улучшения существующей постановки работ по определению координат полюса. Речь идет о создании новых широтных станций, замене устаревшего оборудования уже существующих станций новым, а также об усовершенствовании методов совместной обработки результатов наблюдений на международных станциях и независимых обсерваториях и о создании для этого достаточно мощного вычислительного центра, снабженного современными счетными устройствами.

Сложившееся теперь положение характеризуется тем, что обеспечение служб времени нужными им данными о движении полюса взяло

* С 1961 г. Советская служба времени использует координаты полюса, вычисленные Международным бюро времени (прим. редактора).

Таблица 9

Координаты полюса, вычисленные по наблюдениям
в Пулково (1), Полтаве (2), АОЭ (1), Китабе (2) и Иркутске (1) — x_1, y_1 ;
Пулково (1), Полтаве (2) и Китабе (1) — x_2, y_2
в $0^{\circ},01$

Дата	x_1	x_2	y_1	y_2
1958,4	- 4	- 5	+29	+27
,5	+12	+11	+27	+25
,6	+25	+23	+17	+16
,7	+31	+29	+ 2	+ 2
,8	+27	+25	-14	-13
,9	+15	+15	-25	-23
1959,0	- 1	- 1	-29	-27
,1	-17	-15	-24	-22
,2	-27	-25	-12	-12
,3	-29	-27	+ 3	+ 3
,4	-22	-20	+16	+15
,5	-10	- 9	+25	+23

Примечание. В заголовке таблицы в скобках указано число инструментов.

на себя Международное бюро времени, т. е. учреждение, не занимающееся специально изучением этого явления. Понятно, что названное бюро вынуждено ограничиваться только прикладной стороной дела и не может заниматься более глубоким анализом результатов широтных наблюдений и теоретическим изучением явления. От этого терпит некоторый ущерб и практическая сторона дела — определение предварительных координат полюса для нужд службы времени.

По существу в настоящее время нет такого научного центра, который занимался бы сбором и всесторонним анализом всех результатов широтных наблюдений и мог бы сочетать оперативную работу по определению предварительных координат полюса с более фундаментальными исследованиями. Создание подобного центра должно быть предусмотрено будущим планом организации широтных исследований. Располагая современной вычислительной техникой, такой центр сможет быстро производить обработку материалов наблюдений, поступающих от наблюдательных станций, пользуясь при этом не теми упрощенными способами, которые применяются для срочного вычисления предварительных координат полюса теперь, а более совершенным, но и более сложным современным математическим аппаратом анализа, интерполяции и экстраполяции данных наблюдений.

Это было бы, по нашему мнению, наиболее радикальным решением задачи о повышении точности данных о движении полюса вообще, и, в частности, тех срочных данных, которыми пользуются службы времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Transactions of the IAU, 8, 1954, p. 72.
2. Е. П. Федоров. Труды Полтавской гравиметрической обсерватории, 4. Изд-во АН УССР, 1951, стр. 294.
3. Е. П. Федоров, Е. И. Евтушенко, С. Г. Кулагин и И. П. Огородник. Труды третьей Всесоюзной широтной конференции, Изд-во АН УССР, 1954, стр. 65.
4. М. А. Грачев. Вестник ВАС, вып. 2, 1919, стр. 20.

5. В. К. Абольд. Труды Полтавской широтной конференции. Изд-во АН УССР, 1941, стр. 20.
6. А. Я. Орлов. Труды Полтавской гравиметрической обсерватории, 5. Изд-во АН УССР, 1955, стр. 17.
7. Е. П. Федоров. Сб. «О задачах и программе наблюдений Международной службы широты». Изд-во АН СССР, 1954, стр. 19.
8. M. M. Thomson. *Journal of the Royal Astron. Society of Canada*, 49, № 5, 1955.
9. Труды третьей Всесоюзной широтной конференции. Изд-во АН УССР, 1954, стр. 30.
10. Труды 10-й Всесоюзной астрометрической конференции. Изд-во АН СССР, 1954, стр. 247.
11. А. Е. Филиппов. Сравнение Пулковских и Иоганнесбургских наблюдений широты. Изд-во АН УССР, 1956.
12. А. Я. Орлов. АЦ № 113—114, 1951, стр. 12—13; АЦ № 126, 1952, стр. 17—18; АЦ № 132, 1952, стр. 8—9.
13. Н. И. Пащенко. АЦ № 188, 1958, стр. 18.
14. Ло Дин-Цзян, Н. И. Пащенко, А. П. Цапова. АЦ, № 188, 1958, стр. 20.
15. *Transactions of the IAU*, 9, 1957, p. 280.
16. G. Cecchini. *Relazione sull'attività del Servizio Intern. delle Latitudini presentate alla XI Assemblea Generale dell'UGGI*, Torino, 1957.
17. G. Cecchini. *Relazione sull'attività del Servizio Intern. delle Latitudini dal 1957, 0 al 1958, 3 presentata alla X Assemblea Generale dell'UAI*, Torino, 1958.
18. A. Stoyko et N. Stoyko. *Bull. Astron.*, 21, Fasc. 111, 1957, p. 205.
19. G. Cecchini. *Bull. Géodésique*, No 17, 1950, p. 325.
20. H. Kimura. *Proc. Imper. Acad. Japan*, 19, 1943.
21. T. Hattori. *Publ. Intern. Latitude Observ. of Mizusava*, 2, No 2, 1956, p. 113.
22. А. Я. Орлов. Служба широты. Изд-во АН СССР, 1958.
23. Е. П. Федоров. АЦ № 164, 1955, стр. 13.

О ВЫЧИСЛЕНИИ ЭТАЛОННОГО ВРЕМЕНИ В СРЕДНИЕ МОМЕНТЫ ПЕРЕДАЧИ РАДИОСИГНАЛОВ

Обеспечение единства в области измерений времени сопряжено со специфическими особенностями естественного эталона времени и техники сравнений с ним.

Непосредственное пользование естественным эталоном времени — вращающимся земным шаром — не всегда возможно, весьма сложно и во многих случаях не обеспечивает необходимой точности. Создать же искусственную эталонную установку, воспроизводящую непрерывный повторяющийся процесс с неизменным периодом, и хранить ее так, как хранят эталон длины или массы, до настоящего времени не удавалось. Поэтому воспроизведение единицы времени осуществляется особым методом. Он заключается в предварительном установлении точного времени, в передачах по радио сигналов точного времени, контрольных приемах этих сигналов и в последующем определении вероятнейшего значения времени передачи этих сигналов, которое вычисляется по результатам многочисленных астрономических определений времени.

Воспроизведение единицы времени указанным методом обеспечивается Государственной службой времени, включающей обсерватории различных ведомств. На этих обсерваториях ведутся регулярные астрономические определения времени, передача и прием радиосигналов точного времени. Результаты этой работы используются для предварительного установления точного времени и для последующего определения вероятнейшего времени передачи сигналов.

Начиная с 1951 г. вероятнейшее время передачи радиосигналов определяется по методу, предложенному проф. Н. Н. Павловым. Основы этого метода были доложены научным сотрудником Пулковской обсерватории О. К. Уховой [1] на Всесоюзном совещании работников служб времени, созванном Центральным научно-исследовательским бюро единой службы времени в январе 1949 г. Новый метод получил одобрение совещания, но поскольку его разработка полностью еще не была закончена потребовалось полтора года экспериментального применения его параллельно с применявшимся в то время дифференциальным методом до того, как оказалось возможным ввести его в практику Государственной службы времени. Экспериментальное применение нового метода проводилось при консультациях Н. Н. Павлова и О. К. Уховой.

Поскольку вычисление вероятнейшего времени передач сигналов представляет математическую обработку данных, полученных в результате измерений, естественно, что изменение технических средств, применяемых при этих измерениях, должно соответствующим образом сказываться на применяемой методике математической обработки.

Техническое вооружение служб времени за период с 1951 г. изменялось главным образом в отношении часов и радиоприемной аппаратуры. Все наши службы времени используют теперь для хранения вре-

мени вместо маятниковых кварцевые часы, а для приема радиосигналов — вместо способа Кука-Прейпича хроноскопы, электронные счетчики или осциллографы. В связи с проведением МГГ службы времени получили кроме кварцевых часов новые пассажные инструменты, увеличилось число пассажных инструментов, снабженных фотоэлектрическими установками, значительно возросло число астрономических определений времени. Кроме того, при совместной математической обработке стали использоваться результаты наблюдений не только служб времени Советского Союза, но и некоторых демократических стран.

Все это находило отражение в методике вычислений, которая в той или иной части совершенствовалась по мере выполнения соответствующих исследований.

Отметим также, что со времени организации регулярно действующей советской службы широты в 1953 г. появилась и была использована возможность учета влияния колебаний полюса на результаты астрономических определений времени.

Применение метода Н. Н. Павлова с учетом указанных условий позволяет определять время выхода сигналов с антенн передающих радиостанций с метрологической точностью. Поэтому публикуемое в официальном издании Комитета стандартов, мер и измерительных приборов время передачи радиосигналов получило наименование «Эталонное время».

В настоящей статье излагается метод вычислений эталонного времени в том виде, как он применялся с 1958 г.

Сущность метода

Применяемый нами метод вычисления эталонного времени заключается в совместной обработке первичных материалов служб времени: показаний ведущих часов в средние моменты передачи радиосигналов с учетом времени распространения радиоволн и запаздывания радиоприемной аппаратуры, сравнений часов, результатов астрономических определений поправок ведущих часов.

Одновременные приемы сигналов одних и тех же радиостанций позволяют сравнить между собой ведущие часы служб времени, расположенных в разных городах. Из всех часов, которыми располагают службы времени, выбирается группа лучших, из которых образуются средние фиктивные, так называемые, опорные часы. Используя результаты сравнений, все астрономические определения служб времени пересчитываются на опорные часы. В предположении, что ход опорных часов меняется достаточно плавно, производится одновременное выравнивание астрономических определений времени всех служб времени, в результате которого вычисляются вероятнейшие значения поправок опорных часов, а затем и ведущих часов каждой из служб времени.

Значения времени передачи радиосигналов в какой-либо сеанс, вычисленные по результатам приема их различными службами времени с использованием полученных описанным выше способом поправок ведущих часов, будут различаться только за счет ошибок приема радиосигналов и вариаций хода опорных часов в течение суток, а также из-за неправильно принятого значения времени распространения радиоволн. Систематические ошибки в приемах сигналов могут быть выявлены в процессе сравнений часов и в дальнейшем исключены. Для ослабления влияния случайных ошибок и вариаций ходов часов из результатов, полученных по разным службам времени, берется среднее.

Принципиальное отличие нового метода от дифференциального [2] состоит в том, что здесь производится одновременное выравнивание всех астрономических определений времени всех служб времени тогда как дифференциальный метод состоит в сведении в одну систему зна-

чений времени передачи радиосигналов, вычисленных каждой из служб времени на основании выравниваний только своих наблюдений (отсюда прежнее название окончательных результатов — «сводные моменты»).

Сравнения часов

Для сравнений часов используются сводки показаний ведущих часов служб времени в средние моменты передач радиосигналов точного времени, т. е. показания часов, из которых вычтено время распространения радиоволн и время запаздывания радиоприемной аппаратуры.

Обозначим через $(h_a - h_s)_i^I$, $(h_a - h_s)_{II}^I$, $(h_a - h_s)_{III}^I$, . . . разности показаний ведущих часов служб времени a и s при приеме сигналов радиостанций I, II, III и т. д. в дату i ; через $(h_a - h_s)_{i+1}^I$, $(h_a - h_s)_{i+1}^{II}$, $(h_a - h_s)_{i+1}^{III}$ — разности показаний тех же часов при приеме сигналов тех же радиостанций в последующую дату и т. д.

Тогда разность $(h_a - h_s)_{i+1}^{I+1} - (h_a - h_s)_i^I = g_{a-s}^i$ представляет относительный суточный ход ведущих часов служб времени a и s , относящийся к эпохе i суток $+ (T_i + 12)^h$, где T_i — всемирное время передачи сигналов радиостанции I. Таким же образом получим относительные ходы по всем общим для этих двух служб времени сеансам передач радиосигналов для ряда последовательных суток.

Среднее значение относительного хода между смежными датами, вычисленное по всем общим приемам радиосигналов,

$$(g_{a-s})_{cp}^{i,i+1} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{j=N} [(h_a - h_s)_{j+1}^{I+1} - (h_a - h_s)_j^I]$$

будет относиться к эпохе $T_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{j=N} T_j + 12^h$. При равномерном распределен-

ных в течение суток приемах сигналов T_0 будет близко к 0^h .

Посредством полученных средних значений ходов разности показаний часов редуцируются к избранной стандартной эпохе T_0 , которая принята равной $12^h TU$, по формуле:

$$(h_a - h_s)_j^I + \frac{(g_{a-s})_{cp}}{24} (T_j - T_0) = (h_a - h_s)_{j,T_0}^I$$

В тех случаях, когда всемирное время T_j передачи сигналов радиостанций I меньше T_0 , при редуцировании разности показаний часов к T_0 используется относительный ход $(g_{a-s})^{i-1,i}$ — между предшествующими и данными сутками; когда T_j больше T_0 , используется ход $(g_{a-s})^{i,i+1}$ — между данными и последующими сутками.

Среднее значение $\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{j=N} (h_a - h_s)_{j,T_0}^I = (h_a - h_s)_{T_0}^I$ дает результат сравнений часов в стандартную эпоху даты i .

Сравнение разностей показаний часов $(h_a - h_s)_{j,T_0}^I$ и $(h_a - h_s)_{j,T_0}^I$ позволяет обнаружить систематические ошибки в приемах сигналов отдельных радиостанций, которые в случае, если они достаточно велики и если программа приемов не всегда полностью выполняется, необходимо учитывать для приведения результатов сравнений часов в однородную систему, а также и при вычислении окончательных значений времени передачи сигналов. На такие случаи приходится обращать особое внимание при малом числе общих для двух служб времени приемов.

Для определения систематических ошибок в разностях показаний часов при приемах радиосигналов используются материалы сравнений часов за месячный период. Систематические ошибки вычисляются по формуле

$$\Delta(h_a - h_s)_J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} [(h_a - h_s)_{J, T_0}^i - (h_a - h_s)_{T_0}^i]. \quad (1)$$

Если сумма $\sum_{J=1}^{J=N} \Delta(h_a - h_s)_J \neq 0$ вследствие пропусков в приемах сигналов, то она искусственно приводится к нулю путем разбрасывания невязки. Следовательно, систематические ошибки в разностях показаний часов при приемах радиосигналов должны исключаться из приведенных к стандартной эпохе соответствующих разностей показаний часов только в те даты, когда в приемах сигналов той или другой службы времени имели место пропуски или грубые просчеты. Более подробное описание сравнений часов по приемам радиосигналов имеется в статье О. К. Уховой [1].

Изложенным выше способом ведущие часы всех служб времени сравниваются с ведущими часами одной из служб времени, принимающей в течение суток наибольшее число сеансов радиосигналов. Другими критериями для выбора этой основной службы времени являются высокая точность приема радиосигналов и возможность наиболее точных сравнений ее ведущих часов с групповым хранителем, используемым для выравнивания астрономических наблюдений.

Сравнения ведущих часов всех служб времени с ведущими часами основной службы времени и сравнения этих последних с опорными часами позволяют пересчитать результаты астрономических определений времени, выполненных в каждой из служб времени, на опорные часы

$$U_{on}^i = U_a^i + \lambda_a - [(h_a - h_s)_{T_0}^i + (h_{on} - h_a)_{T_0}^i].$$

Здесь: U_{on}^i — поправка опорных часов в стандартную эпоху даты i ;
 U_a^i — поправка ведущих часов службы времени a , полученная в результате астрономических наблюдений в дату i и редуцированная к стандартной эпохе;
 λ_a — условная долгота службы времени a ;
 $(h_{on} - h_a)_{T_0}^i$ — разность показаний опорных часов и ведущих часов основной службы времени a в стандартную эпоху T_0 даты i .

Приведем некоторые фактические данные для 1958 г., относящиеся к рассмотренному разделу вычислений.

В качестве основной службы времени принята служба времени ВНИИФТРИ в Москве (M_M). По данным анализа [3], в 1957 г. она отличалась наиболее высокой точностью приема радиосигналов. Программа ее приемов позволяет надежно сравнить ее ведущие часы с ведущими часами всех других служб времени.

В табл. 1 даны численные характеристики точности сравнений часов по приемам радиосигналов. Таблица наглядно иллюстрирует эффект, полученный от замены маятниковых часов на кварцевые в службе времени Ташкентской астрономической обсерватории, а также высокую точность сравнений при применении осциллографического метода приема радиосигналов.

Таблица 1

Характеристики точности сравнений везущих часов по приемам радиосигналов

Службы времени*	Мм		Т		Мм		Ма		Мм		Им
	Кварцевые	Маятниковые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	
Ведущие часы	Кварцевые	Маятниковые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые	Кварцевые
Период	Апрель 1958 г.		Июль 1958 г.		Июль 1958 г.		Июль 1958 г.		Сентябрь 1958 г.		
Способ приема радиосигналов	На хроноскопе		На хроноскопе		На хроноскопе		На хроноскопе		На хроноскопе		На осциллографе
Среднее число общих приемов за сутки	6		6		6		12		12		12
Средняя квадратическая ошибка определения относительного хода везущих часов по приемам сигналов одной радиостанции	$\pm 0^s, 012_s$		$\pm 0^s, 003_s$		$\pm 0^s, 003_s$		$\pm 0^s, 002_s$		$\pm 0^s, 001_s$		$\pm 0^s, 001_s$
Средняя квадратическая ошибка определения среднего за сутки относительного хода везущих часов по всем общим приемам радиосигналов	$\pm 0, 005_0$		$\pm 0, 001_s$		$\pm 0, 001_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$
Средняя квадратическая ошибка определения разности показаний везущих часов по одному общему приему радиосигналов	$\pm 0, 007_1$		$\pm 0, 002_s$		$\pm 0, 002_s$		$\pm 0, 002_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$
Средняя квадратическая ошибка определения среднего за сутки значения разности показаний везущих часов по всем общим приемам радиосигналов.	$\pm 0, 002_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$		$\pm 0, 000_s$

* Сокращенные обозначения служб времени те же, что и в бюллетенях «Эталонное время».

Приведение результатов астрономических определений времени к среднему полюсу

Все астрономические определения времени, выполненные в службах времени, перед пересчетом на опорные часы приводятся к среднему гринвичскому меридиану. Для этого к наблюдаемым поправкам часов прибавляются принятые долготы инструментов* и вводятся поправки за уклонение мгновенной долготы в дату наблюдений от средней, т. е. вводятся редукции к среднему полюсу.

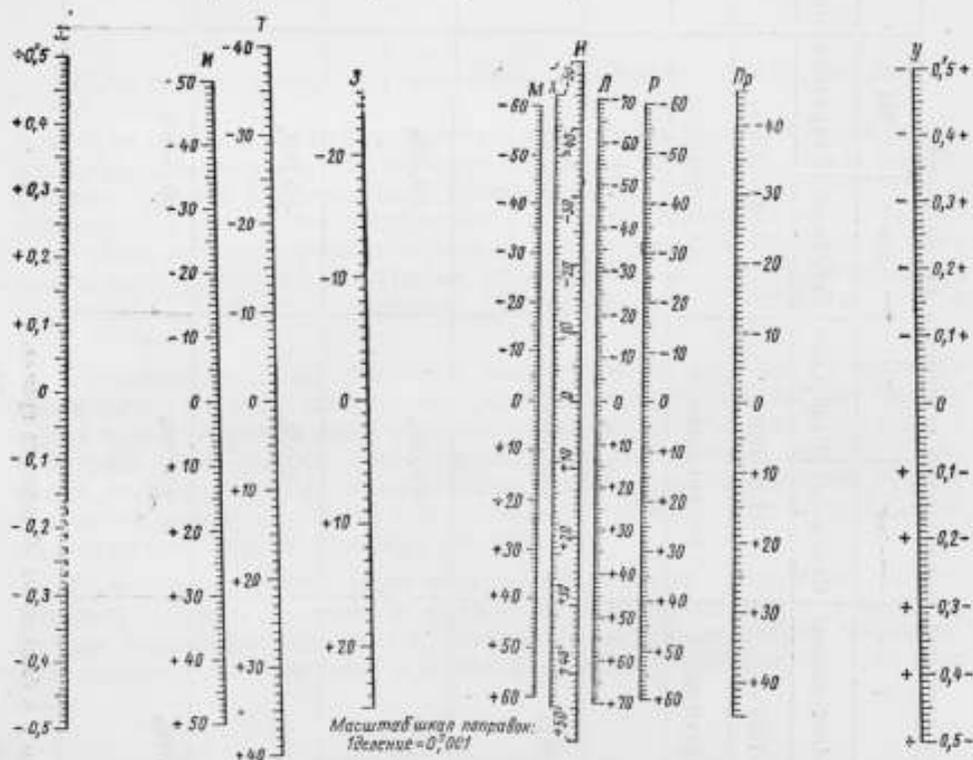


Рис. 1. Номограмма для определения поправок в долготы служб времени за колебание полюса

При определении поправок к долготе И и З пользоваться левыми знаками у шкалы y ; в остальных случаях — правыми

Координаты мгновенного полюса сообщаются Полтавской обсерваторией АН УССР. Они вычисляются методом А. Я. Орлова по результатам наблюдений четырех отечественных обсерваторий: Пулковской, Китабской, Полтавской и Казанской для каждой десятой доли года. Одновременно с интерполированными значениями сообщаются также результаты экстраполяции на 0,1 года вперед.

Последовательные значения каждой из координат наносятся на график, соединяются плавной кривой, с которой снимаются интерполированные значения через каждые пять суток.

Для определения поправок за движение полюса, по известной формуле $\Delta\lambda^* = \frac{1}{15} (y'' \cos \lambda_0 - x'' \sin \lambda_0) \operatorname{tg} \varphi_0$ и по координатам служб времени была составлена специальная номограмма (рис. 1). Применение ее заключается в следующем. Прозрачная линейка прикладывается к заданным значениям на шкалах x и y , и на пересечении ее со шкалами служб времени отсчитываются соответствующие поправки в дол-

* Долготы к востоку от Гринича считаются отрицательными.

готы. Применение номограммы сокращает время, необходимое для вычисления приведенных к среднему полюсу.

Снятые с номограммы значения поправок Δt интерполируются затем в пределах пяти суток на даты наблюдений.

Выравнивание результатов астрономических наблюдений времени

Методика выравнивания результатов астрономических наблюдений времени определяется рядом условий практического и принципиального характера.

Для удовлетворения потребностей заинтересованных организаций необходимо, чтобы эталонное время передач радиосигналов вычислялось в возможно более короткие сроки. Это условие ограничивает интервал времени, на протяжении которого производится выравнивание.

Качество опорных часов, точность и число выравниваемых наблюдений определяют способ выравнивания (графический или аналитический), вид уравнения (линейное, параболическое), посредством которого могут быть представлены выравненные поправки опорных часов, и интервалы времени, на протяжении которых наблюдаемые поправки могут быть объединены в группы с целью сокращения числа уравнений погрешностей при аналитическом выравнивании.

Наконец, система эталонного времени* должна быть несколько это возможно постоянна и изменения ее должны быть возможно более плавными. Из последнего условия следует, что опорные часы должны отличаться высоким постоянством хода и функцией, которой представляются их поправки, должна быть непрерывной и иметь непрерывную производную.

Все эти условия определяют следующий порядок вычислений.

Вычисления эталонного времени производятся последовательными сериями для каждого месяца в отдельности с использованием каждый раз материалов наблюдений и за первую половину последующего месяца.

Выравниваются поправки опорных часов группового хранителя времени, образованного из лучших кварцевых часов, которыми располагает Государственная служба времени. Ход таких опорных часов на ограниченном месячном интервале достаточно постоянен, чтобы можно было производить аналитическое выравнивание по осредненным поправкам, представляя закономерность изменения поправок опорных часов квадратичной функцией, и осреднять наблюдаемые поправки на полу-месячных интервалах.

При вычислениях осредненных поправок исключаются выравненные лично-инструментальные ошибки, что способствует поддержанию постоянства системы эталонного времени. Этот вопрос специально рассмотрен в следующем разделе.

Для того, чтобы обеспечить всюду непрерывность функции определяющей поправки опорных часов, и ее производной, определение параметров ее на отдельных участках производится с соблюдением следующих двух условий:

1) последнее значение поправки опорных часов, полученное в результате предшествовавшего выравнивания, должно служить исходным для последующего выравнивания;

2) на границах участков выравнивания обе кривые, представляющие поправки опорных часов, должны иметь общую касательную.

Если обозначим через $U = U_{1,0} + b_1 t + c_1 t^2$ — уравнение, представляющее поправки опорных часов, полученные в результате пред-

* Под термином «Система эталонного времени» мы понимаем последовательный ряд разностей между истинными поправками опорных часов и их значениями, полученными после выравнивания в процессе вычисления эталонного времени.

шествовавшего выравнивания на интервале от даты D_j ($t = 0$) до даты D_k ($t = n$), и через $U = U_{i+1,0} + b_{i+1}t + c_{i+1}t^2$ — уравнение поправок опорных часов на последующем интервале от даты D_k ($t = 0$), параметры которого определяются, то из поставленных выше условий вытекает, что

$$U_{i+1,0} = U_{i,0} + b_i n + c_i n^2 \text{ и } b_{i+1} = b_i + 2c_i n.$$

Таким образом неизвестным в уравнении поправок остается только коэффициент c_{i+1} .

Поскольку при выравнивании определяются поправки опорных часов, все осредненные поправки принципиально в одинаковой мере определяют результат выравнивания, и вычисление коэффициента c производится под условием $\sum v = 0$ *

Вычисление c выполняется последовательно, отдельно для каждого полумесячного интервала. Каждый раз используются три значения поправки опорных часов: U_{i+1} — последнее, полученное ранее значение выравненной поправки; U' и U'' — осредненные поправки для двух последующих полумесячных интервалов

$$c_{i+1} = \frac{U' + U'' - 2U_{i+1} - b_{i+1}(t' + t'')}{t'^2 + t''^2}.$$

Здесь t' и t'' — разность эпох каждой из осредненных поправок U' и U'' и эпохи последней выравненной поправки U_{i+1} .

С полученным значением c_{i+1} вычисляются выравненные поправки опорных часов для стандартных эпох всех последовательных дат первого полумесячного интервала до 15 числа включительно. Далее вычисляется новое значение b_{i+2} , новое значение c_{i+2} по последнему выравненному значению поправки опорных часов и двум следующим осредненным поправкам (первая из них U'' — та же, что и при предыдущем выравнивании, а вторая — осредненная поправка для следующего полумесячного интервала, т. е. для первой половины следующего месяца) и затем вычисляются выравненные поправки до последней даты данного, обрабатываемого месяца (окончательные значения) и для первой половины последующего месяца (предварительные, экстраполированные значения, которые используются для определения лично-инструментальных ошибок).

Определение лично-инструментальных ошибок

Поправки опорных часов, вычисленные по результатам наблюдений различных служб времени, различными наблюдателями, на различных инструментах, отягощены погрешностями систематического, неправильного периодического и случайного характера. Эти погрешности вызываются неточностями принятых значений долгот, инструментальными ошибками, личными ошибками наблюдателей, ошибками прямых восхождений звезд, влияниями метеорологического характера и др.

При большом числе астрономических определений (в 1957 г. в среднем на полумесячный интервал приходилось по 250 отдельных определений времени) можно считать, что влияние случайных ошибок в значительной мере компенсируется.

Иначе обстоит дело с ошибками, имеющими систематический характер. Они не только определяют систему эталонного времени, но часто могут вызывать существенные ее колебания. Это может происходить в случаях прекращения или перерывов в наблюдениях некоторых на-

* Оценка точности осредненных поправок по их внутренней сходимости не может в данном случае служить основанием для придания им различных весов, так как значения осредненных поправок могут быть искажены неисключенными ошибками систематического характера.

блюдателей или служб времени, при введении в эксплуатацию новых инструментов или прекращении использования некоторых из них, при включении в обработку результатов новых наблюдателей или новых служб времени.

Для исключения систематических ошибок и ослабления влияния погрешностей периодического характера мы применяем особый прием — определение и исключение так называемых выравненных лично-инструментальных ошибок. Под лично-инструментальной ошибкой мы понимаем систематическое для данного периода отклонение результатов, полученных некоторым наблюдателем на некотором инструменте, от вычисленных в системе эталонного времени. При таком определении лично-инструментальные ошибки заключают в себе, очевидно, не только собственно личные и инструментальные ошибки, но и систематические и периодические погрешности другого происхождения.

Вычисление лично-инструментальных ошибок каждого наблюдателя и соответствующего инструмента производится отдельно для каждого полумесячного интервала. Они вычисляются как разности: «среднее из наблюдаемых значений поправок опорных часов минус значение поправки опорных часов для соответствующей эпохи, вычисленное в системе эталонного времени».

Выравнивание лично-инструментальных ошибок выполняется по формуле

$$\Delta_{2,3} = \frac{\Delta_1 n_1 + 2\Delta_2 n_2 + 2\Delta_3 n_3 + \Delta_4 n_4}{n_1 + 2n_2 + 2n_3 + n_4}, \quad (2)$$

где: Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 и Δ_4 — лично-инструментальные ошибки некоторого наблюдателя на некотором инструменте за вторую половину предшествующего месяца, первую и вторую половину данного месяца и первую половину последующего месяца соответственно;

n_1 , n_2 , n_3 и n_4 — число отдельных значений поправок часов, по которым вычислена лично-инструментальная ошибка для соответствующего периода;

$\Delta_{2,3}$ — выравненная лично-инструментальная ошибка для данного месяца.

Заметим, что Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 всякий раз вычисляются по отношению к окончательным, интерполированным в системе эталонного времени значениям поправок опорных часов, а Δ_4 — по отношению к предварительным, экстраполированным значениям их. При таком способе вычислений выравненные лично-инструментальные ошибки для данного периода становятся известными только после того, как для этого периода уже было выполнено вычисление и выравнивание осредненных поправок. Поэтому при вычислениях последующих осредненных поправок приходится оперировать с экстраполированными значениями выравненных лично-инструментальных ошибок. Вычисленные для некоторого месяца лично-инструментальные ошибки исключаются из результатов наблюдений при вычислении осредненных поправок часов за последующий месяц и первую половину следующего за ним месяца. После очередного выравнивания осредненных поправок следует новое определение лично-инструментальных ошибок, исключение их выравненных значений из последующих наблюдений и т. д.

Первоначальное определение лично-инструментальных ошибок было выполнено в 1954 г. при переопределении системы эталонного времени [4, 5]. Тогда для четырех полумесячных интервалов с 15 февраля по 15 апреля были вычислены осредненные поправки опорных часов без учета лично-инструментальных ошибок; результатам отдельных служб времени при этом придавались равные веса, вне зависи-

мости от количества выполненных определений времени. Результат выравнивания осредненных поправок определил систему эталонного времени, относительно которой и были первоначально вычислены лично-инструментальные ошибки.

Ниже приведены некоторые данные, которые дают представление о том, в какой степени применяемый нами способ исключения систематических и неправильных периодических ошибок астрономических определений времени обеспечивает постоянство системы эталонного времени.

Экстремальные значения
в период с 1954 по 1957 г.
включительно

Число отдельных определений времени, по которым определялись осредненные поправки опорных часов	от 31 до 441
Число служб времени, по наблюдениям которых определялись осредненные поправки	от 9 до 16
Средние за год значения систематических ошибок отдельных служб времени	от $-0^s,082$ до $+0^s,096$
Разность между систематическими ошибками одной и той же службы времени, вычисленными для разных лет	$0^s,128$
Число комбинаций «наблюдатель-инструмент», по наблюдениям которых вычислялись осредненные поправки	от 13 до 49
Средние за год значения лично-инструментальных ошибок	от $-0^s,095$ до $+0^s,096$
Изменения лично-инструментальных ошибок одних и тех же наблюдателей и соответствующих инструментов	$>0^s,100$
Среднее за год отклонение системы эталонного времени от более или менее независимой системы Международного бюро времени [6, 7, 8] в 1954—1956 гг.	от $-0^s,001_5$ до $+0^s,003_0$
Среднее колебание в течение года системы эталонного времени по отношению к системе Международного бюро времени [6, 7, 8] в 1954—1956 гг.*	от $\pm 0^s,003_0$ до $\pm 0^s,008_2$

Уравнивание результатов наблюдений при вычислениях осредненных поправок опорных часов

Поправка опорных часов, вычисленная по наблюдениям некоторого наблюдателя на некотором инструменте, может быть представлена формулой

$$U_i = \frac{\sum^n U_i^*}{n_i} - \Delta_i,$$

где: U_i^* — наблюдаемое значение поправки часов, отнесенное к среднему гринвичскому меридиану и перечисленное на опорные часы;

n_i — число отдельных значений U_i^* , полученных в течение полумесяца данным наблюдателем на соответствующем инструменте;

Δ_i — выравненная лично-инструментальная ошибка данной комбинации «наблюдатель-инструмент».

* Величина $\pm 0^s,008$ соответствует 1954 г. При вычислении колебания системы эталонного времени А. Стойко не было учтено изменение системы эталонного времени в марте 1954 г. на $0^s,011$ при ее переопределении.

Средняя квадратическая ошибка величины U_i будет равна

$$m_{U_i}^2 = \frac{m_{u_i}^2}{n_i} + m_{\Delta_i}^2 \quad (3)$$

Здесь: $m_{u_i}^2 = 1,25 \frac{\sum |u_i - u| - \Delta_i}{n - 2}$ — средняя квадратическая ошибка

определения поправки часов, вычисленная по отклонениям наблюдаемых поправок от принятых (вычисленных в системе эталонного времени) после исключения выравненных для каждого месяца лично-инструментальных ошибок;

m_{Δ_i} — средняя квадратическая ошибка определения и экстраполяции выравненной лично-инструментальной ошибки.

Если бы величины m_{u_i} и m_{Δ_i} для каждой комбинации «наблюдатель-инструмент» были бы достаточно постоянными и их можно было уверенно экстраполировать, то определение весов не представляло бы затруднений и они определялись бы по формуле $P_i = \frac{1}{m_{U_i}^2}$.

Однако, сопоставление результатов анализа точности астрономических определений времени за разные годы показывает, что и m_{u_i} и m_{Δ_i} для данной комбинации «наблюдатель-инструмент» в различные периоды могут иметь значительно отличающиеся значения. В качестве примера приведем данные для нескольких наблюдателей и инструментов для ряда смежных лет.

Таблица 2

Наблюдатель, инструмент, служба времени		1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957
Алексеев Бамберг № 8462 (Лм)	m_u	28	35	24	20	24	24	22
	m_{Δ}	11	20	22	7	14	12	9
Товчигречко Бамберг № 8462 (Лм)	m_u	37	31	21	—	19	14	23
	m_{Δ}	27	19	22	—	8	8	16
Бальжинова Аскания Верке № 85951 (Т)	m_u	—	25	20	23	—	30	—
	m_{Δ}	—	8	15	11	—	27	—
Беда Аскания Верке № 85951 (Т)	m_u	25	28	22	20	18	21	22
	m_{Δ}	17	16	7	14	10	17	21
Надеев Цейсс № 14562 (Им)	m_u	20	22	24	19	16	14	15
	m_{Δ}	29	10	10	7	8	18	2
Посошков Бамберг № 80750 (Х)	m_u	22	19	20	21	25	21	20
	m_{Δ}	16	16	22	13	11	9	31
Пильник АПМ № 530001 (Ма)	m_u	—	—	—	20	17	21	18
	m_{Δ}	—	—	—	8	16	19	5
Гун Прен (З)	m_u	—	—	—	19	19	16	18
	m_{Δ}	—	—	—	14	16	15	2
Шень Прен (З)	m_u	—	—	—	22	19	24	16
	m_{Δ}	—	—	—	13	17	14	6
Пекны Аскания Верке № 376206 (Пр)	m_u	—	—	—	—	18	22	23
	m_{Δ}	—	—	—	—	18	24	20

В табл. 2 приведены значения m_{u_i} и, вместо m_{Δ_i} , величины m_{σ_i} — средние квадратические колебания систем «наблюдатель-инструмент», характеризующие изменения лично-инструментальных ошибок в течение года:

$$m_{\sigma_i} = \sqrt{\overline{m_{u_i}^2} - m_{u_i}^2}$$

где:

$$\overline{m_{u_i}^2} = 1,25 \frac{\sum \left| (u_i^* - u_i) - \frac{\sum (u_i^* - u_i)}{n} \right|^2}{n_i - \frac{1}{2}}$$

Значения m_{u_i} и m_{σ_i} даны в тысячных долях секунды.

Как видно из таблицы, вариации m_{u_i} и особенно m_{σ_i} таковы, что экстраполировать их значения для определения весов нельзя: вычисленные по экстраполированным значениям m_{u_i} и m_{σ_i} веса для различных комбинаций «наблюдатель-инструмент» не будут соответствовать соотношениям фактической точности результатов астрономических определений. Поэтому до 1958 г. веса назначались пропорционально числу выполненных отдельных определений времени.* Решение вопроса об определении весов в первом приближении было нами получено после того, как накопился достаточный материал для статистического анализа вариаций лично-инструментальных ошибок. По материалам вычислений эталонного времени за 1953—1957 гг. оказалось возможным более или менее уверенно установить зависимость между вариациями выравненных лично-инструментальных ошибок и числом отдельных определений времени, по которым они были вычислены.

В табл. 3 приведены результаты статистических подсчетов зависимости средних квадратических вариаций выравненных лично-инструментальных ошибок δ_{Δ} от числа наблюдений n , выполненных в течение месяца для всех наблюдателей и инструментов, регулярно участвовавших в наблюдениях.

Таблица 3

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	18	22	24	25	36	38
δ_{Δ}	21,4	16,6	13,4	12,3	11,5	10,0	9,6	10,0	9,4	8,6	7,4	7,8	7,4	5,6	3,7	7,4	7,6	5,8
k	3	11	14	13	17	7	15	4	6	8	2	1	1	1	2	1	2	1

Значения δ_{Δ} даны в тысячных долях секунды.

k — число независимых рядов, по которым определено δ_{Δ} для данной частоты наблюдений.

* На основании сопоставления средних квадратических ошибок определения времени, полученных из анализа предшествовавших наблюдений, в 1954 г. фотоэлектрическим наблюдениям придавался вдвое больший вес по сравнению с визуальными. Однако последующий анализ не подтвердил целесообразности такого подхода к определению весов.

В табл. 4 приведены аналогичные данные только для фотоэлектрической регистрации звездных прохождений. Так как для малых значений n не было фактического материала наблюдений фотоэлектрическим методом, для установления общей закономерности были искусственно, путем случайных выборок, образованы ряды наблюдений для $n = 2$ и $n = 4$, и соответствующие значения δ_{Δ} внесены в табл. 4.

Таблица 4

n	2	4	5	7	12	13	14	22	24	25	36	38
δ_{Δ}	11,7	8,1	11,9	6,3	8,8	8,8	7,8	5,6	8,7	7,4	7,6	5,8
k	3	3	2	1	1	1	1	1	2	1	2	1

Зависимость δ_{Δ} от n может быть довольно хорошо представлена формулой $\delta_{\Delta} = a + \frac{\sigma}{n}$. Это подтверждают графики (рис. 2 и 3), на которых нанесены табличные значения δ_{Δ} и вычисленные по вышеприведенной формуле после того, как параметры ее были определены по способу наименьших квадратов:

по данным табл. 3 $a_1 = +5^{ms},8; \sigma_1 = +31^{ms},6;$
 по данным табл. 4 $a_2 = +7^{ms},0; \sigma_2 = +9^{ms},8.$

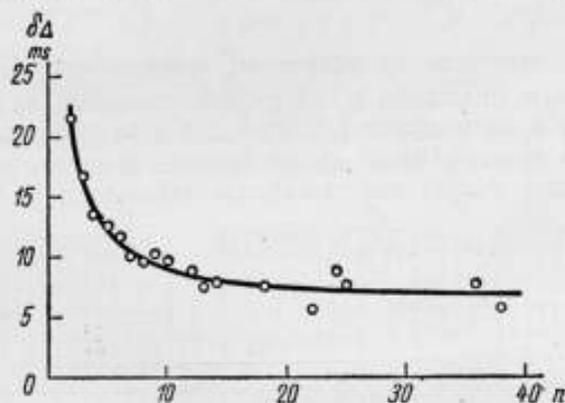


Рис. 2. Зависимость средних квадратических вариаций δ_{Δ} выравненных лично-инструментальных ошибок от частоты астрономических определений времени по материалам визуальных и фотоэлектрических наблюдений

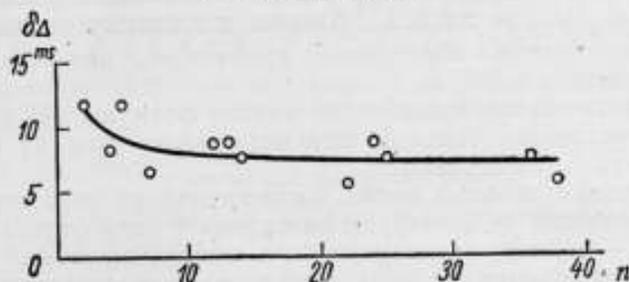


Рис. 3. Зависимость средних квадратических вариаций δ_{Δ} выравненных лично-инструментальных ошибок от частоты астрономических определений времени по материалам фотоэлектрических наблюдений

Поскольку данные левой части табл. 3 (для $2 \leq n \leq 13$) относятся в основном (на 95%) к визуальным наблюдениям, а в остальной части ($n \geq 14$) данные этой таблицы основаны на фотоэлектрических наблюдениях (за 5-летний период имелся только один годичный визуальный ряд наблюдений с частотой $n = 18$), можно считать, что

$$\begin{aligned} a_1 &= +31^{m^s}, 6 \text{ соответствует визуальным наблюдениям,} \\ a_2 &= +9^{m^s}, 8 \text{ соответствует фотоэлектрическим наблюдениям, и для} \end{aligned}$$

a для обоих случаев принять среднее значение

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2} = +6^{m^s}, 4.$$

Заменим в формуле (3) среднюю квадратическую ошибку m_Δ средней квадратической вариацией выравненных лично-инструментальных ошибок $\delta_\Delta = a + \frac{\sigma}{n_\Delta}$. Такая замена вполне законна и целесообразна, так как при исключении выравненных лично-инструментальных ошибок используются их значения, вычисленные для предшествующего месяца.

После несложных преобразований получим

$$m_{U_1}^2 = \frac{m_\Delta'^2 n_\Delta^2 + (an_\Delta + \sigma)^2 n}{nn_\Delta^2}$$

Как мы видели выше, колебания m_Δ таковы, что частные значения m_Δ не могут быть положены в основу при определении относительных весов. Поэтому в дальнейших расчетах для всех наблюдателей и инструментов было принято одно общее, среднее значение $m_\Delta = \pm 0^s, 017$ (среднее значение, полученное из анализа наблюдений за 1956—1957 гг.).

Положив, что $P_{U_1} = \frac{\mu^2}{m_{U_1}^2}$, получим следующее окончательное выражение

$$P_{U_1} = \frac{\mu^2 nn_\Delta^2}{m_\Delta'^2 n_\Delta^2 + (an_\Delta + \sigma)^2 n} \quad (4)$$

Для вычисления весов принято, что $P_{U_1} = 1$ при $n = 2$, $n_\Delta = 4$, $a = 6,4$ и $\sigma = 31,6$, т. е. при регулярных визуальных определениях времени с частотой 2 наблюдения в полмесяца. При этом средняя квадратическая ошибка поправки опорных часов с весом $P_{U_1} = 1$ имеет значение $\mu = (m_{U_1})_{P=1} = \pm 0,019$, близкое к среднему значению средней квадратической ошибки определения времени m_Δ для всех наблюдателей и инструментов в 1957 г.

Для практического пользования вместо формулы (4) применяются графики, вычисленные отдельно для визуальных (рис. 4) и фотоэлектрических (рис. 5) наблюдений.

Вес поправки опорных часов, вычисленной по наблюдениям некоторого наблюдателя на некотором инструменте (при фотоэлектрической регистрации — по наблюдениям любого наблюдателя на данном инструменте), выбирается из этих графиков по аргументам: n — числу отдельных определений времени в течение данного полмесяца и

$$n_\Delta = \frac{n_1 + 2n_2 + 2n_3 + n_4}{3} \text{ [см. формулу (2)].}$$

Графики составлены так, что веса по ним определяются с округлением до единицы.

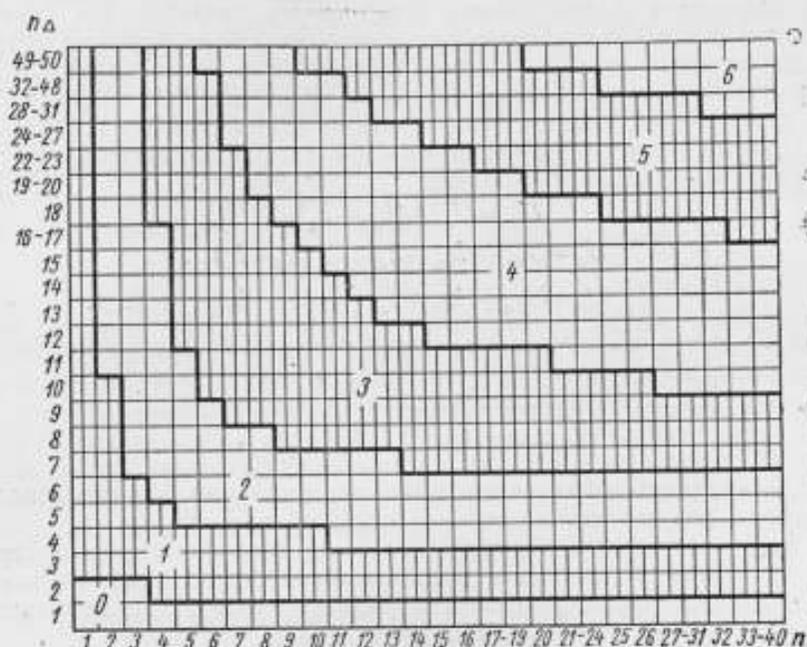


Рис. 4. График для определения веса поправки опорных часов, полученной при визуальных наблюдениях

$$P = \frac{0,019^2 n \cdot n_{\Delta}^2}{0,017^2 n_{\Delta}^2 + (0,0064 n_{\Delta} + 0,0316)^2 n}$$

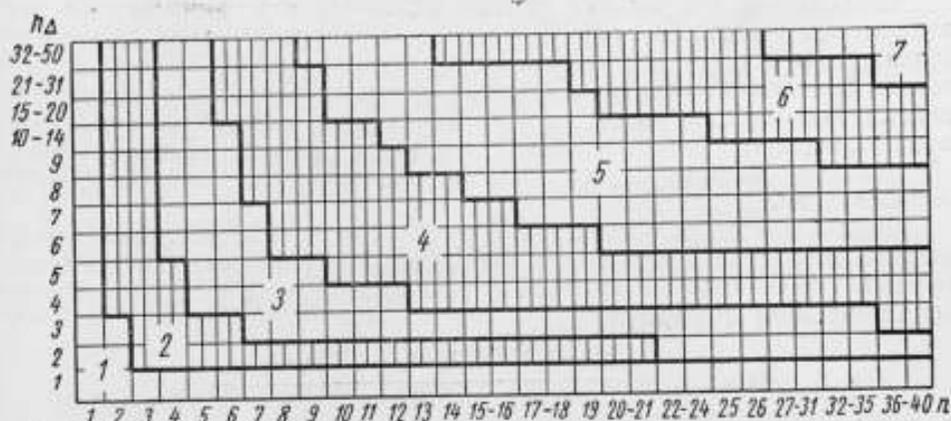


Рис. 5. График для определения веса поправки опорных часов, полученной при фотоэлектрических наблюдениях

$$P = \frac{0,019^2 n \cdot n_{\Delta}^2}{0,017^2 n_{\Delta}^2 + (0,0064 n_{\Delta} + 0,0098)^2 n}$$

С учетом веса осредненные поправки и соответствующие им эпохи вычисляются по формулам:

$$U = \frac{\sum (U_i - \Delta_i) P_i}{\sum P_i}; \quad D = \frac{\sum D_i P_i}{\sum P_i},$$

где D_i — эпоха каждого частного значения U_i .

Вычисление времени передачи радиосигналов

В результате выравнивания осредненных поправок для стандартной эпохи каждых суток получают окончательные значения поправок опорных часов в системе эталонного времени. Воспользовавшись теперь результатами сравнений ведущих часов каждой из служб времени с опорными часами, получим для стандартной эпохи каждых суток поправки ведущих часов каждой из служб времени в одной, общей системе эталонного времени.

$$\begin{aligned} U_a &= U_{on} + (h_{on} - h_a)T_s, \\ U_b &= U_{on} + (h_{on} - h_b)T_s + (h_a - h_b)T_s, \\ U_c &= U_{on} + (h_{on} - h_c)T_s + (h_a - h_c)T_s \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Далее вычисляются ходы ведущих часов, посредством которых поправки часов интерполируются на эпоху передачи радиосигналов.

Время передачи сигналов вычисляется по формуле

$$H_{a,l} = h_{a,l} + U_{a,l} - \Delta_{(h_a - h_{cp})l},$$

где: $H_{a,l}$ — время передачи сигналов радиостанции l , вычисленное по результатам приема их службой времени a ;

$h_{a,l}$ — показания ведущих часов службы времени a в средний момент передачи радиосигналов, (т. е. исправленные за время распространения радиосигналов и запаздывания радиоприемной аппаратуры);

$U_{a,l}$ — поправка ведущих часов службы времени a , вычисленная в системе эталонного времени и интерполированная на эпоху передачи сигналов;

$\Delta_{(h_a - h_{cp})l}$ — систематическая для службы времени a ошибка приема сигналов радиостанции l .

Систематические ошибки приема радиосигналов вычисляются по материалам сравнений часов. В разделе «Сравнения часов» была приведена формула (1) для определения систематических ошибок в разностях показаний часов при приемах сигналов различных радиостанций. Систематические ошибки в показаниях часов каждой из служб времени вычисляются по отношению к некоторой средней службе времени, образованной из всех служб времени, принимающих сигналы данной радиостанции.

Если сигналы радиостанции l в некоторый, определенный сеанс принимают службы времени a , b , c и d , то систематическая ошибка в показаниях часов службы времени a при приеме этих сигналов может быть вычислена по формуле

$$\Delta_{(h_a - h_{cp})l} = \frac{\Delta_{(h_a - h_b)l} + \Delta_{(h_a - h_c)l} + \Delta_{(h_a - h_d)l}}{4}$$

и систематические ошибки в показаниях часов других служб времени определяются по формулам:

$$\Delta_{(h_b - h_{cp})l} = \Delta_{(h_a - h_{cp})l} - \Delta_{(h_a - h_b)l},$$

$$\Delta_{(h_c - h_{cp})l} = \Delta_{(h_a - h_{cp})l} - \Delta_{(h_a - h_c)l},$$

$$\Delta_{(h_d - h_{cp})l} = \Delta_{(h_a - h_{cp})l} - \Delta_{(h_a - h_d)l}.$$

В практике вычислений имеют место случаи, когда систематическая ошибка в разностях показаний часов некоторой службы времени i и основной службы времени при приеме сигналов некоторой радиостанции имеет значение, резко отличающееся от всех других, вычис-

ленных по данным приемов других служб времени*. В этих случаях при вычислении систематической ошибки приема сигналов основной службы времени $\Delta(h_a - h_{cp})$, соответствующая разность $\Delta(h_a - h_i)$ не принимается во внимание, а используется только для определения систематической ошибки приема службы времени i .

Обычно систематические ошибки приема сигналов не превышают $0^s,002$. В особых случаях, о которых говорилось выше, они имели значение до $0^s,007$.

Окончательное время выхода сигналов с антенн передающих радиостанций вычисляется как среднее арифметическое из значений, полученных по приемам всех служб времени

$$H_i = \frac{1}{n} \sum H_{i,r}$$

Расхождения значений времени передачи сигналов, вычисленных по приемам различных служб времени, в большинстве случаев заключаются в пределах $\pm 0^s,002$. Отдельные результаты, уклоняющиеся от среднего более чем на $0^s,004 - 0^s,005$, при выводе среднего, как правило, не принимаются во внимание. В тех же случаях, когда при ограниченном числе отдельных результатов (2—3) имеют место большие расхождения между ними ($H_{\max} - H_{\min} \geq 0^s,010$), выводится среднее значение, сопровождаемое двоеточием, — условным знаком ненадежности результата.

Дополнительные данные, сообщаемые в бюллетенях «Эталонное время»

Помимо таблицы «Эталонное время», в которой помещены окончательные, вероятнейшие значения времени передач радиосигналов, таблицы поправок часов и сводки астрономических определений времени в бюллетень включены также дополнительные данные, облегчающие переход на систему координат полюса SIR** и на систему приближенно равномерного времени TU2, принятые Международным бюро времени, и данные для перехода на любую другую систему координат полюса. Для вычисления этих данных осредненные поправки опорных часов дополнительно вычисляются в трех вариантах.

Вариант 1 — из осредненных поправок опорных часов U , вычисленных для получения эталонного времени, исключаются введенные ранее поправки за движение полюса $\Delta\lambda$, вычисленные в системе Советской службы широты $U' = U - \Delta\lambda$.

Вариант 2 — в осредненные поправки опорных часов U' , вычисленные в варианте 1, вводятся редукции к среднему полюсу $\Delta\lambda_s$, вычисленные в системе SIR.

$$U'' = U' + \Delta\lambda_s$$

Вариант 3 — в осредненные поправки опорных часов U'' вычисленные в варианте 2, вводятся поправки за неравномерность вращения Земли ΔT_s , сообщаемые Международным бюро времени

$$U''' = U'' + \Delta T_s = U - \Delta\lambda + \Delta\lambda_s + \Delta T_s$$

Поправки за движение полюса при этих вычислениях определяются не для каждого отдельного наблюдения, а для среднего из всех

* Такие случаи имеют место при больших (несколько миллисекунд) ошибках в определении запаздывания приемной аппаратуры или при неверно принятых поправках за время распространения радиоволны.

** SIR — Срочная международная служба широты, основывающаяся на наблюдениях 11 обсерваторий (Белград, Вашингтон, Гринич, Карлофорте, Мидзусава, Оттава, Париж, Полтава, Пулжово, Ричмонд и Токио).

наблюдений, выполненных в данном пункте. Редукция осредненной поправки к среднему полюсу вычисляется по формуле:

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta\lambda_M \sum P_M + \Delta\lambda_L \sum P_L + \Delta\lambda_N \sum P_N + \Delta\lambda_T \sum P_T + \dots}{\sum P_M + \sum P_L + \sum P_N + \sum P_T + \dots}$$

где: $\Delta\lambda_M, \Delta\lambda_L, \Delta\lambda, \Delta\lambda_T$ и т. д. — редукции к среднему полюсу наблюдений, выполненных в Москве, Ленинграде, Иркутске, Ташкенте и т. д.;
 $\sum P_M, \sum P_L$ и т. д. — суммы весов наблюдений, выполненных в соответствующих пунктах.

Выравнивание осредненных поправок U', U'' и U''' выполняется аналогично тому, как выравниваются осредненные поправки U при вычислении эталонного времени. Затем для каждых суток вычисляются разности выравненных значений:

$U - U' = \Delta H_0$ — поправка за движение полюса, учтенная ранее при вычислении эталонного времени;

$U'' - U = \Delta H_\lambda - \Delta H_0$ — поправка к эталонному времени для перехода к системе координат SIR (в бюллетенях даются величины $\Delta H_0 - \Delta H_\lambda$);

$U''' - U = \Delta T U_2$ — поправка к эталонному времени для перехода к системе приближенно-равномерного времени TU_2 .

Величины ΔH_0 вычисляются на тот случай, если когда-нибудь возникнет необходимость привести эталонное время к новой системе координат полюса. В таком случае из эталонного времени следует исключить ΔH_0 и ввести новые поправки, вычисленные с новыми значениями координат полюса. Эти новые поправки могут быть вычислены для каждой осредненной поправки опорных часов по формуле

$$\Delta H_t = A_t x_t - B_t y_t$$

где: x_t и y_t — координаты полюса в новой системе для эпохи t .

$$\text{Значения коэффициентов } A_t = \frac{\sum P_i \sin \lambda_i \operatorname{tg} \varphi_i}{15 \sum P_i} \text{ и } B_t = \frac{\sum P_i \cos \lambda_i \operatorname{tg} \varphi_i}{15 \sum P_i}$$

вычисляются для каждой осредненной поправки и публикуются в бюллетенях для соответствующей эпохи. Здесь P_i — вес астрономических определений, выполненных службой времени i с координатами λ_i и φ_i , которые были использованы при вычислении осредненной поправки, эпоха которой t . Для промежуточных дат поправки ΔH могут быть получены путем интерполяции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ухова О. К. Новый способ вычисления сводных моментов ритмических сигналов времени. Изв. ГАО, № 154, 1955 г.
2. Долгов П. Н. О дифференциальном методе вывода сводных моментов ритмических сигналов времени и об оценке их точности. Тр. ВНИИФТРИ, Измерение времени, 1958 г.
3. Белоцерковский Д. Точность определения эталонного времени в 1957 году. Эталонное время, апрель, 1958.
4. Эталонное время в средние моменты передач радиосигналов, март, 1954.
5. Белоцерковский Д. Точность определения эталонного времени в 1954 году. Эталонное время, март, 1955.
6. Anna Stoyko. La précision des Services Horaires de 30 Observatoires en 1954. Bulletin horaire du BIH, n° 12b, (Série E).
7. Anna Stoyko. La précision des Services Horaires de 29 Observatoires en 1955. Bulletin horaire du BIH, n° 6, (Série F).
8. Anna Stoyko. La précision des Services Horaires de 29 Observatoires en 1956. Bulletin horaire du BIH, n° 12, (Série F).

ИССЛЕДОВАНИЕ ХОДОВ ЧЕТЫРЕХ КВАРЦЕВЫХ ЧАСОВ

Исследованием ходов кварцевых часов необходимо было определить, какие из этих часов имеют наиболее постоянный или закономерно, вследствие старения, изменяющийся ход. Иными словами, следовало установить, для каких часов изменение поправок может быть достаточно хорошо представлено аналитической формулой. С помощью этих лучших часов предполагалось в дальнейшем выполнить некоторые исследования, связанные с методикой вычисления эталонного времени передаточных радиосигналов.

Исследовались ходы четырех кварцевых часов ХГИМИП за полуторагодовой период — с апреля 1953 г. по сентябрь 1954 г.

Ходы часов вычислялись по результатам астрономических определений всех служб времени Советского Союза по невыравненным наблюдениям поправок часов, исправленным лишь за движение полюса. Все определенные за каждый полумесячный период поправки объединялись в одну группу, для средней эпохи которой вычислялось среднее значение поправки. По двум таким поправкам, называемым осредненными, разделенным примерно 30-суточным интервалом, для средней эпохи между ними вычислялось среднее значение суточного хода.

При таком порядке вычисления ходов ошибка в определении одной какой-либо осредненной поправки сказывается с разными знаками на двух значениях хода, и при большом числе отдельных значений ходов не влияет на искомое уравнение систематического изменения хода часов.

Уравнения систематического изменения хода часов были представлены квадратичным выражением

$$G = G_0 + at + bt^2. \quad (1)$$

В результате вычисления по способу наименьших квадратов получены следующие уравнения: *

$$\left. \begin{aligned} G_{K1} &= -9^{ms},5547 + 0^{ms},0017220t + 0^{ms},000027343t^2 \\ G_{K2} &= -7^{ms},9196 + 0^{ms},0035521t + 0^{ms},000022002t^2 \\ G_{K3} &= -6^{ms},6765 - 0^{ms},0046011t + 0^{ms},000021049t^2 \\ G_{K4} &= -12^{ms},6365 - 0^{ms},0263099t + 0^{ms},000024356t^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь так же, как и в последующих уравнениях, через t обозначено число суток, считая от января 0,1954.

На рис. 1 сплошными линиями соединены точки, соответствующие наблюдаемым значениям суточных ходов, пунктирными — показан результат вычисления по формулам (2).

Из графиков видно, что выравненные ходы часов K1, K2 и K3 не могут быть представлены экспонентой или иной кривой, асимптотически приближающейся к линии, параллельной оси абсцисс.

Объясняется это, по-видимому, тем, что систематические изменения частоты кварцевых генераторов зависят не только от старения кварцевого элемента, но и от старения других элементов схемы.

* Перед выравниванием и для всех последующих вычислений предварительно сняты постоянные составляющие ходов; ход часов K1 увеличен на $280^{ms},0$; ход часов K2 — на $138^{ms},3$; ход часов K4 — на $871^{ms},7$.

Интегрированием уравнений (2) были получены уравнения поправок часов (3). Постоянная интеграции была определена под условием, что сумма уклонений наблюдаемых поправок от вычисленных равна нулю.

$$\left. \begin{aligned} U_{K1} &= U_0^I - 9^{ms} 5547t + 0,000861t^2 + 0,000009114t^3 \\ U_{K2} &= U_0^{II} - 7^{ms} 9196t + 0,001776t^2 + 0,000007334t^3 \\ U_{K3} &= U_0^{III} - 6^{ms} 6765t - 0,002300t^2 + 0,000007016t^3 \\ U_{K4} &= U_0^{IV} - 12^{ms} 6365t - 0,013155t^2 + 0,000008119t^3 \end{aligned} \right\} (3)$$

Вычисленные по формулам (3) поправки часов сопоставлялись с теми значениями осредненных поправок, по которым вычислялись ходы, но из которых было исключено влияние лично-инструментальных ошибок, т. е. с осредненными поправками, приведенными к одной системе.

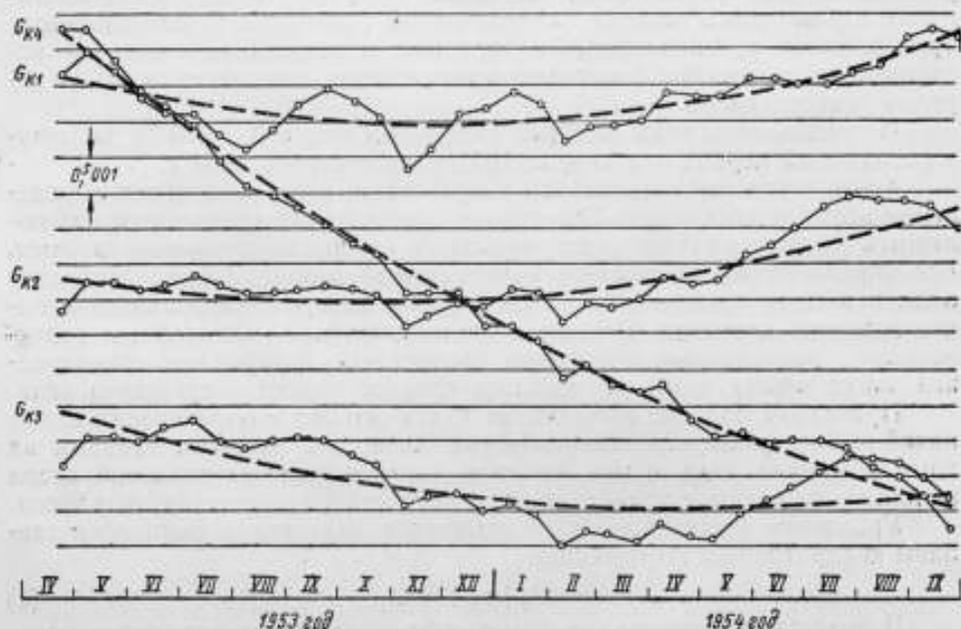


Рис. 1. Наблюдаемые и выравненные значения суточных ходов кварцевых часов.

Разности наблюдаемых и вычисленных поправок представлены на рис. 2. Для часов К1, К2 и К4 эти разности выравнены графически; для часов К3 — аналитически. Результаты выравнивания показаны плавными кривыми.

Исследование уклонений наблюдаемых поправок от вычисленных служило разным авторам для определения неравномерности вращения Земли. Однако если бы мы попытались определить неравномерность вращения Земли при помощи исследуемых кварцевых часов, то по каждому часам получили бы отличные друг от друга значения. Только часы К2 и К3 дали бы некоторое согласие, а по двум другим получились бы совсем другие периоды, фазы и амплитуды.

Для часов К3, у которых разности $U_{набл} - U_{смч}$ изменяются наиболее закономерно, сглаживающая кривая была вычислена по формуле, содержащей годичный и полугодичный периодические члены:

$$\Delta U = U_{набл} - U_{смч} = A_0 + A_1 \sin \frac{2\pi}{365} (t + \varphi_1) + A_2 \sin \frac{4\pi}{365} (t + \varphi_2), \quad (4)$$

где t — число суток от начала года.

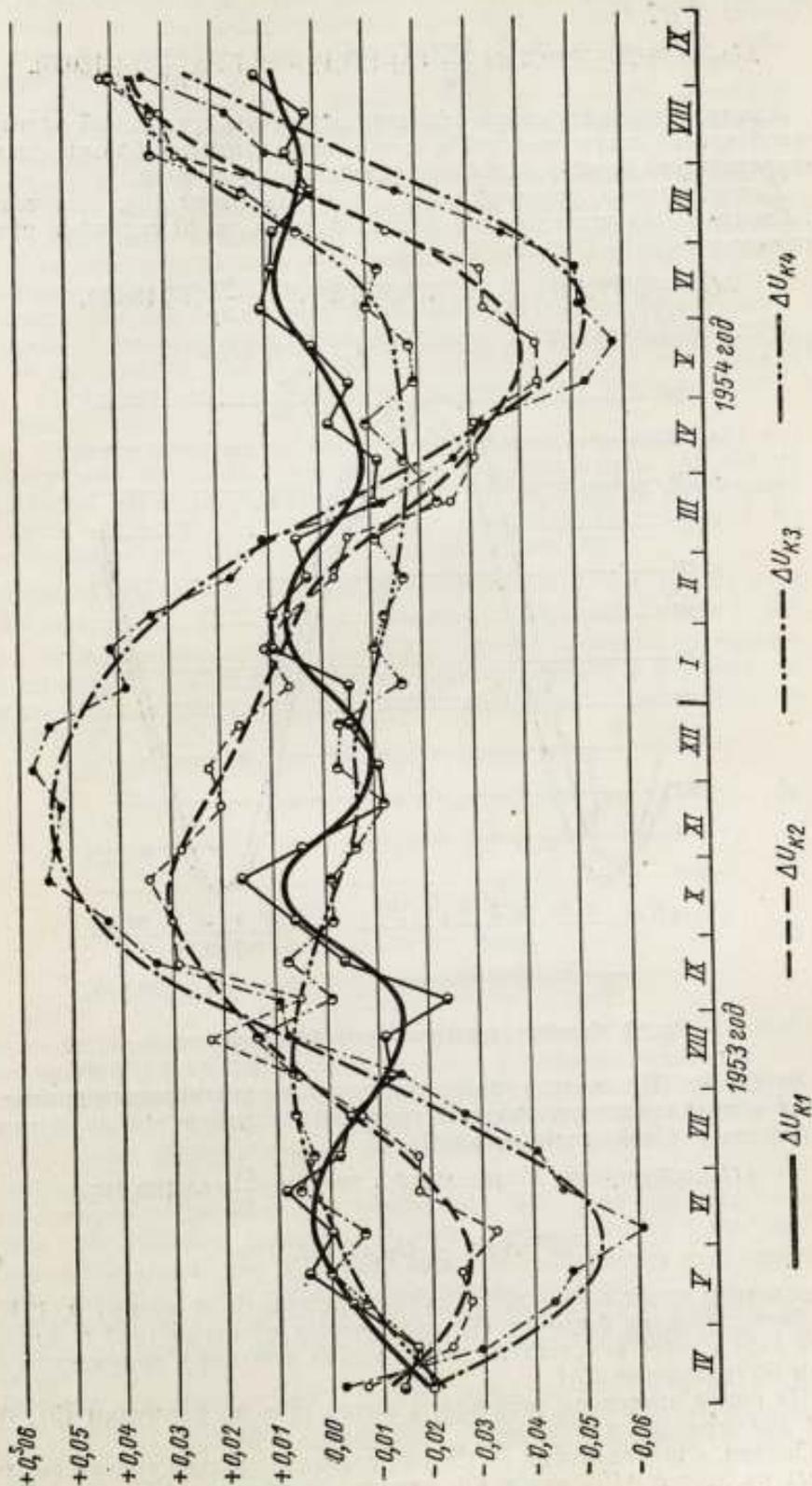


Рис. 2. Разности наблюдаемых и вычисленных значений поправок кварцевых часов

С определенными по способу наименьших квадратов коэффициентами она имеет вид:

$$\Delta U_{\text{кз}} = 8^{ms}, 2 + 53^{ms}, 2 \sin \frac{2\pi}{365} (t + 123,1) + 8^{ms}, 7 \sin \frac{4\pi}{365} (t + 160,8). \quad (5)$$

Средняя квадратическая величина остаточных уклонений от выравненной кривой составляет $\pm 6^{ms}, 4$; это лишь немногим больше средней квадратической ошибки отдельной осредненной поправки.

Сопоставление уравнения (5) с уравнением (6), полученным Н. Стойко [1] из исследования ходов 38 часов за 40 годичных циклов для периода 1934—1949 гг.

$$\Delta U = +55^{ms}, 1 \sin \frac{2\pi}{365} (t + 124,6) + 5^{ms}, 8 \sin \frac{4\pi}{365} (t + 156,2), \quad (6)$$

поражает превосходным согласием фаз и амплитуд.

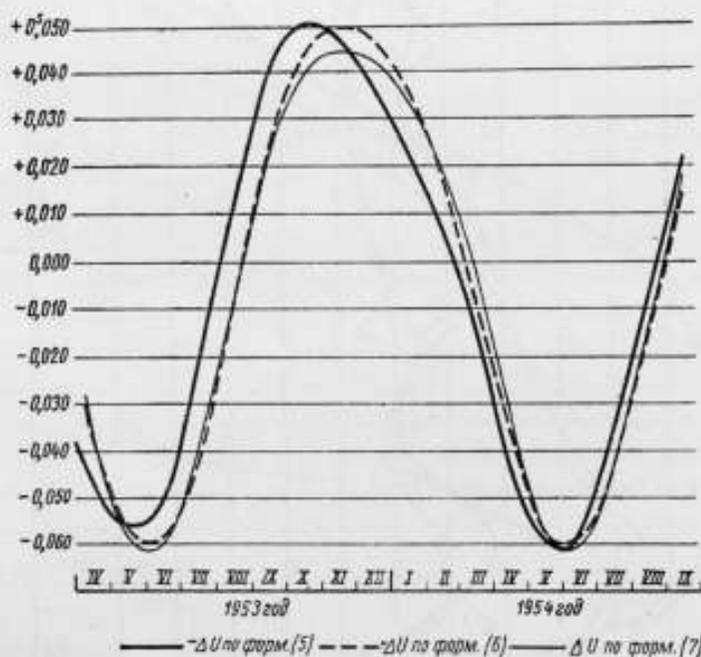


Рис. 3. Сезонная неравномерность показаний часов

Н. Стойко [2] выведено также уравнение неравномерности вращения Земли в предположении наличия годичной, полугодовой и 14-месячной (чандлеровской) составляющей:

$$\Delta U = +33^{ms}, 6 \cdot \sin \frac{2\pi}{365} (t + 137,7) + 8^{ms}, 9 \sin \frac{4\pi}{365} (t + 159,2) + 20^{ms}, 4 \sin \frac{2\pi}{426} (t_{47,0} + 162,3) \quad (7)$$

(в последнем члене $t_{47,0}$ — число суток, протекших от января 0, 1947).

Вычисление по формуле (7) для периода с апреля 1953 г. по сентябрь 1954 г. дает результаты, также весьма близкие к полученным по часам КЗ [уравнение (5)].

На рис. 3 приведены результаты вычисления по формулам (5), (6) и (7) для периода с апреля 1953 г. по сентябрь 1954 г.

Однако, с результатами Н. Стойко совпадает только кривая выравненных разностей $\Delta U_{\text{кз}}$ часов КЗ; характер изменения ΔU часов К1 и

К4 ничего общего не имеет с уравнениями (5), (6) и (7), а кривая выравненных разностей ΔU_{2k} имеет вдвое меньшую амплитуду, чем у часов К3. Между тем, вариации суточного хода всех четырех часов почти одинаковы: вычисленные по формулам Ванаха-Прейпича они составляют $0^{ms},3-0^{ms},4$.

В поисках объяснения этого явления были подвергнуты изучению условия эксплуатации часов и исследованы температурные условия и режимы питания их генераторов.

Температура во внутренних термостатах генераторов измеряется ежедневно с помощью моста сопротивлений с формальной точностью $0,001^\circ\text{C}$. Точно также каждый день регистрируются стабилизированные напряжения анодного питания — с точностью до $0,1 \text{ в}$ и стабилизированные напряжения накала ламп генераторов — с точностью до $0,001 \text{ в}$.

Для исследования зависимости ходов часов от температуры и напряжений были привлечены результаты интегральных сравнений основных частот их генераторов. По числу биений основных частот генераторов (60 кгц) относительные суточные ходы сравниваемых часов определяются с ошибкой не более $\pm 0^{ms},02$.

Для каждого последовательного 30-суточного интервала были вычислены средние значения относительных суточных ходов каждых из часов с ходом часов К3, средние значения температур во внутренних термостатах и средние значения анодных напряжений; для часов К1 и К3 кроме того — средние значения напряжений накала.

На рис. 4 приведены графики относительных ходов (g_{1-3} , g_{2-3} , g_{4-3}), температур (T_1 , T_2 , T_3 и T_4), анодных напряжений (V_1^a , V_2^a , V_3^a и V_4^a) и напряжений накала (V_1^n и V_3^n) после исключения систематических изменений. Последние в относительных ходах и в анодных напряжениях были определены аналитически и представлены уравнениями (8) и (9):

$$\left. \begin{aligned} g_{1-3} &= -2^{ms},80 + 0^{ms},0059t + 0^{ms},0000077t^2 \\ g_{2-3} &= -1^{ms},19 + 0^{ms},0083t + 0^{ms},0000053t^2 \\ g_{4-3} &= -6^{ms},41 - 0^{ms},0218t + 0^{ms},0000111t^2 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} V_1^a &= 70^b,02 + 0^b,0017t + 0^b,0000045t^2 \\ V_2^a &= 69^b,00 - 0^b,0004t + 0^b,0000086t^2 \\ V_4^a &= 65^b,32 + 0^b,0035t + 0^b,0000061t^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Из сопоставления графиков относительных ходов каждых из часов с ходом часов К3 и графиков режима часов К3 можно заключить, что периодические изменения, которые явно обнаруживаются в относительных ходах, не могут быть объяснены изменением режима часов К3: ни в изменениях температуры T_3 , ни в изменениях напряжений V_3^a и V_3^n не обнаруживается корреляция с изменениями относительных ходов. Это заключение подтверждается графиками рис. 5, на которых представлены относительные ходы g_{2-3} и g_{4-3} , температура T_3 и напряжение накала V_3^n для одного из периодов, когда температура и напряжение накала часов К3 претерпевали особо резкие изменения.

Таким образом, можно считать, что на ход часов К3 изменения температуры и напряжений ощутимого влияния в исследуемый период не оказывали.

Наоборот, изменения относительных ходов g_{1-3} , g_{2-3} и g_{4-3} , как видно из графика (рис. 4), явно коррелируют с изменениями анодных напряжений часов К1, К2 и К4. Корреляции с изменениями температуры этих часов не обнаруживается.

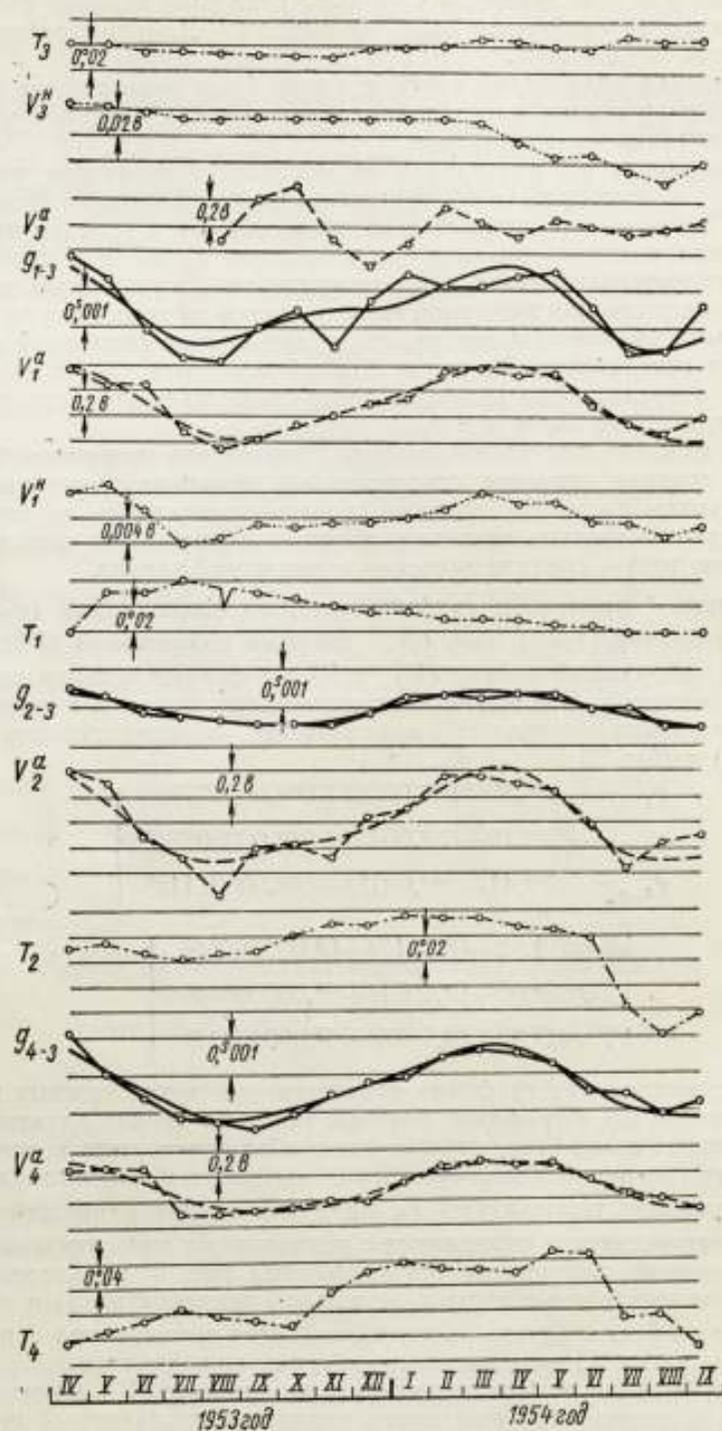


Рис. 4. Относительные хода кварцевых часов и значения температуры термостата, напряжения питания накала нити и анода ламп генераторов

Для часов К1 имелись данные об изменении напряжений накала V_1^H . Соответствующий график на рис. 4 очень сходен с графиком изменения анодного напряжения этих часов, что вполне объяснимо: причина периодических изменений анодного напряжения и напряжения накала общая — это изменение напряжения и частоты сети переменного тока, подзаряжающей аккумуляторные батареи анодного напряжения и напряжения накала. Разделить влияния этих двух факторов не представляется возможным, и для дальнейшего условно принято, что на ходы часов влияет только изменение анодного напряжения.

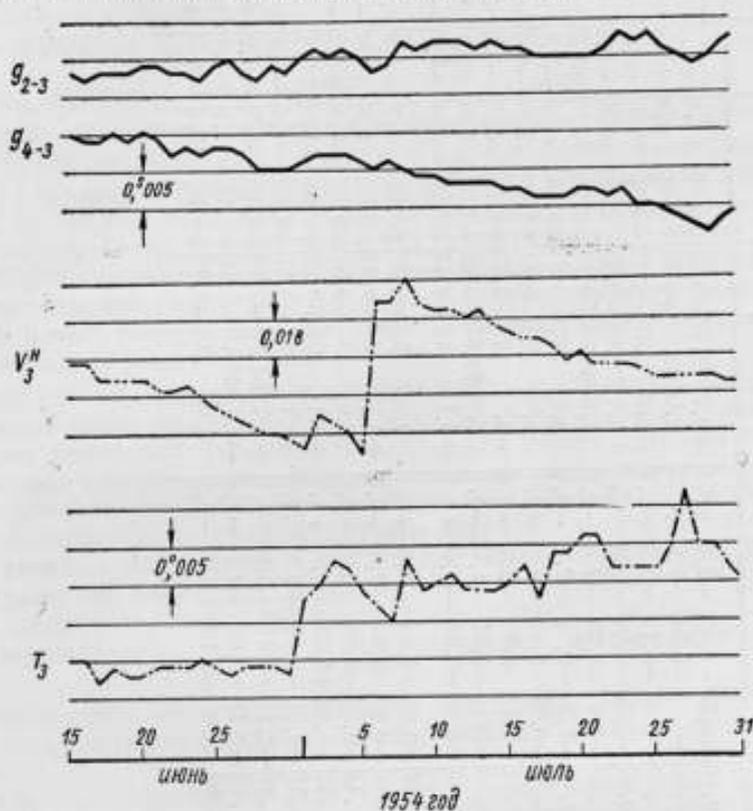


Рис. 5. Относительные ходы кварцевых часов и значения температуры термостата, напряжения питания накала нити и анода ламп генератора часов К3 для периода с резким изменением температуры и напряжения накала

На рис. 4 плавными линиями показаны сглаженные кривые относительных ходов и анодных напряжений. Ниже приведены аналитические выражения их, полученные по способу наименьших квадратов.

$$\left. \begin{aligned}
 g_{1-3} &= +0^{ms},07 + 0^{ms},90 \sin \frac{2\pi}{365} (t+28,8) + 0^{ms},42 \sin \frac{4\pi}{365} (t+125,3) \\
 &\quad \pm 0,18 \quad \quad \quad \pm 9,1 \quad \pm 0,18 \quad \quad \quad \pm 3,8 \\
 g_{2-3} &= +0^{ms},01 + 0^{ms},46 \sin \frac{2\pi}{365} (t+10,3) + 0^{ms},03 \sin \frac{4\pi}{365} (t+9,9) \\
 &\quad \pm 0,04 \quad \quad \quad \pm 2,4 \quad \pm 0,04 \quad \quad \quad \pm 2,1 \\
 g_{4-3} &= +0^{ms},06 + 0^{ms},94 \sin \frac{2\pi}{365} (t+22,4) + 0^{ms},16 \sin \frac{4\pi}{365} (t+129,7) \\
 &\quad \pm 0,08 \quad \quad \quad \pm 4,4 \quad \pm 0,08 \quad \quad \quad \pm 1,1
 \end{aligned} \right\} (10)$$

Начальная дата интервала	g_{1-3}	Δg_{1-3}	g'_{1-3}	ΔV_1^g	ΔV_1^g	V_1^g	Δg_{2-3}	Δg_{2-3}	Δg_{2-3}	V_2^g	ΔV_2^g	ΔV_2^g	V_2^g	Δg_{4-3}	Δg_{4-3}	V_4^g	ΔV_4^g	ΔV_4^g
1953, апрель 1	-2,4	+1,4	+0,3	70,16	+0,26	-0,05	-2,6	+0,5	+0,1	70,17	+0,41	+0,02	70,17	+1,8	+1,4	64,95	+0,14	-0,07
май 1	-3,0	+0,8	+0,3	,03	+0,15	-0,04	-2,6	+0,3	0,0	69,92	+0,31	+0,14	69,92	0,0	+0,4	,99	+0,16	+0,02
май 31	-4,2	-0,5	-0,2	,00	+0,13	+0,13	-2,8	-0,1	-0,2	,37	-0,11	-0,02	,37	-1,6	-0,3	65,00	+0,15	+0,11
июнь 30	-4,9	-1,3	-0,4	69,65	-0,22	-0,04	-2,7	-0,2	-0,1	,09	-0,27	0,00	,09	-2,8	-0,8	64,66	-0,22	-0,13
июль 30	-4,9	-1,4	-0,5	,52	-0,35	-0,07	-2,6	-0,3	0,0	68,70	-0,57	-0,25	68,70	-3,7	-0,9	,71	-0,21	-0,04
август 29	-3,9	-0,5	+0,1	,60	-0,28	-0,01	-2,7	-0,4	0,0	,97	-0,21	+0,04	,97	-4,5	-1,1	,80	-0,18	+0,02
сентябрь 28	-3,4	-0,1	+0,1	,72	-0,18	+0,02	-2,3	-0,4	0,0	,94	-0,17	0,00	,94	-5,0	-0,7	,88	-0,16	+0,01
октябрь 28	-4,1	-1,0	-1,0	,83	-0,10	0,00	-2,1	-0,4	-0,1	,79	-0,27	-0,15	,79	-5,2	-0,2	65,01	-0,11	+0,02
ноябрь 27	-2,8	+0,2	+0,2	,95	-0,01	-0,01	-1,6	-0,1	0,0	69,07	+0,05	+0,02	69,07	-5,6	+0,1	,11	-0,10	-0,06
декабрь 27	-1,9	+0,9	+0,7	70,06	+0,04	-0,05	-0,9	+0,3	+0,1	,12	+0,12	+0,01	,12	-6,0	+0,3	,35	+0,05	+0,01
1954, январь 26	-2,0	+0,6	-0,1	,32	+0,25	+0,04	-0,6	+0,4	0,0	,36	+0,37	+0,09	,36	-6,2	+0,8	,59	+0,17	+0,05
февраль 25	-1,8	+0,6	-0,5	,41	+0,28	-0,03	-0,4	+0,3	-0,2	,37	+0,37	-0,07	,37	-6,6	+1,0	,75	+0,21	+0,02
март 27	-1,3	+0,9	-0,3	,43	+0,23	-0,09	0,0	+0,4	0,0	,34	+0,32	-0,10	,34	-7,3	+0,9	,86	+0,19	-0,02
апрель 26	-1,0	+1,0	+0,3	,52	+0,24	+0,02	+0,3	+0,4	+0,1	,31	+0,25	+0,03	,31	-8,2	+0,6	,99	+0,18	-0,02
май 26	-1,7	+0,1	+0,3	,37	+0,01	-0,03	+0,2	0,0	-0,1	,11	-0,01	+0,01	,11	-9,4	-0,1	66,01	+0,06	0,00
июнь 25	-2,6	-1,1	-0,2	,31	-0,14	+0,01	+0,5	+0,1	+0,2	68,83	-0,35	-0,10	68,83	-10,0	-0,2	,07	-0,06	+0,01
июль 25	-2,3	-1,0	0,0	,33	-0,23	+0,03	+0,4	-0,4	-0,1	69,12	-0,15	+0,16	69,12	-11,1	-0,7	,20	-0,10	+0,06
август 24	-0,8	+0,2	+0,9	,59	-0,08	+0,19	+0,7	-0,4	0,0	,28	-0,09	+0,18	,28	-11,4	-0,5	,32	-0,17	0,00

$$\begin{aligned}
 V_1^a &= +0^{\circ},01 + 0^{\circ},29 \sin \frac{2\pi}{365} (t+16,8) + 0^{\circ},05 \sin \frac{4\pi}{365} (t+115,8) \\
 &\quad \pm 0,03 \quad \pm 1,8 \quad \pm 0,03 \quad \pm 1,1 \\
 V_2^a &= +0^{\circ},02 + 0^{\circ},35 \sin \frac{2\pi}{365} (t+22,8) + 0^{\circ},10 \sin \frac{4\pi}{365} (t+134,8) \\
 &\quad \pm 0,04 \quad \pm 2,2 \quad \pm 0,04 \quad \pm 0,2 \\
 V_4^a &= +0^{\circ},20 \sin \frac{2\pi}{365} (t+6,9) + 0^{\circ},02 \sin \frac{4\pi}{365} (t+111,9) \\
 &\quad \pm 0,02 \quad \pm 1,2 \quad \pm 0,02 \quad \pm 1,1
 \end{aligned} \tag{11}$$

В таблице приведены средние за 30-суточный интервал значения относительных ходов g_{1-3} , g_{2-3} и g_{4-3} и анодных напряжений V_1^a , V_2^a и V_4^a , периодические изменения их Δg и ΔV , полученные после исключения систематических изменений, вычисленных по формулам (8) и (9), а также случайные отклонения $\Delta'g$ и $\Delta'V$, полученные после исключения периодических изменений, вычисленных по формулам (10) и (11).

Из сопоставления амплитуд годовых составляющих в уравнениях (10) и (11) может быть определена степень влияния изменения анодного напряжения на ходы кварцевых часов.

После этого можно было бы исключить влияние изменения напряжения на ходы часов К1, К2 и К4. Однако результаты последующего выравнивания ходов или поправок этих часов, с нашей точки зрения, не представляют интереса: поскольку зависимость ходов часов К1, К2 и К4 от напряжения установлена из сопоставления относительных ходов этих часов и часов К3, то выводы, которые были бы получены из анализа исправленных ходов часов К1, К2 и К4 имели бы вес не больше, чем вес результатов, полученных по одним лишь часам К3.

Такое исправление имело бы смысл в том случае, если бы степень влияния напряжения на ход часов была получена независимым способом.

Из приведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Из четырех исследованных часов лучшими часами являются часы К3.

2. Изменения напряжения питания генераторов кварцевых часов могут иметь периодический характер и вызывать периодические изменения ходов кварцевых часов.

3. Кварцевые часы, которые предполагается использовать для исследования каких-либо тонких эффектов, например, неравномерности вращения Земли, должны быть тщательно изучены в отношении влияния местных внешних факторов (режимов питания и др.) на их ход. Для таких исследований целесообразно использовать часы, питаемые от независимых энергосистем.

В заключение автор приносит благодарность кандидату физико-математических наук Л. Д. Брызжеву и М. Д. Сопельникову за любезно предоставленные материалы, использованные в настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. N. Stoyko. Les corrections saisonnières de la rotation de la Terre. Bulletin Horaire du B.J.H., Janvier—Avril 1951, (serie 3), 1—3.
2. A. Stoyko and N. Stoyko. Les variations Périodiques de la Terre pendant les années 1947—1952. Acad. Roy. Beligique Bull. cl. sci., 1953, 39, №6, ser. 5, 543—551.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ЧАСЫ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА

Говоря о преимуществах и недостатках маятниковых астрономических часов, о их точности, всегда имеют в виду известные часы Шорта, конструкция которых предложена около полувека назад в Англии. Среднеквадратическая вариация их суточного хода составляла в то время величину в 2—3 миллисекунды в сутки. Почти на этом же уровне она осталась и в наши дни.

Многочисленные попытки улучшить часы Шорта, предпринимавшиеся в разное время в разных местах, не увенчались успехом. В итоге

возникло ошибочное представление о том, что результат, достигнутый Шортом, является пределом точности маятниковых часов вообще а следовательно, маятниковые часы как часы-хранители времени отжили свой век, так как их точность повысить невозможно, а достигнутая точность недостаточна.

Для объяснения одной из причин неудач, постигших конструкторов, пытавшихся улучшить часы Шорта, рассмотрим график (рис. 1).

Значение T кривой 2 соответствует периоду колебаний изолированного маятника при минимальной амплитуде его колебаний. Эта кривая показывает их неизохронность, обусловленную зависимостью:

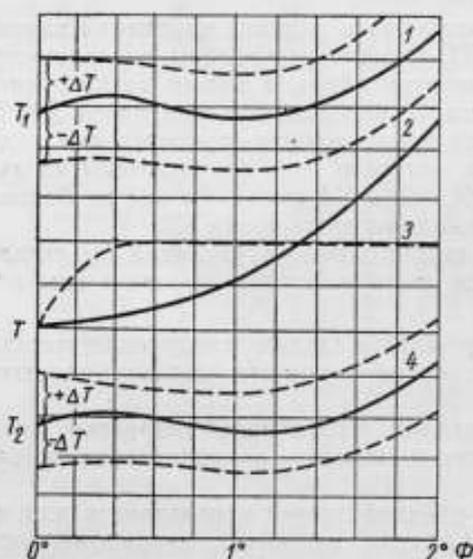


Рис. 1. Зависимость периода колебаний маятника от амплитуды

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{k} \left(1 + \frac{\Phi^2}{4} + \frac{11\Phi^4}{3072} + \dots \right)},$$

где:

I — момент инерции маятника относительно оси его вращения;

k — статический момент маятника;

Φ — амплитуда колебаний маятника в радианах.

Очевидно также, что значение периода колебаний изолированного маятника T для данной амплитуды — есть величина довольно постоянная, так как обусловлена, главным образом, геометрическими размерами элементов маятника.

В часах маятник применяется не в изолированном виде, а в сопряжении с ходом, т. е. механизмом, поддерживающим амплитуду его колебаний. Период маятника, сопряженного с ходом, приобретает новье

значение T_1 или T_2 в зависимости от системы хода. У часов Шорта $T_1 > T$, у часов Рифлера $T_2 < T$. Величину разности $T_1 - T$ или $T - T_2$ следовало бы принять за характеристику качества часов. Чем меньше эта разность, тем точнее часы, и наоборот. Совершенствование часов (от часов с несвободным ходом до часов с хронометровым ходом) шло по пути уменьшения разности $T_1 - T$. Можно ли величину этой разности свести к нулю?

Теорема Эри гласит, что короткий положительный импульс, подающийся маятнику после положения равновесия, увеличивает, а до положения равновесия уменьшает его период, причем чем дальше от положения равновесия, тем больше его влияние на период, и наоборот. Короткий импульс, подающийся маятнику в момент прохождения им положения равновесия, не оказывает заметного влияния на период его колебаний. Если маятник с периодом колебаний T сочленить с механизмом, подающим ему короткие импульсы строго в момент прохождения им положения равновесия, получим часы, в которых разность $T_1 - T$ близка к нулю. Если бы была возможность поддерживать амплитуду колебаний маятника таких часов всегда на одном и том же уровне, они имели бы очень высокую точность хода.

В реальных условиях этого сделать невозможно. Величина амплитуды всегда колеблется вокруг какого-то среднего ее значения, причем с неопределенным периодом. Изменение же амплитуды колебаний маятника в 10—15 мк на его конце приводит к изменению хода часов в 2—3 миллисекунды в сутки. Точность хода таких часов будет ограничена неизохронностью колебаний их маятника.

Если импульс подавать маятнику далеко от положения его равновесия, то влияние его на период будет изменяться с изменением амплитуды колебаний маятника. С увеличением амплитуды влияние импульса будет уменьшаться, с уменьшением — увеличиваться, т. е. изменения периода колебаний маятника часов за счет их механизма противоположны по знаку амплитудным его изменениям. Таким образом, можно получить зависимость периода колебаний маятника, сопряженного с ходом, от амплитуды его колебаний, изображенную кривыми 1 и 4 (рис. 1), т. е. можно добиться некоторой изохронности колебаний маятника часов.

По такому пути уменьшения неизохронности колебаний маятника часов на протяжении многих десятков лет шли авторы различных систем маятниковых часов, в том числе и Шорт. В часах Шорта разность $T_1 - T$ имеет минимальное значение, и дальнейшее ее уменьшение привело бы к ухудшению изохронности колебаний маятника, полученной за счет импульсного механизма часов. Точность хода часов Шорта ограничена наличием разности $T_1 - T$, в которой имеется элемент непостоянства, связанный с кулоновским трением в механизме передачи импульса маятнику*. Непостоянство этого трения, особенно при затяжном и удаленном от положения равновесия импульсе, приводит к изменению периода колебаний маятника на величину $\pm \Delta T$. Кроме того, оно меняет характер кривой изохронизма, что также влечет за собой изменение периода колебаний маятника часов с изменением его амплитуды. Таким образом источник погрешностей часов Шорта обусловлен их конструкцией и уменьшить его невозможно, так как с уменьшением связи маятника с механизмом, увеличивается неизохронность его колебаний. С увеличением этой связи улучшается изохронизм, зато увеличивается элемент непостоянства, связанный с трением. В том и другом случае снижается точность хода часов.

Автор пошел по пути создания принципиально новой конструкции маятниковых астрономических часов, т. е. часов, у которых разность

* Речь идет о свободном маятнике часов Шорта.

$T_1 - T$ была бы близка к нулю, а колебания их изолированного маятника были бы изохронными.

Был найден удовлетворительный способ изохронизации колебаний изолированного маятника за счет его пружинного подвеса [4, 5]. Период колебаний изолированного маятника на изохронизирующем подвесе, так же как и на обычном подвесе, определяется, главным образом, геометрическими размерами его элементов. Изохронизация осуществляется за счет упругих свойств добавочной пружины подвеса, при

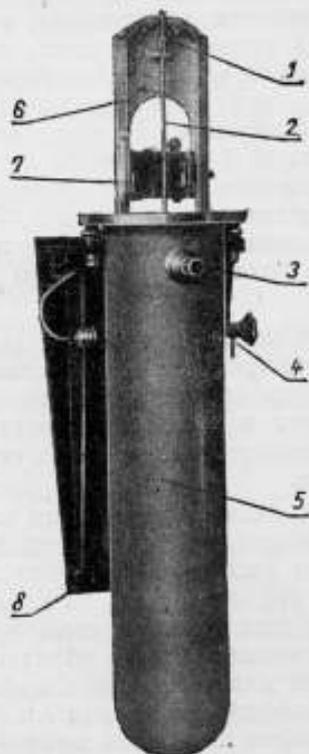


Рис. 2. Часы АЧФ-1:

1 — изохронизирующий маятниковый подвес; 2 — маятник; 3 — микроскоп для наблюдений за амплитудой; 4 — вакуумный вентиль; 5 — барокамера; 6 — подвесной крошфейн; 7 — механизм часов; 8 — стальной крошфейн



Рис. 3. Часы АЧФ-2

этом возможность возникновения кулоновского трения полностью исключена. Зависимость периода колебаний маятника на изохронизирующем подвесе от амплитуды изображена кривой 3 (рис. 1). В рабочем интервале амплитуд ($1-2^\circ$) период колебаний маятника практически не зависит от их амплитуды. Конструкция подвеса позволяет производить его настройку до необходимой степени изохронизма.

Первый экземпляр новых маятниковых астрономических часов АЧФ-1 (рис. 2) был построен в 1954 году [5, 6]. Сопряжение изохронизированного маятника с импульсным механизмом, подающим ему короткие односторонние импульсы, начало которых определяется самим маятником, позволило впервые осуществить аналог хронометрового хода для маятниковых часов, обеспечивающий наилучшие условия работы регулятора, следовательно, и наивысшую точность хода часов. Исследования показали, что точность хода часов новой конструкции, при их простоте, выше точности хода часов Шорта [5]: среднеквадратическая вариация их суточного хода лежит в пределах одной миллисекунды в сутки. Они мало чувствительны к сотрясениям и сокачаниям,

так как период колебаний их маятника практически не зависит от возможных при этом изменений амплитуды. Наличие некоторого трения в механизме передачи импульса может воздействовать только на амплитуду колебаний маятника, не оказывая воздействия на его период.

Дальнейшие работы велись по пути усовершенствования созданной конструкции часов. В 1956 году были построены часы АЧФ-2 (рис. 3), отличающиеся от АЧФ-1 расположением механизма и конструкцией маятника. В АЧФ-1 механизм расположен в верхней части маятника, в АЧФ-2 он опущен вплотную к грузу. Этим удалось устранить вибрацию штанги маятника в момент передачи импульса и сократить продолжительность импульса. Термокомпенсатор перенесен в груз маятника, который имеет продольные сквозные вырезы, обеспечивающие омывание воздухом термокомпенсационной трубки. Этим удалось осуществить малоинерционную термокомпенсацию при цельной штанге. Средняя квадратическая вариация суточного хода этих часов оказалась меньше одной миллисекунды в сутки.

К настоящему времени закончены работы по созданию одномаятниковых астрономических часов АЧФ-3 (рис. 4) с электромагнитным возбуждением колебаний маятника, электронная схема которого собрана на кристаллических триодах.

Преимущества электромагнитного возбуждения перед механическим бесспорны, так как при его применении полностью устраняются кулоновское трение и трущиеся, а следовательно, изнашивающиеся детали механизма. Предельно простой становится конструкция часов. Создается возможность еще сократить продолжительность импульса за счет совмещения во времени его положительной и отрицательной частей. В механической системе отрицательный импульс возникает при освобождении маятником импульсного рычага, т. е. предшествует положительному импульсу. В электромагнитной системе они накладываются друг на друга лишь с незначительным смещением.

Основным преимуществом часов с электромагнитным возбуждением является их высокая точность. Средняя квадратическая вариация суточного хода часов АЧФ-3 по сравнению с кварцевыми часами службы времени ВНИИФТРИ оказалась равной 0,22 миллисекунды в сутки или в относительном выражении $2-3 \cdot 10^{-9}$. Столь высокая точность для маятниковых часов получена впервые, и нет никаких оснований считать, что она является пределом, так как условия, в которых работали исследуемые часы, были далеко не идеальны.

Часы АЧФ-3 смонтированы в стальной барокамере, сверху и снизу закрывающейся стеклянными колпаками. Барокамера крепится к опоре при помощи жесткого чугуна кронштейна. Подвеска кронштейна осуществляется при помощи заделанных в опору крепких анкерных болтов, так, чтобы была полная гарантия монолитности соединения кронштейна с опорой. Такая конструкция крепления барокамеры к кронштейну позволяет производить необходимую регулировку при ее



Рис. 4 Маятниковые астрономические часы АЧФ-3 с электромагнитным возбуждением колебаний маятника

установке в вертикальное положение, а также обеспечивает достаточную жесткость соединения. Жесткость соединения часов с соответствующей опорой — необходимое условие точности и надежности их работы.

На верхнем фланце барокамеры установлен кронштейн, на котором при помощи изохронизирующего подвеса подвешен маятник часов. В верхней части этого кронштейна укреплена инварная штанга, опускающаяся параллельно штанге маятника и несущая на своем нижнем конце неподвижную часть импульсного механизма часов. Эта штанга проходит через пружинящую цапгу, укрепленную на нижнем фланце барокамеры. Подвижная часть импульсного механизма крепится на конце штанги маятника. Наличие двух штанг с одинаковыми коэффициентами теплового расширения обеспечивает постоянство зазоров между подвижной и неподвижной частями импульсного механизма, чем устраняется возможность изменения величины импульса с изменением температуры.



Рис. 5. Маятник АЧФ-3

На одной из ножек кронштейна укреплен бароскоп, состоящий из ртутного и масляного манометров. На задней стенке кронштейна укреплен арретирующий механизм, позволяющий плавно опускать маятник часов на подвес, а также неподвижная часть контактного устройства. Подвижная часть контактного устройства прикреплена к верхней части изохронизирующего подвеса. Оси вращения маятника и контакта совмещены для устранения трения между подвижной и неподвижной частями контакта. Контактрирование настраивается на положение равновесия маятника. Контакт предназначен для выдачи секундных сигналов во внешнюю цепь.

В верхней части барокамеры укреплен микроскоп для наблюдений за амплитудой колебаний маятника. Подсветка шкал микроскопа и маятника осуществляется при помощи системы зеркал за счет отраженного света. С правой стороны барокамеры расположен вакуумный вентиль. С левой стороны — панель разъема проводников, входящих внутрь барокамеры.

В рабочем состоянии часов давление внутри барокамеры не превышает 8—10 мм рт. ст. Источником питания часов служит сухой элемент с напряжением в 1—1,5 в. Величина потребляемого тока не превышает 0,2—0,3 миллиампера в импульсе продолжительностью 0,04 сек. Импульс подается маятнику один раз за период, т. е. за 2 сек.

Маятник часов двухсекундный (рис. 5). Штанга маятника инварная диаметром 10 мм. В верхней части штанга оканчивается плоским широким крючком, предназначенным для жесткого соединения с изохронизирующим подвесом. Ниже крючка на штанге имеется тонкий штифт, размыкающий при движении маятника контактное устройство часов. Еще ниже располагается шкала, которая служит для наблюдений за амплитудой колебаний маятника. Под шкалой располагается полочка для размещения регулировочных грузиков.

Груз маятника несколько необычной формы. Он имеет продольные сквозные вырезы, обнажающие штангу и термокомпенсационную латунную трубку. Термокомпенсационная трубка также имеет продольные сквозные вырезы, обнажающие штангу маятника. Во время движения маятника воздух циркулирует через эти вырезы, омывая штангу и термокомпенсационную трубку, выравнивая их температуру. Груз маятника опирается в центре его массы на теплоизоляционное кольцо, сделанное из плавленого кварца. Непосредственного металлического контакта между грузом маятника и остальными его деталями нет. Такая

конструкция маятника при цельной штанге позволила свести к минимуму его тепловую инерцию. Груз маятника медный, весом около 9 кг. Общий вес маятника 10 кг. На конце маятника при помощи конического штифта укреплен подвижная часть импульсного механизма часов. Маятник подвешен на изохронизирующем подвесе конструкции автора [4, 6].

Для возбуждения колебаний маятника АЧФ-3 разработан импульсный механизм электромагнитного действия (рис. 6), который в принципе является дальнейшим развитием импульсного механизма с механическим импульсом, примененного в АЧФ-1 и АЧФ-2. Общее у них — короткий односторонний импульс, подающийся маятнику в момент прохождения им положения равновесия, позволяющий вместе с изохронизирующим подвесом осуществлять хронометровый ход для маятниковых часов.

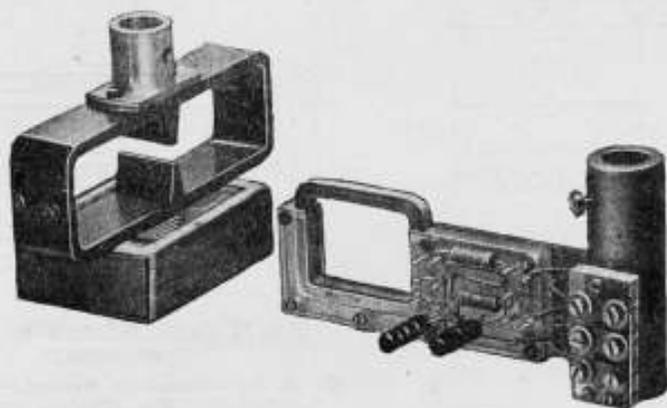


Рис. 6. Электромагнитный импульсный механизм. Слева — подвижная часть, справа — неподвижная часть.

Электромагнитный механизм состоит из двух частей: подвижной и неподвижной. Подвижная часть состоит из замкнутого симметричного магнитопровода и двух постоянных призматической формы магнитов из сплава магнито. Крепится она к нижнему концу штанги маятника. Для получения однородного концентрированного магнитного поля сходящиеся противоположные полюсы магнитов имеют толщину в 1—1,5 мм. Магнитопровод разборный. Нижняя его часть заводится в катушку и лишь после этого соединяется с верхней частью.

Неподвижная часть механизма состоит из прямоугольной катушки и электронной схемы. Схема смонтирована на плексигласовой пластинке, в специальном вырезе которой укреплен катушка. Катушка имеет две секции, располагающиеся одна над другой. Нижняя секция — возбуждающая, с нее снимается импульс и подается на вход усилителя. Верхняя секция — импульсная, на нее подается усиленный импульс с выхода усилителя. Усилитель собран на кристаллических триодах по схеме рис. 7. Монтаж схемы виден на фото (см. рис. 6).

Неподвижная часть механизма крепится на конце второй инварной штанги. Открытая часть катушки устанавливается при неподвижном маятнике между полюсами магнитов с одинаковыми зазорами. Принцип действия механизма показан на рис. 8. Здесь изображен момент, когда маятник движется от нас. Длинной стрелкой показан положительный токовый импульс, короткой — отрицательный, необходимый для срабатывания схемы, т. е. для возбуждения положительного импульса. Эти импульсы почти совмещены во времени, так как оба возникают в момент пересечения поля магнитов с проводниками катушки. Несколько раньше возникает отрицательный импульс, заканчиваются

же они одновременно. Взаимодействие магнитного поля катушки, определяемое величиной разности положительного и отрицательного токовых импульсов, с полем постоянных магнитов создает необходимый подталкивающий импульс. Механизм срабатывает лишь при движении маятника в одном направлении, поэтому импульсы, подаваемые маятнику, односторонние. Для установления необходимой амплитуды маятника сопротивление $1,2 \text{ к}$ (см. рис. 7) расположено вне барокамеры и подбирается после откочки часов.

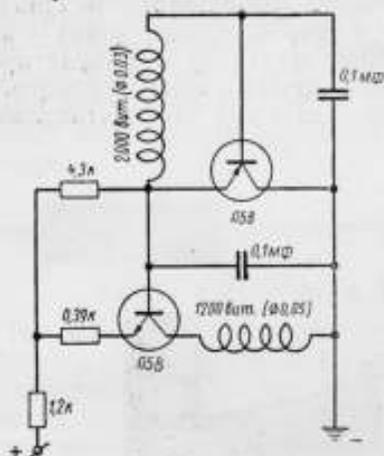


Рис. 7. Электронная схема импульсного механизма

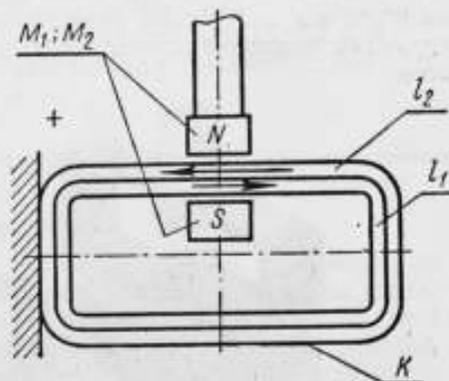


Рис. 8. Схема действия импульсного механизма:

M_1 и M_2 — постоянные магниты; K — катушка; L_1 — возбуждающая секция; L_2 — импульсная секция.

Маятниковые астрономические часы АЧФ-3 были установлены в экспериментальном часовом подвале института, глубина которого около 8 м. Температура в подвале менялась от 6°C (в апреле) до $8,6^\circ\text{C}$ (в октябре). Часы АЧФ-3 были запущены в середине июня и непрерывно работали до конца эксперимента, т. е. до конца года.

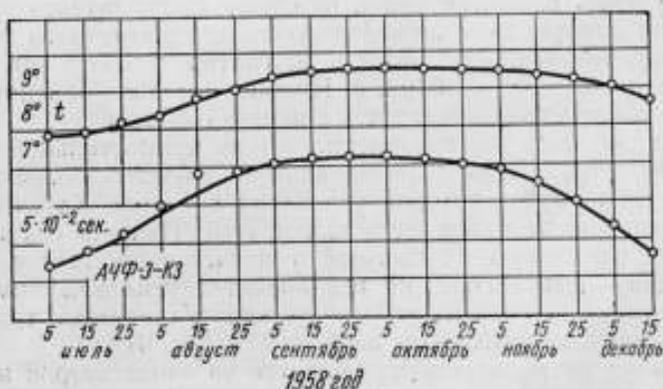


Рис. 9. Графики температуры экспериментального часового подвала ВНИИФТРИ и хода часов АЧФ-3.

Исследуемые часы ежедневно сличались с кварцевыми часами К2 и К3 службы времени ВНИИФТРИ в Москве. Для контроля сличения производились на службе времени в Москве — на осциллографе и во ВНИИФТРИ в Крюково — на искровом хроноскопе. Расстояние между пунктами сличения около 50 км. Сигналы часов передавались по телефонной линии в виде тональных посылок, частотой 1 000 гц.

Точность отсчета при сличениях на искровом хроноскопе 0,10 миллисекунды, на осциллографе 0,05 миллисекунды.

На графике (рис. 9) нанесены изменения температуры подвала и ход исследуемых часов за время их работы с июля по декабрь 1958 г. Отложены суточные ходы часов на 5, 15 и 25 числа каждого месяца.

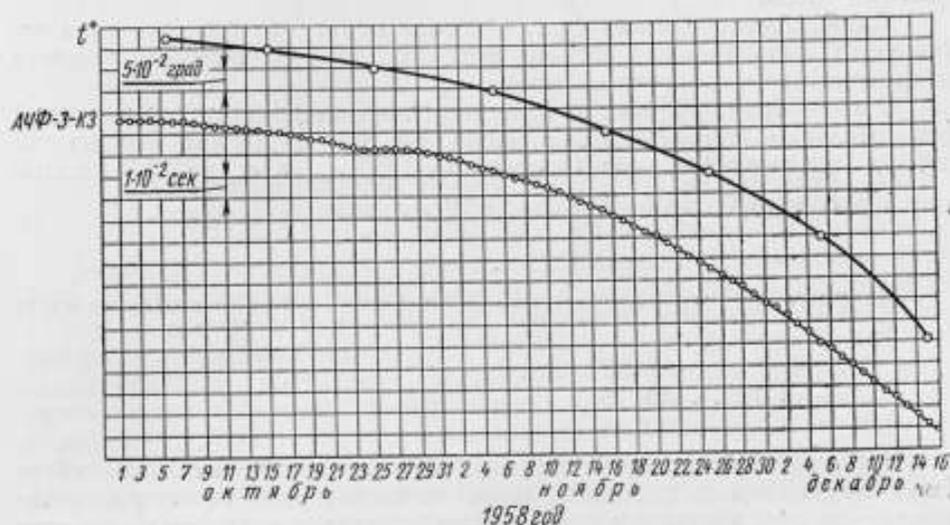


Рис. 10. График суточного хода часов АЧФ-3 и температуры экспериментального часового подвала ВНИИФТРИ

Если сопоставить кривую хода и температуры, то увидим, что ход часов следует за изменениями температуры подвала. Максимальная температура в подвале была в конце сентября и в начале октября. В это же время наблюдался и самый большой ход часов. Наличие систематического изменения хода объясняется тем, что часы в то время имели завышенный температурный коэффициент около $0,18 \text{ сек/сут} \cdot \text{град}$. Ходы часов 5 и 15 августа располагаются над кривой, что связано с проводившимися в это время в подвале работами по настройке других часов.

Более детально температурная зависимость хода исследуемых часов представлена на графике (рис. 10), где даны суточные ходы часов АЧФ-3 по отношению к кварцевым часам К3.

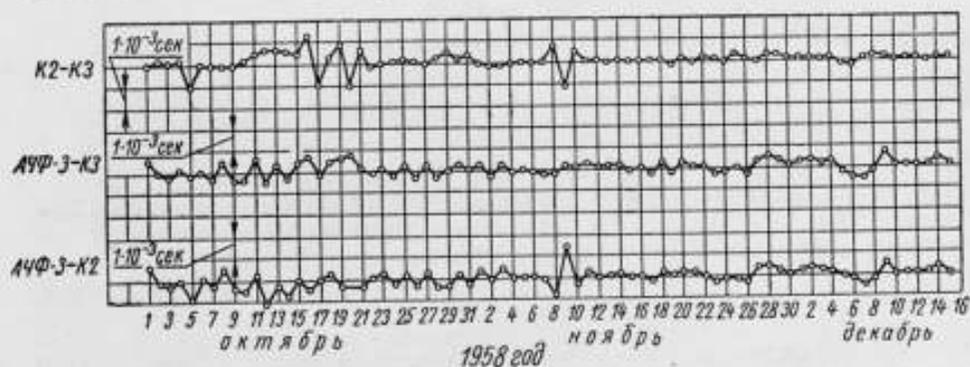


Рис. 11. Графики относительных ходов кварцевых и маятниковых часов после исключения систематических изменений хода

Верхняя кривая — изменение температуры подвала; нижняя — изменение хода часов. График охватывает период в 2,5 месяца.

На графиках (рис. 11) отложены за тот же период времени относительные суточные ходы кварцевых часов К2 и К3 службы времени

ВНИИФТРИ (верхняя кривая) и исследуемых маятниковых часов с кварцевыми К2 и К3 (нижние кривые). Для наглядности эти графики сделаны в еще более крупном масштабе с исключением систематических изменений часов. В этом масштабе (один сантиметр — одна миллисекунда) становятся заметными вариации как кварцевых, так и маятниковых часов.

Сопоставление кривых (рис. 11) показывает, что точность хода исследуемых маятниковых астрономических часов не уступает точности кварцевых часов среднего качества.

Исходя из полученных значений средних квадратических вариаций относительных суточных ходов часов К2, К3 и АЧФ-3, взятых за период с 1 октября по 15 декабря 1958 г., т. е. за 2,5 месяца,

для пары часов АЧФ-3 и К3 . . . 0,28 мсек/сут
 » » » АЧФ-3 и К2 . . . ±0,40 »
 » » » К2 и К3 . . . ±0,38 »

Находим средние квадратические вариации суточного хода каждых часов:

АЧФ-3 . . . ±0,22 мсек/сут
 К3 . . . ±0,18 »
 К2 . . . ±0,34 »

При определении значений вариаций относительные ходы часов были исправлены за систематическое изменение хода часов: у маятниковых — за счет изменения температуры подвала, у кварцевых — за счет старения кварца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. П. Шишелов. Механика часового механизма. Кубуч, 1935.
2. З. М. Аксельрод. Часовые механизмы. Машгиз, 1947.
3. З. М. Аксельрод. Электромеханические часы. Машгиз, 1952.
4. Ф. М. Федченко. Об изохронизации колебаний маятника. Труды ВНИИФТРИ «Измерение времени», Стандартгиз, 1958.
5. Ф. М. Федченко. Астрономические часы с изохронизированным маятником АЧФ-1. Астрономический журнал № 34, 1957, 652.
6. Ф. М. Федченко. Одномаятниковые астрономические часы высокой точности. «Машиностроение и приборостроение», 1958, выпуск 8.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ СВОБОДНОГО МАЯТНИКА

Исследуя зависимость хода астрономических маятниковых часов АЧЭ от регулировки возбуждающего механизма, О. В. Тупицын [1] пришел к выводу о существовании зависимости между режимом возбуждения свободного маятника и температурным коэффициентом хода часов. Им было показано существование некоторого оптимума регулирования: температурный коэффициент часов становится минимальным и действительным в случае, когда воздействие импульса на фазу колебаний свободного маятника отсутствует. Аналитически и практически возможность такой регулировки возбуждающего механизма часов была доказана.

Не отрицая результатов, полученных О. В. Тупицыным [1], нами в 1953—1955 гг. была предпринята попытка рассмотреть вопрос «оптимальной» регулировки часового механизма с точки зрения ее зависимости от различных факторов, определяющих условия эксплуатации часов, а также с точки зрения устойчивости однажды достигнутого наиболее выгодного состояния [2].

Систему «свободный маятник» в динамическом отношении мы при этом считали не автоколебательной, а вынужденной, т. е. рабочему маятнику была отведена роль самостоятельных часов.

Уравнение движения неавтономной колебательной системы без трения имеет вид

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = M(t), \quad (1)$$

где момент

$$M(t) = \kappa f(t).$$

Решение этого уравнения при начальных условиях $t = 0, \varphi = A$

$$\varphi = A \cdot \cos \omega t + \frac{\kappa}{\omega} \int_{t_0}^t f(\xi) \sin \omega(t - \xi) d\xi. \quad (2)$$

Поставим задачу: найти условие, при котором приложение внешней распределенной во времени возбуждающей силы вида $f(t)$ не изменит фазы колебаний системы.

Рассмотрим состояние системы в момент $t = t_1$ окончания внешнего воздействия на систему.

$$f(t_1) = 0. \quad (3)$$

[$f(t_1 - \alpha) \neq 0$, α — любой, сколько угодно малый, промежуток времени]. В этот момент начнутся собственные колебания системы, описываемые уравнением

$$\ddot{\varphi} + \omega^2 \varphi = 0, \quad (4)$$

которое при принятых нами начальных условиях имеет решение

$$\varphi = A_1 \cos \omega t. \quad (5)$$

Здесь A_1 — новое, приращенное вследствие приложения внешнего воздействия, значение амплитуды колебаний.

Если условие синфазности выполняется, то φ и $\bar{\varphi}$, вычисленные из решений уравнений (2) и (5) для момента t_1 будут равны. Дифференцируя и приравнявая, приходим к выражениям:

$$-\Delta A \omega \sin \omega t_1 = \kappa \int_{t_0}^{t_1} f(\xi) \cos \omega (t_1 - \xi) d\xi, \quad (6)$$

$$-\Delta A \omega^2 \cos \omega t_1 = \kappa \int_{t_0}^{t_1} (t_1 - \xi) f(\xi) \sin \omega (t_1 - \xi) d\xi. \quad (7)$$

Естественно, что (6) и (7) должны удовлетворяться одновременно. Поделив (6) на (7), имеем

$$\int_{t_0}^{t_1} f(\xi) \cos \omega \xi d\xi = \frac{1}{\omega} f(t_1) \sin \omega t_1$$

или, обозначив переменную интегрирования через t и учтя (3), получим

$$\int_{t_0}^{t_1} f(t) \cos \omega t dt = 0. \quad (8)$$

Для системы с трением интеграл (8) примет вид

$$\int_{t_0}^{t_1} f(t) e^{st} \cos \omega t dt = 0. \quad (9)$$

В достаточности этого условия нетрудно убедиться, выполнив аналогичные преобразования для случая неравенства фаз колебаний системы до и после приложения к ней внешнего воздействия.

Полагая $f(t) = \cos t$, приходим к решению, приводимому Ролингом [4]. Если при этом возбуждающий импульс сообщается системе мгновенно, т. е. координаты системы в момент начала и окончания импульса совпадают ($\varphi_0 = \varphi_1 = \varphi$), решение приводит к известной теореме Эри [5]*.

Возможность практической реализации выражения (8) обусловлена аналитическим заданием функции $f(t)$, а также необходимостью указания моментов времени t_0 и t_1 , соответствующих началу и окончанию процесса восполнения энергии колебательной системы.

Используя дифференциальное уравнение собственного движения импульсного рычага возбуждающего механизма свободного маятника, а также уравнение, описывающее собственные колебания свободного маятника, нами было получено равенство, определяющее функцию $f(t)$, или, что то же, форму возбуждающего импульса.

В упрощенном виде эту функцию можно представить следующим выражением:

$$f = \frac{(\eta - R\varphi) mg \lambda}{\sqrt{r^2 - (\eta - R\varphi)^2} \cdot l} - \frac{I_p \omega^2 r^2}{I^p} \cdot \frac{R^2 (A^2 - \varphi^2) (\eta - R\varphi)}{[r^2 - (\eta - R\varphi)^2]^2}, \quad (10)$$

где: m — масса груза импульсного рычага;

g — ускорение силы тяжести;

λ — расстояние центра тяжести нагрузки импульсного рычага от оси его вращения;

l — расстояние от той же оси до рабочей грани импульсного камня;

r — радиус импульсного ролика;

I_p — момент инерции импульсного рычага относительно оси его вращения;

* Общее решение задачи Эри получено Ж. Хагом.

- ω — циклическая частота колебаний маятника;
 R — расстояние от оси вращения маятника до центра импульсного ролика;
 φ — угол отклонения маятника от положения равновесия;
 A — амплитудное значение угла φ ;
 η — регулировочный параметр — расстояние между вертикальной осью симметрии импульсного ролика и рабочей гранью импульсного камня при неподвижном маятнике, находящемся в нейтральном положении.

Графически результаты вычисления кривой $f(t)$ для одного частного случая представлены на рис. 1.

Та же временная зависимость была найдена экспериментальным способом. В качестве задающего элемента был использован кристалл сегнетовой соли, который деформировался положительным возбуждающим импульсом.

На рис. 2 изображена схема крепления кристалла на стержне свободного маятника. При отсутствии импульса кристалл A деформирован упорным винтом B подвеса импульсного ролика. Это деформированное

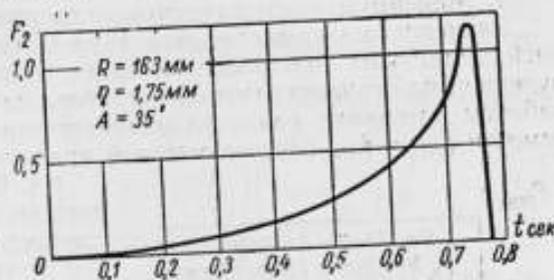


Рис. 1. Возбуждающий импульс в функции времени

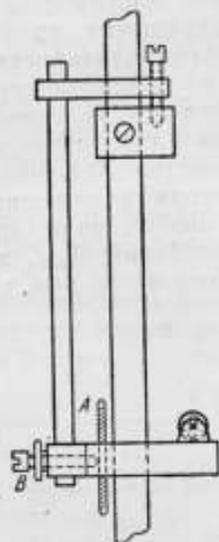


Рис. 2. Схема приспособления для получения эмпирическим путем значительной возбуждающей силы в функции времени

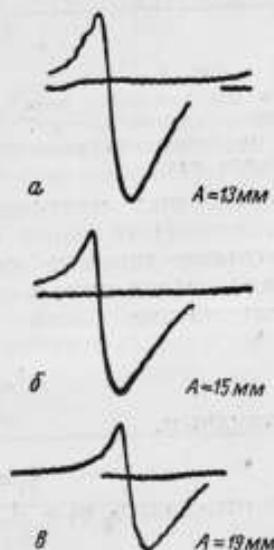


Рис. 3. Осциллограммы, характеризующие изменение возбуждающей силы во времени

состояние кристалла является нулевым. Сила, действующая на маятник в процессе возбуждения, будет иметь направление, противоположное силе, деформирующей кристалл. Поэтому в процессе импульса будет происходить уменьшение деформации кристалла, пропорциональное мгновенным значениям возбуждающей силы.

Не вдаваясь в радиотехнические тонкости эксперимента, приводим (в качестве примера) три осциллограммы, полученные в условиях син-

хронизации, при $\eta = 1,75$ мм, одинаковом положении нагрузки импульсного рычага и разных амплитудах колебаний свободного маятника (рис. 3). С целью уточнения результатов было получено около 70 фотографий возбуждающего импульса при различных условиях регулировки.

Анализ и сопоставление полученных кривых указывает на следующее:

1. Импульс начинается «мягко» — на кривых не виден момент соприкосновения импульсного рычага и ролика.

2. Максимум возбуждающей силы приходится на конец импульса.

Значение максимального возбуждающего усилия является функцией амплитуды колебаний маятника. Характер этой зависимости, полученной из осциллограмм, представлен на рис. 4 и в рассматриваемом рабочем интервале амплитуд является хорошим подтверждением зависимости $f_{\max} = f_{\max}(A)$, полученной аналитически из (10).

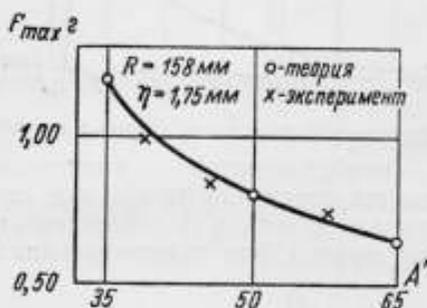


Рис. 4.

Значения максимального возбуждающего усилия в зависимости от амплитуды колебания маятника

Угол отклонения маятника от положения равновесия в момент времени t_1 , соответствующий окончанию возбуждения, представляет собой наименьшее значение амплитуды колебаний A_{\min} , при которой еще возможна работа импульсного механизма часов при данной регулировке. Соотношение

$$A_{\min} = \frac{r-\eta}{R}$$

является очевидным.

$$\varphi_1 = A \cos \omega t_1.$$

Как уже отмечалось, $\varphi_1 = A_{\min}$ и

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{r-\eta}{RA}. \quad (11)$$

Если обозначить амплитуду колебаний рабочего маятника через a , а угол отклонения его от нейтральной линии в момент окончания импульса (соответствующий моменту t_0 — начала возбуждения свободного маятника) через a_0 , то при смещении по фазе в условиях синхронизации одного маятника относительно другого на τ сек., можно получить выражение

$$\varphi_0 = A \frac{a_0}{a} \left[\cos \omega \tau + \frac{1}{a_0} (a^2 - a_0^2)^{1/2} \sin \omega \tau \right].$$

определяющее координату свободного маятника в момент начала его возбуждения.

Аналогично (11), момент времени

$$t_0 = \frac{1}{\omega} \arccos \frac{a_0}{a} \left[\cos \omega \tau + \frac{1}{a_0} (a^2 - a_0^2)^{1/2} \sin \omega \tau \right] \quad (12)$$

Сопоставление выражений (11) и (12) приводит к выводу о том, что момент окончания возбуждения свободного маятника определяется только регулировкой его механизма, а момент начала импульса связан с регулировкой механизма вторичных часов и разностью фаз колебаний маятников.

Эту разность фаз так же представляется возможным выразить через параметры, характеризующие регулировку механизма часов, доступные для непосредственных измерений.

Обозначая координату вторичного маятника в момент зацепления синхронизирующей пружины через a' , имеем

$$\tau = \frac{1}{\omega} \arccos \left\{ \frac{A_{\min} a'}{Aa} + \sqrt{\left(1 - \frac{A_{\min}^2}{A^2}\right) \left(1 - \frac{a'^2}{a^2}\right)} \right\} \quad (13)$$

В процессе регулировки вполне возможно достигнуть такого состояния, что зацепление синхронизирующей пружины будет происходить при прохождении рабочим маятником нейтрального положения ($a'=0$). Такая регулировка окажется наиболее выгодной как в кинематическом, так и в динамическом смысле. Что касается динамики, то в случае $a'=0$ достигается максимальная фазовая подгонка рабочего маятника, обусловленная только упругостью пружины и величиной a . С точки зрения кинематики такая регулировка приводит к

$$\tau = \frac{1}{\omega} \arcsin \frac{r-\eta}{RA} \quad (14)$$

указывающему на полную независимость относительного фазового смещения маятников от явно переменных условий эксплуатации рабочих часов. Все величины, входящие в (14), — суть параметры свободного маятника.

Интеграла (8) в совокупности с (10), (11) и (12) оказывается достаточным для исследования оптимальной регулировки свободного маятника.

В таблице приведены девять значений интеграла (8), полученных методом численного интегрирования при различных реально допустимых значениях A и η .

$$R = 163 \text{ мм} = \text{const}$$

$\eta, \text{ мм}$	Интеграл (8) τ -сек		
	$A=35'$	$A=50'$	$A=65'$
1,50	-0,110	-0,025	-0,003
1,75	-0,058	-0,006	+0,004
2,00	-0,022	+0,003	+0,008

График, построенный по результатам вычислений, приведен на рис. 5. Семейство кривых, представляющих значения интеграла для различных A в зависимости от регулировочного параметра, дает наглядное представление об оптимальной регулировке возбуждающего механизма свободного маятника. Условие (8), как видно, удовлетворяется для рабочего интервала амплитуд $50' - 65'$ значениями

$$+1,75 \text{ мм} < r_{\text{ном}} < +1,90 \text{ мм}.$$

Этот результат находит вполне надежное экспериментальное подтверждение в работе Тупицына [1]. Им приводятся значения $\eta_{опт}$ для различных экземпляров часов:

$$\begin{aligned} \text{АЧЭ-10} & \dots \eta_{опт} \approx +1,55 \text{ м.м.}; \\ \text{АЧЭ-7} & \dots \eta_{опт} \approx +1,87 \text{ "}; \\ \text{АЧЭ-9} & \dots \eta_{опт} \approx +1,75 \text{ "}. \end{aligned}$$

Полученный нами результат хорошо подтверждается и рекомендациями фирмы «Синхроном» по регулировке часов типа Шорта. Эти рекомендации содержат общее, стандартное значение регулировочного параметра для всех экземпляров часов

$$\eta_{опт} = 1\frac{3}{4} \text{ м.м.}$$

Рассмотрим более подробно график (рис. 5). Каждому значению амплитуды колебаний маятника соответствует только одно значение регулировочного параметра, приводящее к реализации условия (8).

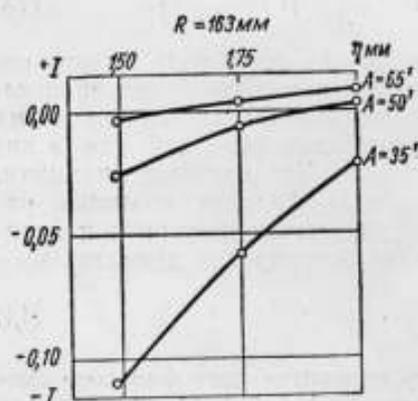


Рис. 5. Оптимальные значения регулировочного параметра в зависимости от амплитуды маятника

маятника, существующий наряду с непосредственной и прямой зависимостью $T = T(A)$.

Увеличение амплитуды, согласно этой зависимости, приводит к увеличению периода колебаний. Совместное влияние амплитудной и фазовой погрешностей на период колебаний маятника оказывается меньшим, чем воздействие одной из них (большей).

Выводы

1. В самом общем виде наиболее выгодная регулировка механизма возбуждения маятника определяется интегралом (9) или (8), которым можно пользоваться в случае высокой добротности колебательной системы. Это условие применимо и к случаю ударного возбуждения пьезокварца в прецизионных генераторах [8].

2. В частном случае (часы Шорта, АЧЭ) подинтегральная функция $f(t)$, характеризующая временной режим возбуждающей силы, определяется зависимостью (10), которая находит себе вполне удовлетворительное экспериментальное подтверждение.

3. Пределы интегрирования задаются выражениями (11) и (12), определяющими соответственно моменты окончания и начала возбуждающего импульса, как функции начальных условий и амплитуд колебаний маятников.

4. График $I = I(\eta \cdot A)$ приведенный на рис. 5, дает наглядное представление о возможностях достижения «оптимальной» регулировки возбуждающего механизма варьированием регулировочного параметра

ра и рабочего значения амплитуды колебаний свободного маятника. Справедливость выводов, получаемых при помощи этого графика, имеет многократные экспериментальные подтверждения.

5. Однажды достигнутое наиболее выгодное состояние системы не является устойчивым. Изменение внешних условий приводит к появлению не только амплитудной, но и фазовой погрешностей периода колебаний, имеющих противоположные знаки.

Ответа на вопрос, существует ли практическая возможность полной взаимной компенсации этих двух погрешностей периода, нами не получено.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. В. Тупицын. Исследование стабильности работы механизма часов со свободным и рабочим синхронизированным маятниками. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. МВТУ им. Баумана, Москва, 1953.
2. А. Г. Флеер. Теория импульсного возбуждения свободного маятника. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук. Государственный университет им. А. А. Жданова, Иркутск, 1956.
3. С. П. Стрелков. Введение в теорию колебаний. М.-Л. Гостехиздат, 1951.
4. A. L. Rowlings. The science of clocks and watches. Pitman publishing Corporation New-York-London, 1931.
5. З. И. Аксельрод. Часовые механизмы. Машгиз, 1947.
6. Л. П. Шишелов. Механика часового механизма, ч. 1. Л., 1931.
7. В. С. Габель. Метод ударного возбуждения затухающих колебаний в пьезокварце. Труды ВНИИМ, вып. 3 (45), Л., 1940, стр. 19.

ЭЛЕКТРОННАЯ СХЕМА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОДАЧИ СИГНАЛОВ ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ*

Введение

Для служб, подающих сигналы точного времени, а также для некоторых современных систем навигации, необходимы специальные приборы, передающие импульсы по заданной программе. В настоящее время передаются как секундные (60 сигналов в минуту), так и ритмические (61 сигнал в минуту) сигналы. К подобным установкам предъявляют требования, чтобы погрешность подачи от сигнала к сигналу в сеансе передачи не превышала 1—5 мксек [1]. При такой точности первичных сигналов можно проводить полноценные исследования времени распространения сигналов, поскольку погрешности распространения будут заведомо больше погрешностей сигналов. Кроме того, установки подачи сигналов должны обладать непрерывностью действия. Это требование может быть выполнено при использовании во всех ответственных цепях установки полупроводниковых приборов, способных надежно работать десятки тысяч часов. Возможно также, ограниченное применение радиоламп при существенно сниженных режимах, обеспечивающих повышение их долговечности и экономичности. Широкое применение полупроводников дает возможность существенно снизить потребляемые мощности, что позволяет легко резервировать питание установки в случае аварии силовой сети.

Обычно в подающих установках [2] сигналы получались либо механическим, либо фотомеханическим путем, т. е. путем прерывания вращающимся диском контакта или луча света. При таком способе была достигнута точность лишь в 100 мксек. Исходя из этого, в Иркутской лаборатории ВНИИФТРИ были созданы электронно-транзисторные схемы, вырабатывающие сигналы путем деления частоты эталонного генератора со 100 кГц до 1 Гц. При выборе типа делителей решено было использовать синхронизированные LC-генераторы на транзисторах для деления частоты со 100 до 1 кГц, а для деления с 1 кГц до 1 Гц — фантастроны. Эти делители несравненно проще универсальных пересчетных схем, содержат мало дефицитных деталей и при стабилизации режима питания имеют большую фазовую устойчивость.

Скелетная схема установки подачи сигналов

На рис. 1 представлена скелетная схема установки подачи сигналов (УПС). На входе УПС имеет фазовращатель частоты 100 кГц (блок А), который позволяет с общего пульта лаборатории установить необходимый момент подачи сигналов.

С фазовращателя (блок А) 100 кГц поступает на делители (блоки Б и В), которые дают 1000 и 1016, (6) Гц. Частота 1000 Гц поступает

* В работах по созданию схемы участвовали сотрудники Иркутской лаборатории ВНИИФТРИ А. М. Мороз, С. Х. Ярмолинский, Л. М. Маломыжев и В. И. Бурков.

на электронный делитель с коэффициентом деления 1000 (блок Г). Этот блок дает импульсы с частотой 100, 10 и 1 гц.

Частота 1016,(6) гц через фазовращатель Е поступает на блок Д. Фазовращатель Е необходим для первоначальной фазировки ритмических сигналов с секундными. Блок Д имеет коэффициент деления 1000 и выдает импульсы с частотой 101,(6) гц, 10, 1(6) гц и 1,01(6) гц.

Частоты 10 и 1 гц, а также 10,1(6) и 1,01(6) гц с блоков Г и Д подаются на блок Ж. Блок Ж формирует сигналы и, усилив их до требуемой амплитуды, подает на радиостанцию в виде отдельных посылок, наполненных частотой 2000 гц в случае подачи секунд. При подаче ритмических сигналов частота заполнения будет 2033,(3) гц. При необходимости частоты заполнения могут быть соответственно 1000 и 1016,(6) гц.

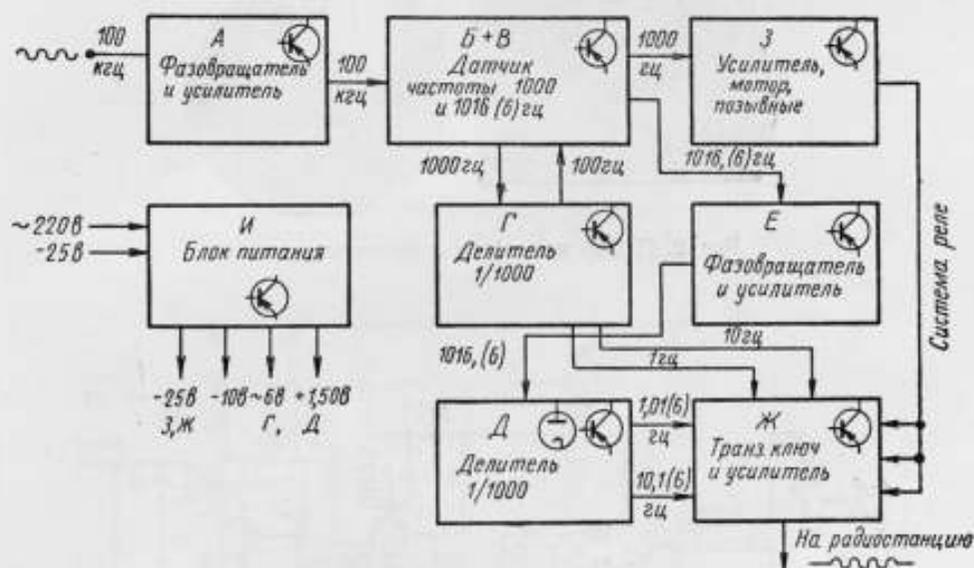


Рис. 1. Блок-схема датчика сигналов точного времени

Программирование работы установки обеспечивается синхронным мотором блока З. Мотор приводится в действие частотой 1000 гц и посредством группы кулачковых контактов по заданной программе производит необходимые переключения для подачи тех или иных сигналов.

Блок И обеспечивает питание стабилизированным напряжением всей установки. На вход блока поступают: 220 в от городской сети переменного тока и 25 в от аккумуляторной батареи. На выходе блока имеются — 26 в, 10 в, 150 в постоянного тока и 6 в переменного тока. Нормально УПС работает от сети. При аварии последней, установка продолжает работу с питанием от батарей.

Фазовращающие устройства

Для фазировки момента подачи сигналов построены и применены устройства, позволяющие плавно изменять фазу эталонной частоты, подаваемой на вход делителя, на необходимую величину. Эти

устройства используются на частотах 100 и 1 кГц. Фазирующее устройство представляет собой систему катушек, размещенных в двух алюминиевых плитках. В каждой плитке размещены по окружности четыре одинаковые катушки на сердечниках «СБ-1». Катушки одной плитки находятся против катушек другой. Между плитками помещена экранирующая диафрагма с фигурным вырезом, которая для частоты 100 кГц изготовлена из алюминия, а для 1 кГц — из пермаллоя. Индуктивность каждой катушки порядка 10 мГн. На рис. 2 дана кон-

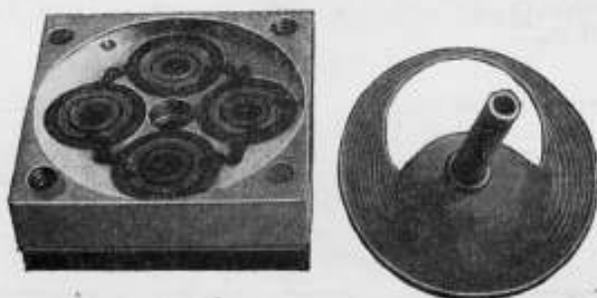


Рис. 2. Плитка и диафрагма фазовращателя

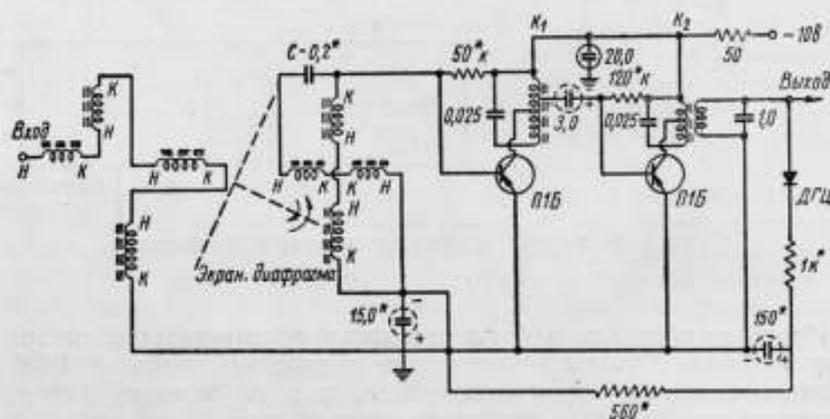


Рис. 3 Включение фазовращателя на частоту 1000 гц и усилитель с АРУ
Входные катушки фазовращателя соединены последовательно; включение приемных катушек и емкости С сделано так, что обеспечивается сдвиг между напряжениями в соседних катушках на 90°

струкция фазовращателя, а на рис. 3 — включение его в схему для сдвига фазы частоты 1000 гц. Поскольку на этой частоте трудно обеспечить достаточную передачу напряжения из одной системы катушек в другую используется резонансный усилитель. Для компенсации изменения амплитуды фазируемой частоты из-за неточности в подборе индуктивностей катушек, сдвига фаз в них и т. п. используется система АРУ. Подбором емкости С обеспечивается сдвиг по фазе напряжения в соседних приемных катушках на 90°. Один оборот диафрагмы меняет фазу на выходе фазовращателя на 360°, т. е. на один период.

На рис. 4. приведена схема включения фазовращателя, а на рис. 5 — схема усилителя с АРУ для частоты 100 кГц.

Вращение диафрагмы фазовращателя для частоты 100 кГц производится реверсивным мотором постоянного тока, а для частоты 1 кГц — вручную.

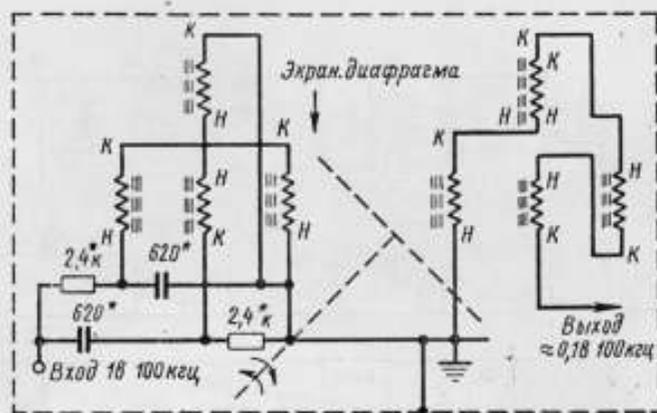


Рис. 4. Включение фазовращателя на частоту 100 кГц
Между соседними входными катушками обеспечен фазовый сдвиг на 90°; приемные катушки соединены последовательно

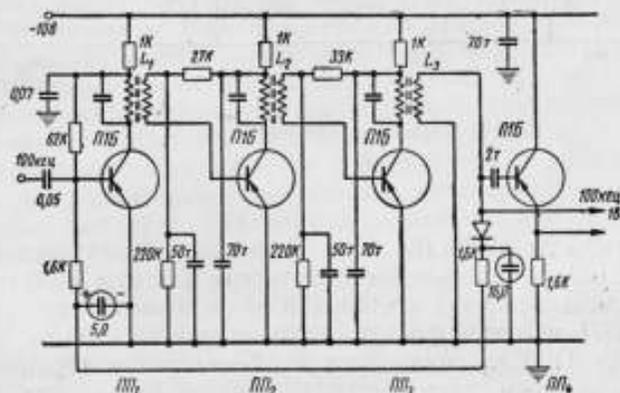


Рис. 5. Усилитель с АРУ для фазовращателя частоты 100 кГц

Датчик частот 1000 и 1016,(6) гц

После фазовращателя А 100 кГц поступают на датчик частот 1000 и 1016, (6) гц.

Датчик частоты 1000 гц представляет собой комбинацию синхронизованных LC-генераторов (рис. 6). Принцип его работы состоит в следующем: на вход LC-генератора частоты 20 кГц на триоде ПП₁ подается частота 100 кГц, в результате чего генератор синхронизируется и отношение частот входа и выхода будет точно равно 5. Стабилизированная таким образом частота 20 кГц через эмиттерный повторитель на ПП₂ синхронизирует LC-генератор 5 кГц на ПП₃, а тот, в свою очередь, посредством ПП₄ синхронизирует LC-генератор на 1 кГц (триод ПП₅). С транзистора ПП₅ стабилизированная частота 1 кГц снимается через повторители на ПП₆ и ПП₇.

Во всех случаях повторители используются для уменьшения влияния последующих цепей на предыдущие генераторы. Для уменьшения влияния изменений температуры на работу транзисторных LC-генераторов, смещения на базы ПП₁, ПП₃, ПП₅ поданы через низкоомные делители.

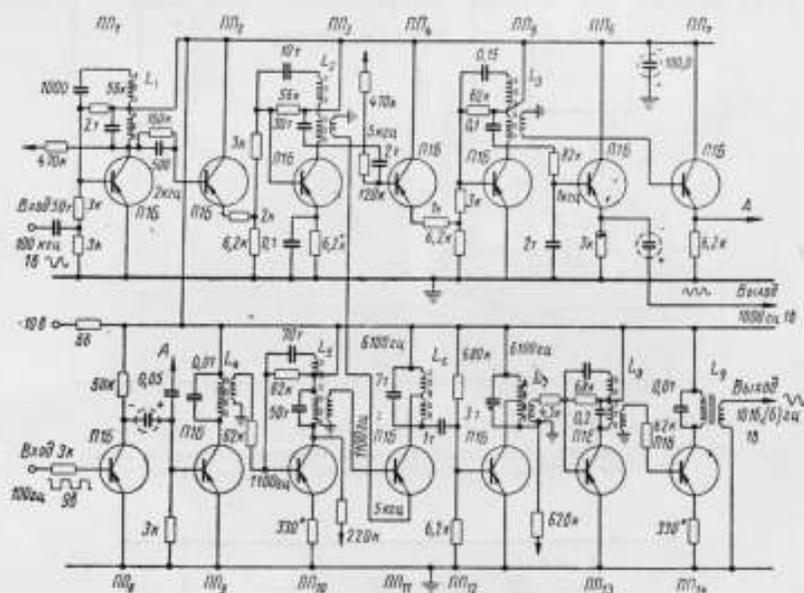


Рис. 6. Датчик частот 1000 и 1016, (6) гц

Датчик частоты 1016, (6) гц работает следующим образом (см. рис. 6): 100 гц, полученные с делителя частоты 1000 гц на тысячу (см. ниже), смешиваются с частотой 1000 гц. В коллектор смесителя на транзисторе ПП₉ включен фильтр, настроенный на 1100 гц. Частично отфильтрованная 1100 гц синхронизирует LC-генератор (транзистор ПП₁₀) частоты 1100 гц, чем достигается надежное подавление посторонних частот, возникающих в коллекторе смесителя.

С ПП₁₀ 1100 гц подается на базу смесителя на транзисторе ПП₁₁. Кроме этого, с транзистора ПП₃ подается на эмиттер ПП₁₁ частота 5 кгц. В коллекторе ПП₁₁ имеется фильтр на 6100 гц. Отфильтрованная и усиленная частота 6100 гц (транзистор ПП₁₂) синхронизирует LC-генератор 1016, (6) гц на ПП₁₃. Частота 1016, (6) гц снимается с усилителя на ПП₁₄.

Для контроля работы схемы с транзисторов ПП₁, ПП₃, ПП₁₀, ПП₁₂ через высокоомные сопротивления сделаны дополнительные выходы.

Все катушки намотаны на броневых сердечниках. На частоте 20 кгц используется сердечник СБ-2, для частот 6100 и 5000 гц, 1100 и 1000 гц используются соответственно сердечники СБ-3, СБ-4 и СБ-5. У всех генераторов обмотки обратной связи имеют в два раза меньше витков, чем основные, настраиваемые. Трансформаторы L₂, L₃, L₄, L₅, L₇, L₈ и L₉ имеют отдельные обмотки связи с последующими цепями. Эти обмотки содержат 1/5 витков основной обмотки. Трансформаторы L₆ и L₇ имеют отводы от середины.

Эпюры напряжений в отдельных точках схемы приведены на рис. 6. Датчик частот 1000 и 1016, (6) гц смонтирован на дюралевом шасси размером $25 \times 10 \times 5$ см (рис. 7).

В заключение о датчиках частот следует сказать, что надлежащим образом отрегулированные схемы надежно синхронизируются при изменениях питающих напряжений в пределах от 4 до 24 в и температуры от -20 до $+50^\circ\text{C}$.

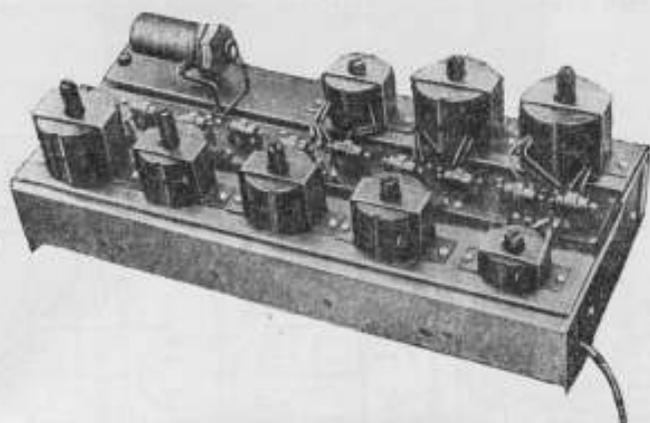


Рис. 7. Общий вид датчика частот 1000 и 1016, (6) гц.

Разумеется, для этих схем необходимо использовать только специально тщательно отобранные, не «ползущие» триоды. Процесс отбора можно существенно упростить, если вместо транзисторов типа П-1 использовать транзисторы П-12, П-14, П-401 и т. п.

Для возможно большей надежности при длительной эксплуатации схема датчика частоты 1000 и 1016, (6) гц заключена в мешок из пластика, защищающий схему от действия влаги и пыли, и помещена в камеру со сравнительно постоянной температурой. Почти годовая эксплуатация показала надежность и неизменность параметров этих устройств*.

Делители частот 1000 и 1016, (6) гц на тысячу

Частоты 1000 и 1016, (6) гц делятся на тысячу фантастронными делителями. Этот выбор обусловлен тем, что фантастроны как делители отличаются простотой конструкции, малыми фазовыми сдвигами, надежностью в работе и экономичностью благодаря малому количеству радиоламп. Эти схемы позволяют использовать радиолампы в экономичных режимах, при существенно сниженных накальных и анодных напряжениях, что дает возможность довести срок службы этих делителей до десятков тысяч часов.

Опишем вкратце работу схемы (рис. 8), используемой в нашей установке. На входной транзистор $ПП_1$ подается синусоидальный сигнал 1 кГц. Источник сигнала имеет выходное сопротивление порядка 100 ом. Усиленный и сформированный сигнал через диод $\frac{1}{2} Л_1$ каждым десятым отрицательным импульсом с напряжением порядка 15 в запускает фантастрон на $Л_2$.

* Измерения фазовых сдвигов у датчиков частоты 1000 и 1016, (6) гц показали, что изменения питающих эти блоки напряжений на 10% приводят к сдвигу сигналов на выходе установки подачи сигналов на 4 мксек. Поскольку напряжение питания стабилизировано, фазовые сдвиги в процессе работы имеют существенно меньшую величину.

Период релаксации фантастрона определяется в основном: а) постоянной времени цепочки RC , т. е. величиной сопротивления в цепи первой сетки и емкостью между этой сеткой и анодом; б) временем спада анодного напряжения от уровня, определяемого потенциалом катода диода, через который подается запускающий импульс, до некоторого минимального, близкого к потенциалу катода фантастрона. Цепочки RC подбираются так, чтобы период релаксации каждого из трех фантастронов соответственно равнялся 0,01, 0,1 и 1 сек. Поэтому с катода L_2 каждый десятый импульс через $1/2 L_3$ за-

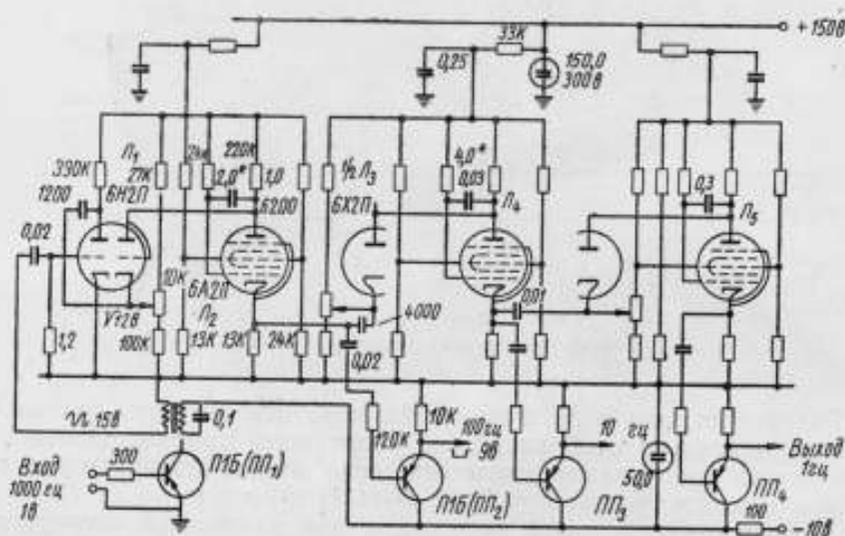


Рис. 8. Фантастронный делитель частоты 1000 гц на тысячу

пускает фантастрон на L_4 , который, в свою очередь, каждым десятым импульсом запускает последний фантастрон на L_5 . Общий коэффициент деления равен тысяче.

Потенциометры (10 ком) позволяют регулировкой потенциалов катодов диодов точно установить оптимальный режим работы фантастронов для получения необходимого периода релаксации.

В оптимальном режиме этот делитель устойчиво работает при изменении анодного напряжения от 80 до 400 в и накального — от 3,5 до 7 в.

Изменения питающих напряжений на $\pm 10\%$ вызывают временной сдвиг выходного секундного импульса на ± 2 мксек. Поскольку питание у фантастронов стабилизировано, фазовые сдвиги имеют существенно меньшую величину. На рис. 8 приведены эпюры напряжений в отдельных точках схемы.

Импульсы 100, 10 и 1 гц с фантастронов снимаются посредством эмиттерных повторителей $ПП_2$, $ПП_3$, $ПП_4$, чем исключается влияние последующих цепей на работу фантастронов.

Схема делителя частоты 1016, (6) гц на тысячу полностью подобна рассмотренной выше схеме (см. рис. 8).

На рис. 9 изображен общий вид собранных схем. Одна из таких схем эксплуатируется в лаборатории около двух лет. За этот срок ни разу не потребовалось смены ламп или новой регулировки схемы.

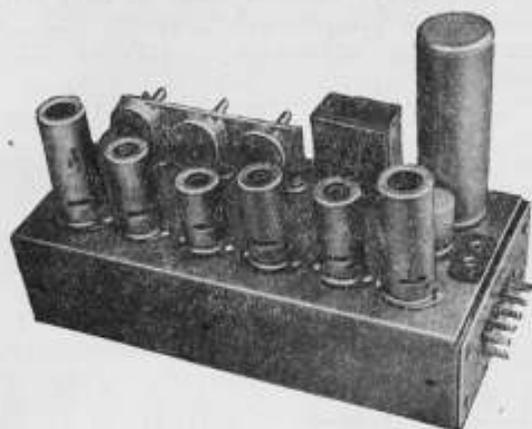


Рис. 9. Общий вид фантастронного делителя частоты

Транзисторный ключ

Обычно на радиостанцию для манипуляции передатчика подаются сигналы, заполненные частотой 2000 гц. Для формирования этих сигналов мы используем транзисторный ключ (модулятор), управляемый выходными импульсами фантастронных делителей частоты. На рис. 10 приведена принципиальная схема транзисторного ключа. Работает он следующим образом:

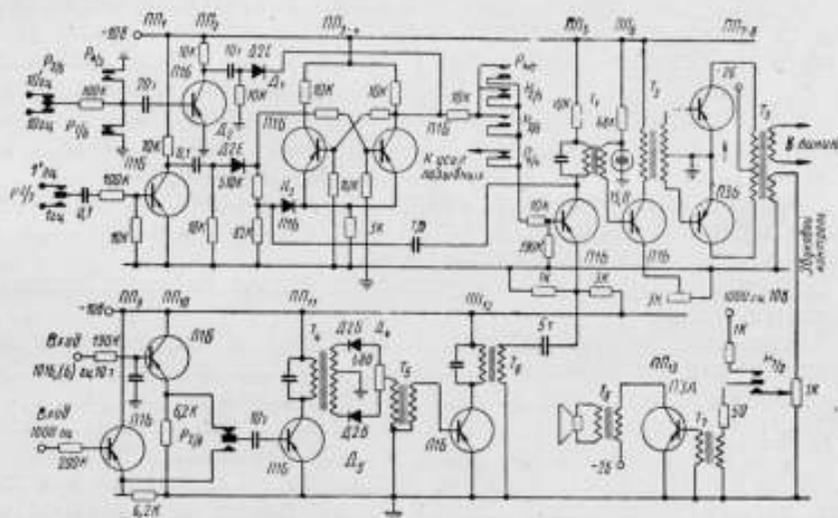


Рис. 10. Схема транзисторного ключа и удвоителя частот 1000 и 1016, (6) гц

С делителя 1000 гц на тысячу (см. рис. 8) через эмиттерные повторители импульсы 10 и 1 гц поступают на усилители, выполненные на транзисторах ПП₁ и ПП₂ (рис. 10). Усиленные и дифференцированные импульсы через диоды Д₁ и Д₂ подаются на полупериодный мультивибратор ПП₃ и ПП₄. Запуск мультивибратора производится каждым секундным (1 гц) импульсом, снятым с ПП₁, а возвращение в исходное положение — ближайшим 10-герцевым импульсом с транзистора ПП₂.

В результате этого в коллекторе $ПП_4$ мы имеем отрицательные импульсы с крутыми перепадами; они следуют через секунду, а их длительность точно равна 100 мсек.

С коллектора $ПП_4$ импульсы поступают на базу $ПП_5$, работающего в ключевом режиме. Эти импульсы открывают $ПП_5$, который заперт благодаря отрицательному потенциалу эмиттера относительно базы (эмиттер $ПП_5$ подключен через делитель к источнику питания). На эмиттер $ПП_5$ с удвоителя частоты поступают 2000 гц (при подаче секундных сигналов).

Во время подачи ритмических сигналов полупериодный мультивибратор управляется импульсами 10,1 (6) и 1,01 (6) гц, а в эмиттер $ПП_5$ подается 2033, (3) гц.

Удвоитель частот 1000 и 1016, (6) гц собран на $ПП_{11}$, $ПП_{12}$ и диодах D_4 и D_5 . Транзисторы $ПП_5$ и $ПП_{10}$ служат повторителями.

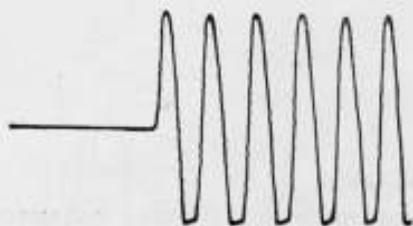


Рис. 11а. Начало секундного сигнала.

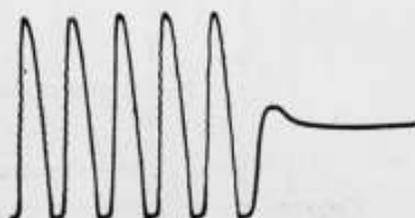


Рис. 11б. Конец секундного сигнала.

Работа фантастронов и транзисторного ключа полностью определяется входной частотой и ее фазой. Поскольку заполнение импульсов производится удвоенной частотой со входа фантастрона, легко обеспечивается синхронность момента срабатывания ключа и фазы частоты заполнения. Усиление заполненных частотой импульсов производится транзисторами $ПП_6$, $ПП_7$, $ПП_8$. Диод D_3 ограничивает возможность возникновения ударных колебаний в T_1 . Благодаря этому при подаче, например, секундных импульсов длительность сигнала точно равна 100 мсек. На рис. 11а и 11б показаны начало и конец импульса.

Мощность, отдаваемая в линию на радиостанцию, регулируется переключением обмотки T_3 , а также сопротивлением в эмиттере $ПП_6$. Максимальная мощность достигает 4 ватт.

Звуковой контроль работы установки подачи сигналов проводится с помощью $ПП_{13}$.

Автоматизм работы датчика, т. е. подача в определенное время секундных или ритмических сигналов, а также получение минутной марки обеспечивается синхронным мотором блока З (см. рис. 1).

Минутная марка получается следующим образом: контактной парой P_{14} синхронного мотора раз в минуту замыкается на массу вход усилителя на $ПП_2$. Соответственно шестидесятый секундный или шестьдесят первый ритмический сигнал опрокидывает мультивибратор, в результате чего открывается ключ на $ПП_5$. Возвращение мультивибратора в исходное состояние произойдет после размыкания пары P_{14} и прихода на $ПП_2$ ближайшего очередного импульса. Маркирующая система мотора отрегулирована так, что минутная марка всегда будет кратна либо пяти интервалам по 10 гц при подаче секунд, либо пяти интервалам по 10,1 (6) гц при подаче ритмических сигналов, для чего замыкание на массу входа $ПП_2$ производится после 59-го секундного или после 60-го ритмического сигнала, а размыкание — спустя примерно 0,4 сек. после 60-го секундного или 61-го ритмического сигнала.

Мотор и система позывных

Синхронный мотор установки подачи сигналов работает на частоте 1000 гц. Обмотка возбуждения мотора включена на трансформатор T_3 блока питания И (см. рис. 1).

Мотор вращает несколько групп кулачковых контактов, которые посредством электромагнитных реле производят необходимые переключения по заданной программе в различных местах схемы.

Для выработки позывных радиостанций в датчике имеется цилиндр с прорезями, при помощи которого прерывается луч света, освещающего фотозлемент. Цилиндр вращается синхронным мотором. При регулировке схемы (рис. 12) следует обращать внимание на выбор первого транзистора, который должен иметь коэффициент α усиления по току не менее 0,97 и не должен «ползти».

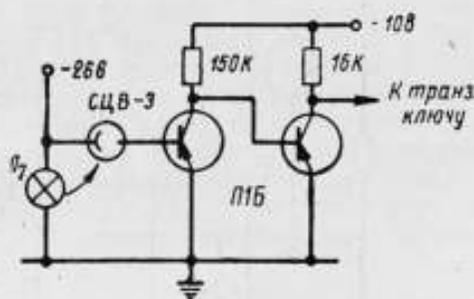


Рис. 12. Схема усилителя фотокаскада

Блок питания

Для работы УПС необходимы следующие напряжения: переменные 6 в и постоянные 10, 26 и 150 в. Блок питания (рис. 13) представляет собой стабилизированный преобразователь постоянного напряжения (ППН) на транзисторах $ПП_1$, $ПП_2$, $ПП_3$ и $ПП_4$. Рабочая частота ППН выбрана сравнительно высокая — 1 кгц, чем достигается существенное уменьшение габаритов трансформаторов преобразователя.

Нагрузкой усилителя мощности на двух транзисторах $П4В$ ($ПП_4$) является трансформатор T_3 , который имеет шесть вторичных обмоток. Со второй, третьей, четвертой и пятой обмоток после выпрямления снимаются: 150; 10; 10,1 и 26 в. Седьмая обмотка служит для накала ламп фантастроных делителей, а с шестой обмотки снимается напряжение для возбуждения мотора.

Для стабилизации выходных напряжений ППН имеет цепь обратной связи, для чего используется четвертая обмотка. После выпрямления и фильтрации напряжение с этой обмотки (—10,1 в) поступает на потенциометр P . Между потенциометром и базой регулирующего триода $ПП_2$ включена опорная батарея (напряжение батареи около 9 в; составлена из пяти элементов типа «Сатурн»). Коллектор $ПП_2$ подключен к базе регулируемого транзистора $ПП_3$.

Если напряжение батареи окажется больше напряжения, снятого с потенциометра, транзистор $ПП_2$ будет заперт положительным напряжением батареи. В этом случае усиление $ПП_3$ будет максимальным, поскольку его база через сравнительно малое сопротивление (6,2 ком) подключена к —26 в. Но тогда возрастет общий коэффициент усиления ППН и вырастет, следовательно, переменное напряжение на обмотках T_3 . Напряжение на потенциометре P станет больше напряжения батареи, через $ПП_2$ пойдет ток и, в результате понизятся смещение на базе $ПП_3$ и его коэффициент усиления. В конечном итоге автоматически установится постоянное и определенное соотношение между напряжением батареи и напряжением на потенциометре P . При изменениях нагрузки или напряжения питания ППН, коэффициент усиления последнего будет автоматически изменяться таким образом, что напряжения в обмотках T_3 будут почти постоянными. В интер-

вале питающих напряжений (на коллекторах ПП₄) от —18 до —34 в коэффициент стабилизации ППН равен 35.

Регулировка выходных напряжений Т₃ производится потенциометром Р. Переменное сопротивление 15 ком, включенное параллельно батарее, компенсирует ее зарядный ток.

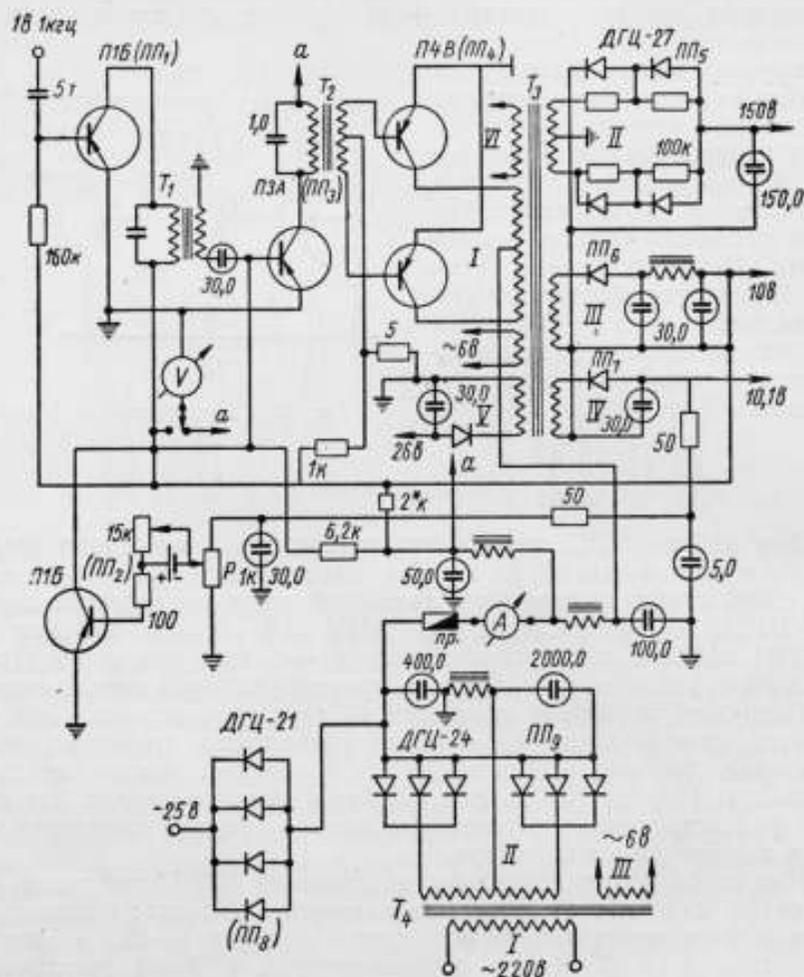


Рис. 13. Схема блока питания установки подачи сигналов

Со вторичной обмотки силового трансформатора Т₄ после выпрямления снимается около —26 в. Это напряжение используется для питания ППН. На выпрямитель на ПП₉ через диоды ПП₈ подано от резервной батареи —25 в. При аварии силовой сети или падении напряжения в ней до такого предела, что выпрямитель на ПП₉ будет давать менее —25 в, питание установки будет производиться от батарей через ПП₈. При наличии диодов ПП₈ исключается возможность подзаряда аккумуляторных батарей от выпрямителя на диодах ПП₉, чем существенно облегчается режим трансформатора Т₄.

Контроль работы блока питания производится вольтметром и амперметром, расположенными на передней панели.

Для отвода тепла транзисторы ПП₄ снабжены радиаторами по 600 см², а транзистор ПП₃ — радиатором 200 см².

Выводы

В результате проведенной работы в Иркутской лаборатории ВНИИФТРИ создана установка, удовлетворяющая современные требования к точности подачи сигналов времени. Опыт эксплуатации двух экземпляров устройств показал, что при работе от общего генератора 100 кГц расхождения между сигналами датчиков в течение суток не более 1—3 мксек. Такая точность позволяет подавать с этих установок сигналы нового типа.

Благодаря широкому использованию полупроводников (44 транзистора и 24 германиевых диода), УПС потребляет около 40 в_а, что позволяет легко резервировать питание и тем самым обеспечить безаварийную работу. Безаварийность работы обеспечивается еще и тем, что полупроводники, на которых выполнено большинство узлов УПС, обладают сроком службы в десятки тысяч часов. С этой точки зрения в дальнейшем, вероятно, имеет смысл фантастические делители на вакуумных лампах заменить делителями на транзисторах. Следует также заметить, что, используя блоки А, Б, Г, И и термостатированный кварц на частоту 100 кГц, можно скомпоновать экономичные кварцевые часы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Decaux B. Instructions pour l'emploi de la radioélectricité dans l'opération mondiale des longitudes et des latitudes, Pergamon press, London, 1957.
2. В. Ф. Лубенцов. О государственной службе времени. Труды ВНИИФТРИ «Измерение времени», выпуск 1, Стандартгиз, 1958, стр. 9.

ЗАТУХАНИЕ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ ВОЗДУХА

Маятник, издавна известный как основной элемент часов, а впоследствии и гравиметров, не потерял своего значения и в настоящее время, хотя маятниковые астрономические часы с успехом вытесняются кварцевыми, имеющими более высокое постоянство хода, а громоздкие маятниковые гравиметры в ряде случаев заменяются приборами более удобных конструкций.

В некоторых фундаментальных исследованиях, таких как абсолютное определение ускорения под действием силы тяжести, выяснение характера движения колебательных систем при малых силах сопротивления и в других работах, маятник в разреженном воздухе может оказаться удобным прибором, обеспечивающим высокую точность получаемых результатов.

В области прикладной гравиметрии маятник, находящийся в герметическом баллоне при низком давлении воздуха, также может сохранить свое значение основного элемента гравиметра, так как в этом случае, в силу незначительного затухания колебаний, надобность в массивных маятниках отпадает и гравиметр может быть сделан легким и компактным.

Наконец, последние исследования маятниковых часов с изохронным подвесом, выполненные во ВНИИФТРИ Ф. М. Федченко, свидетельствуют, что использованы далеко не все возможности маятниковых часов и средняя квадратическая вариация суточного хода, обусловленная конструктивными особенностями, может быть сведена до $\pm 0,2$ мсек. Возможно, что дальнейшего повышения стабильности хода удастся достигнуть, поместив маятник в условия высокого вакуума.

В связи с отмеченными возможностями использования маятника представляет интерес вопрос о характере и величине затухания колебаний маятника в различных условиях.

Этот вопрос не нов. Результаты исследований колебаний маятников в вязкой среде, наряду с другими данными, послужили опытным основанием гидродинамики [1]. В более позднее время к нему возвращались в связи с разработкой маятниковых астрономических часов [2, 3]. Однако приведенные работы не дают полного представления о зависимости затухания колебаний маятника от давления воздуха в широком диапазоне давлений, которую необходимо учитывать при выборе оптимальных условий работы маятника.

Среди многих факторов, влияющих на степень затухания маятника (опоры маятника, тормозящее действие магнитных полей), точки опоры маятника, тормозящее действие магнитных полей), наибольшее значение имеет вязкое сопротивление среды. Это сопротивление, как известно, определяется не только средой, но и формой колеблющегося в ней тела.

Однако характер сил сопротивления при сравнительно небольших скоростях движения обычных маятников, как показывает экспери-

мент, практически одинаков для тел различной формы. Поэтому качественное представление о движении маятника в воздухе, о зависимости его затухания от степени разрежения воздушной среды можно получить, рассматривая колебательное движение шара в вязкой среде, так как эта задача при некоторых условиях может быть полностью решена [4, 5]. Эти условия должны быть такими, чтобы в известном уравнении Навье-Стокса

$$\frac{dv}{dt} + (v \nabla) v = - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta v, \quad (1)$$

описывающем движение вязкой жидкости, можно было пренебречь членом $(v \nabla) v$ (уравнение (1) написано в векторной форме; $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ — есть отношение вязкости среды и ее плотности). Тогда, применяя к этому уравнению операцию rot, получим

$$\frac{\partial}{\partial t} \text{rot } v = \nu \Delta v, \quad (2)$$

т. е. уравнение типа теплопроводности, которое может быть сравнительно легко проинтегрировано. Уравнение (2) приводит к экспоненциальному затуханию описываемой величины, поэтому движение жидкости, вызванное колебанием маятника, является вихревым лишь в некотором слое вокруг него; на больших расстояниях оно переходит в потенциальное.

Более детальное исследование [4] показывает, что «глубина проникновения» вихревого движения, т. е. расстояние, на котором амплитуда вихревого движения уменьшается в $e = 2,71 \dots$ раз, имеет порядок $\beta \sim \sqrt{\frac{\nu}{\omega}}$, где ω — частота колебаний маятника. Заметим, что вязкость воздуха не зависит от давления, поэтому с уменьшением давления (плотности) β возрастает.

Для рассмотрения условий пренебрежения членом $(v \nabla) v$ оценим некоторые члены уравнения (1). Если полагать диаметр колеблющегося шара равным d , амплитуду колебаний — a (скорость его $\sim a\omega$), то член $\frac{dv}{dt}$ будет иметь порядок $a\omega^2$; член $(v \nabla) v \sim \frac{v^2}{d} = \frac{a^2\omega^2}{d}$ и $\nu \Delta v \sim \frac{\nu a\omega}{d^2}$ (предполагается, что скорость заметно меняется, лишь на протяжении размера тела). Число Рейнольдса, равное отношению членов $(v \nabla) v$ и $\nu \Delta v$ и определяющее в значительной степени характер движения жидкости, в этом случае будет иметь порядок $Re \sim \frac{a\omega d}{\nu}$.

При малых давлениях воздуха, когда $Re \ll 1$, член $(v \nabla) v \ll \nu \Delta v$ его можно опустить в уравнении (1). Если к тому же «глубина проникновения» вихревого движения $\beta \gg d$, то можно пренебречь и членом $\frac{dv}{dt}$, т. к. условие $\sqrt{\frac{\nu}{\omega}} \gg d$, или $\frac{\nu}{d^2} \gg \omega$, эквивалентно условию $\frac{\nu a\omega}{d^2} \gg a\omega^2$, т. е. $\frac{dv}{dt} \ll \nu \Delta v$.

Следовательно, выполнение условий

$$Re \ll 1; \beta \gg d \quad (3)$$

приводит к стационарной задаче, которая дает такое распределение скоростей жидкости вокруг колеблющегося тела (шара), при котором сила сопротивления, испытываемая шаром, определяется формулой Стокса:

$$F = 6 \pi \eta r u. \quad (4)$$

Учитывая (4), уравнение движения маятника (рассматриваемого в виде шара на нити, не испытывающей сопротивления) в первом приближении может быть представлено в форме

$$\ddot{x} + 2 \frac{3\pi\eta r}{m} \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (5)$$

где: m — масса маятника;
 ω_0 — частота его колебаний при отсутствии сопротивления, которая практически совпадает с ω .

Отсюда следует, что коэффициент затухания маятника

$$\delta = \frac{3\pi\eta r}{m} \quad (6)$$

не зависит от давления и определяется лишь вязкостью среды.

Заметим, что поскольку условия (3) определяются произведением ωr , то полученный результат может иметь место не только при малых давлениях, но и при малых частотах колебаний.

При увеличении давления условия (3) нарушаются, «глубина проникновения» вихревого движения становится соизмерима с размером шара или больше его, а чтобы и в этом случае можно было пренебречь членом $(v \nabla) v$ в уравнении (1), необходимо выполнение условия $\frac{a}{d} \ll 1$, т. е. амплитуда колебаний шара должна быть заметно меньше его диаметра. Действительно, последнее условие эквивалентно условию $\frac{a^2 \omega^2}{d} \ll a \omega^2$, или $(v \nabla) v \ll \frac{\partial v}{\partial t}$. Член $v \Delta v$, даже если он меньше отброшенного $(v \nabla) v$ (когда $\beta < d$), должен быть сохранен в уравнении (1), так как им обусловлено вязкое сопротивление, а следовательно, и расстояние энергии колеблющегося шара.

Таким образом, при условии

$$\beta \ll d \text{ и } \frac{a}{d} \ll 1 \quad (7)$$

уравнение (1) приводится к уравнению (2).

Решение этого уравнения [5] в предположении, что шар совершает гармоническое колебание, приводит к выражению силы, действующей на шар, в форме

$$F = A \left\{ B \left(1 + \frac{2}{3} B \right) \omega u + \left(B + \frac{1}{3} \right) \frac{du}{dt} \right\}, \quad (8)$$

где:

$$A = 2\pi\eta r^2;$$

$$B = \frac{3}{2r} \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}.$$

Выражение (8) также принадлежит Стоксу и может быть названо второй формулой Стокса, в отличие от первой (4).

Подставляя (8) в обычное уравнение движения маятника, получим

$$\left(m + \frac{1}{3}A + AB\right)\ddot{x} + AB\omega\left(1 + \frac{2}{3}B\right)\dot{x} + m\omega_0^2 x = 0, \quad (9)$$

или, так как $\frac{1}{3}A + AB \ll m$,

$$\ddot{x} + 2 \frac{AB\omega\left(1 + \frac{2}{3}B\right)}{2m} \dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (10)$$

т. е. уравнение вида (5) с коэффициентом затухания

$$\delta = \frac{AB\omega\left(1 + \frac{2}{3}B\right)}{2m}, \quad (11)$$

или

$$\delta = \frac{6\pi\eta r + 3\pi r^2 \sqrt{2\eta\omega\rho}}{2m}, \quad (12)$$

Таким образом, коэффициент затухания состоит из двух слагаемых, одно из которых δ_1 не зависит от давления и представляет ту часть его, которая обусловлена формулой Стокса, а другое — δ_2 пропорционально корню из плотности (для случая воздушной среды — корню из давления).

Формула (12) является более общей, сравнительно с (6); последняя вытекает из (12) как частный случай, когда $\omega\rho \rightarrow 0$.

При больших давлениях, когда $\delta_2 \gg \delta_1$, можно полагать

$$\delta \sim \sqrt{\rho}, \quad \text{или} \quad \delta \sim \sqrt{h}, \quad (13)$$

где h — давление воздуха в мм рт. ст.

Необходимо отметить, что в реальных условиях тело маятника имеет не сферическую форму; к тому же, штангу маятника нельзя рассматривать как нить, не испытывающую сопротивления. Поэтому даже при соблюдении условий (3) и (7) указанные выше соотношения между коэффициентами затухания и плотностью среды в полной мере выполняться не будут. Однако приведенные рассуждения о характере рассеяния энергии в вязкой среде при колебаниях остаются справедливыми для любых тел. Поэтому можно ожидать, что качественно зависимость коэффициента затухания от давления воздуха для реального маятника будет такая, как и для идеализированного маятника сферической формы.

Экспериментальная проверка высказанных предположений была проведена на двухсекундном маятнике, помещенном в барокамере, где можно было создавать разрежение воздуха от атмосферного давления до вакуума порядка $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

Маятник представлял собой штангу в виде медной трубки ($d = 1,4$ см; $L = 110$ см; $m_1 = 2,13$ кг), на которую надет по оси медный цилиндрический сосуд, наполненный свинцом ($D = 8,0$ см; $H = 16,8$ см; $m_2 = 8,87$ кг). Подвешивался маятник на цельном упругом стальном подвесе.

Цилиндрическая барокамера для исследования колебания маятника изготовлена из стали, ее диаметр 25 см, высота 120 см. Нижняя часть маятника отстоит от дна барокамеры на расстоянии ~ 10 см.

Измерение амплитуды колебаний производилось оптическим методом, по величине отклонения светового луча, отраженного от зеркала на штанге маятника. При этом методе погрешность определения коэффициента затухания маятника для амплитуд 0,025 радиан (при которых измерялся коэффициент) не превышала 1%.¹⁰

Из литературы [7] известно, (а также подтверждено в процессе проведения описываемых экспериментов), что коэффициент затухания зависит от амплитуды колебаний маятника (уменьшается с уменьшением амплитуды), поэтому для сопоставимости результатов указанное среднее значение амплитуд выдерживалось при всех экспериментах.

Коэффициент затухания определялся как относительное изменение амплитуды колебаний маятника в единицу времени. Результаты определений коэффициента при различных давлениях воздуха помещены в таблице и графически представлены на рис. 1.

Давление h в мм рт. ст.	Коэффициент затухания δ в единицах 10^{-6} сек. $^{-1}$	$\sqrt{\frac{h_n}{h_{n+1}}}$	$\frac{\delta_n}{\delta_{n+1}}$
758	68,0	1,17	1,17
555	58,3	1,20	1,24
390	47,2	1,26	1,24
246	38,4	1,24	1,25
160	31,0	1,16	1,17
120	26,7	1,43	1,46
59	19,3	1,40	1,30
30	15,1	1,41	1,30
15	11,8	1,41	1,16
7,5	10,3	1,37	1,05
4,0	9,82	1,41	1,14
2,0	9,70	—	—
1,3	9,37	—	—
0,6	9,36	—	—
0,4	9,30	—	—
0,3	9,16	—	—
$7 \cdot 10^{-3}$	5,60	—	—
$3 \cdot 10^{-3}$	5,17	—	—
$1 \cdot 10^{-5}$	1,0	—	—

Приведенные значения коэффициентов обусловлены не только сопротивлением среды, но рассеянием энергии в упругом подвесе и сокачанием опоры маятника. Для выделения доли коэффициента, не связанной со средой, были проведены измерения затухания маятника в вакууме порядка $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Как видно из таблицы, эта доля, равная $\delta_0 = 1 \cdot 10^{-6}$ сек. $^{-1}$, составляет примерно 1,5% от коэффициента затухания при атмосферном давлении.

Характерной особенностью кривой, представляющей зависимость коэффициента затухания от давления воздуха, является наличие участка давлений, в котором коэффициент практически остается постоянным. Этому участку соответствует, как уже отмечалось, вязкое трение, независимое от давления и рассчитываемое по закону Стокса.

Для сопоставления полученного и расчетного коэффициентов затухания в этом диапазоне давлений воспользуемся выражением (6),

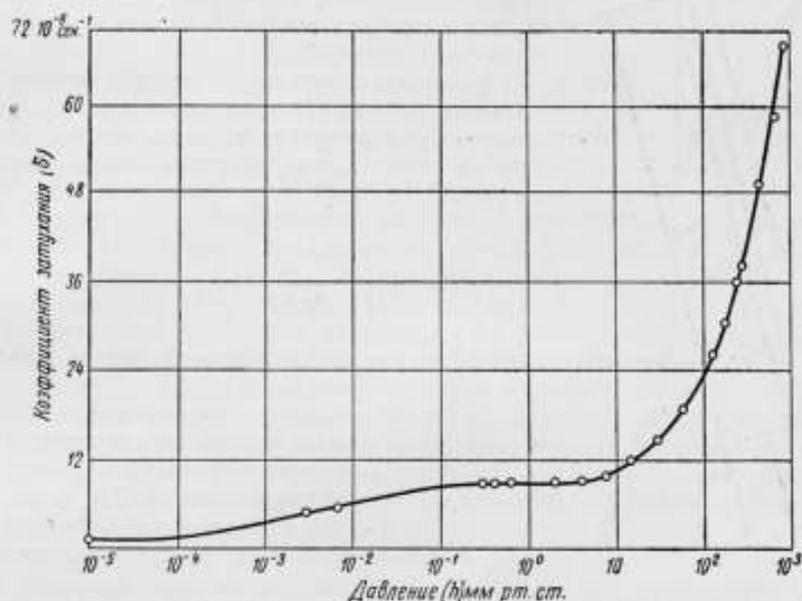


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания маятника от давления воздуха

беря ориентировочно $r = 6$ см (радиус свинцового шара, вес которого равен весу маятника), $\eta = 1,8 \cdot 10^{-4}$ гсек $^{-1}$ см $^{-1}$. Это дает $\delta = 0,9 \cdot 10^{-6}$ сек $^{-1}$.

Как видно, экспериментально найденное значение для δ примерно в 9 раз больше вычисленного. В какой-то мере это можно объяснить не только несферической формой маятника, но и тем обстоятельством, что при малых давлениях, когда «глубина проникновения» вихревого движения соизмерима с размерами барокамеры (в данном случае при $h = 1$ мм рт. ст., $\beta \sim 6$ см; зазор между маятником и стенкой барокамеры равен 8 см), существенную роль играет близость поверхностей, ограничивающих пространство, в котором колеблется маятник. В литературе имеется указание на подобного рода влияние стенок сосуда [8].

С возрастанием давления β уменьшается и можно ожидать меньшего расхождения экспериментальных и вычисленных значений коэффициентов затухания маятника.

Действительно, для атмосферного давления ($h = 758$ мм рт. ст.; $\rho = 1,2 \cdot 10^{-3}$ г.см $^{-3}$) формула (12) дает $\delta = 20 \cdot 10^{-6}$ сек $^{-1}$, что лишь в 3,4 раза меньше наблюдаемого. Тем не менее это расхождение, так же как и для малых давлений, значительное, и для окончательного объяснения этого несоответствия необходимы дополнительные эксперименты.

Для проверки предположения (13) в приведенной выше таблице сопоставлены отношения коэффициентов затухания (в которых исключен коэффициент δ_0), полученных при различных давлениях, и отношения корней из этих давлений. Как видно из таблицы, при больших

давлениях с достаточным основанием можно считать коэффициент затухания пропорциональным корню из давления. Следовательно, несмотря на количественное несогласие с экспериментом, выражение (12) качественно правильно описывает зависимость коэффициента затухания от давления воздуха.

Рассмотрим теперь левую часть кривой на рис. 1, представляющую коэффициент затухания маятника в вакууме, когда длина свободного пробега молекул воздуха превышает размеры барокамеры.

Кинетическая теория газов и экспериментальные данные [9] приводят к выводу, что на элемент поверхности ds , движущийся в вакууме со скоростью u , действует сила сопротивления dF , равная

$$dF = pu \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} (1 + c \cos^2 \alpha) ds, \quad (14)$$

где: M и p — молекулярный вес и давление воздуха;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура;

c — некоторый коэффициент, для воздуха равный 2,6;

α — угол между нормалью к элементу ds и направлением его движения.

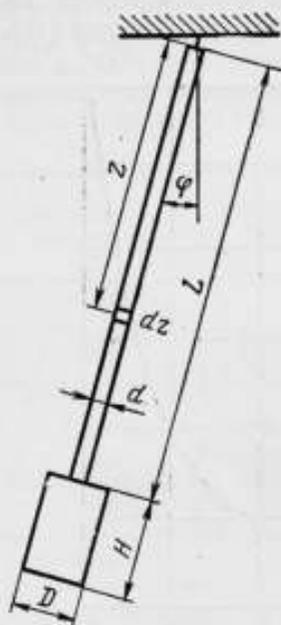


Рис. 2. К выводу формулы коэффициента затухания маятника в вакууме

маятника (M_2), учитывая, что скорость элемента штанги на расстоянии z от оси качания маятника равна $z\dot{\varphi}$ (рис. 2).

Тогда

$$M_1 = \int_{s_1} z dF = rp \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \dot{\varphi} \int_0^l z^2 dz \int_0^{2\pi} (1 + c \cos^2 \alpha) d\alpha, \quad (15)$$

где r — радиус штанги, или

$$M_1 = p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} (1 + 0,5c) \frac{1}{3} s_1 l^2 \dot{\varphi}, \quad (16)$$

где s_1 — поверхность штанги.

Аналогично находим момент M_2 , полагая в первом приближении, что цилиндрический груз совершает поступательное колебательное движение:

$$M_2 = p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} (s_2 + 0,5cs_3) \cdot \left(l + \frac{H}{2}\right)^2 \dot{\varphi}, \quad (17)$$

где s_2 и s_3 — соответственно полная и боковая поверхность груза маятника.

Момент инерции маятника

$$I = m_1 \frac{l^2}{3} + m_2 \left(l + \frac{H}{2}\right)^2, \quad (18)$$

где m_1 и m_2 — массы штанги и груза.

Следовательно, коэффициент затухания

$$\delta = p \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \cdot \frac{(1+0,5c)s_1 l^2 + 3(s_2+0,5cs_2)\left(l + \frac{H}{2}\right)^2}{2\left[m_1 l^2 + 3m_2\left(l + \frac{H}{2}\right)^2\right]} \quad (19)$$

Подставляя в (19) значения входящих величин (беря $l = 93,8$ см, $T = 293^\circ$), получим

$$\delta = 1,32 \cdot 10^{-3} h, \quad (20)$$

где давление p выражено в мм рт. ст. h .

Из (20) коэффициент затухания маятника при давлении $h = 3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (при котором имеется экспериментальный результат) следует равным $3,96 \cdot 10^{-6}$ сек.⁻¹, в то время как эксперимент (см. таблицу) дает величину $4,17 \cdot 10^{-6}$ сек.⁻¹ (без δ_0). При давлении $h = 10^{-5}$ мм рт. ст. коэффициент затухания исчезающе мал и наблюдаемое затухание при этом давлении практически не связано с сопротивлением среды.

Приведенная зависимость коэффициента затухания от давления в рассматриваемом диапазоне характерна не только для маятников (аналогичные экспериментальные результаты были получены также и для маятника часов Шорта [10]), но и таких колебательных систем более высокой частоты, как струны и пьезоэлектрические кварцевые элементы [11] в форме брусков и камертонов; для всех их наблюдается практическая независимость коэффициента от давления в некотором интервале, и возрастание при больших давлениях пропорционально корню квадратному из давления.

Выводы

1. Рассмотрение задачи о затухании колебаний маятника в вязкой безграничной среде с точки зрения гидродинамики приводит к результатам, качественно согласующимся с данными экспериментов, проведенных в ограниченном объеме, но количественно отличающимся в несколько раз; это отличие возрастает по мере уменьшения давления.

2. Коэффициент затухания маятника при давлениях воздуха 0,1—10 мм рт. ст. практически постоянен и определяется вязким трением среды. При больших давлениях он возрастает пропорционально корню из давления.

3. Коэффициент затухания, обусловленный сопротивлением в вакууме, увеличивается пропорционально давлению и при $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. имеет величину порядка $1 \cdot 10^{-8}$ сек.⁻¹. Экспериментально полученный коэффициент при этом давлении, определяемый потерями энергии в подвесе и сокачанием опоры маятника, равен $1 \cdot 10^{-6}$ сек.⁻¹.

В заключение автор пользуется случаем выразить благодарность канд. физ.-мат. наук Л. Д. Брызжеву за ценные указания при обсуждении полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. И. Менделеев. Сочинения, т. VII. Издательство Академии наук СССР, 1946.
2. H. Gockel und M. Schuler. Z. Schr. für Phys. v. 109, H. 7—8, s. 435, 1938.
3. Atkinson, E. C., 1938, Proc. Phys. Soc., 50, 721.
4. Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. 1954.
5. Г. Ламб. Гидродинамика. ОГИЗ, 1947, стр. 809.
6. Stokes, Camb Frans, IX (8), 1851.
7. А. Н. Крылов. Собрание трудов, т. VII, 1936, стр. 687.
8. Л. Прайдтль, О. Титъенс. Гидро- и аэродинамика. т. II, ОНТИ НКТП СССР, 1935.
9. Л. Дюнуайе. Техника высокого вакуума. ГНТИ, 1931.
10. W. H. Shortt. Proc. Phys. Soc., Vol. 63, June 1950.
11. Е. Д. Новгорова. Измерительная техника, 1959, № 9, стр. 44.

ВЛИЯНИЕ НЕПРАВИЛЬНОСТЕЙ ФИГУРЫ ЦАПФ ПАССАЖНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО АЗИМУТА

До начала Международного геофизического года (МГГ), в связи с предстоящими работами по международной программе, было необходимо улучшить состояние пассажного инструмента. Поэтому в 1957 г. пассажный инструмент Бамберга № 75464 Службы времени ВНИИМ был отремонтирован и переведен на фотоэлектрическую регистрацию звездных прохождений. Для увеличения прочности цапф инструмента по предложению механика завода «Эталон» К. Д. Анисимова их после предварительной шлифовки покрыли слоем хрома в 0,2 мм, после чего снова шлифовали и окончательно доводили.

Исследования цапф до и после ремонта производились контактным методом с помощью оптиметра. Отклонения формы цапф от цилиндрической до ремонта достигали местами 3 мк, после ремонта 0,3 мк. На рис. 1 показаны отклонения радиусов цапф после ремонта от их среднего радиуса Δr .

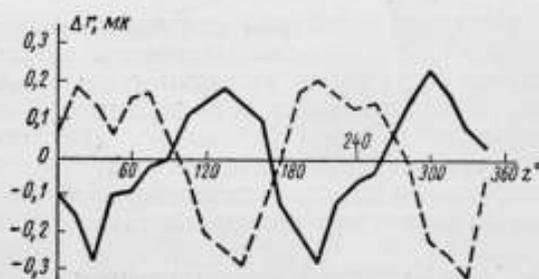


Рис. 1. График отклонений радиусов цапф от их среднего радиуса Δr

Сплошная линия — для окулярной цапфы, пунктирная — для ламповой цапфы

По форме кривые напоминают эллипсы, большие полуоси которых повернуты одна относительно другой почти на 90° . В таблице приведены значения поправок в азимут Δa , в наклонность горизонтальной оси $\Delta \theta$ и за коллимацию трубы Δc для разных значений зенитного расстояния.

Как видно из таблицы, поправки $\Delta \theta$ и Δc незначительны, поправки же Δa достигают 0,025 сек., а разности поправок азимутов для близкв-

z	Δa	$\Delta \theta$	Δc
	сек.		
0	-0,033	0,000	0,000
15	-0,024	+0,001	-0,004
30	-0,015	0,000	0,000
45	+0,003	0,000	0,000
60	+0,016	-0,001	0,000
75	+0,025	-0,002	+0,003

ториальных ($z \approx 60^\circ$) и близзенитных ($z \approx 0^\circ$) звезд достигали $0,048$ сек. Это весьма существенно, так как близэкваториальные звезды были введены в программу наблюдений только для определения азимута инструмента, а значение поправки часов вычислялось только по наблюдениям близзенитных звезд. Хотя поправки Δa могут заметно исказить результаты наблюдений, решено было провести предварительные наблюдения без учета этих поправок.

В программу наблюдений одной поправки часов в 1958 г. включались 10 близзенитных звезд и 3—4 близэкваториальных, в 1959 г., кроме того, было включено по 1 звезде в нижней кульминации (без учета их в азимуте); азимут a_s определялся из комбинации наблюдений каждой близэкваториальной звезды и всей группы близзенитных звезд. Кроме того, вычислялся азимут из комбинации наблюдений близзенитных звезд, кульминирующих к северу и к югу от зенита.

Поправки часов вычислялись со значением азимута равным $\frac{a_1 + a_2}{2}$.

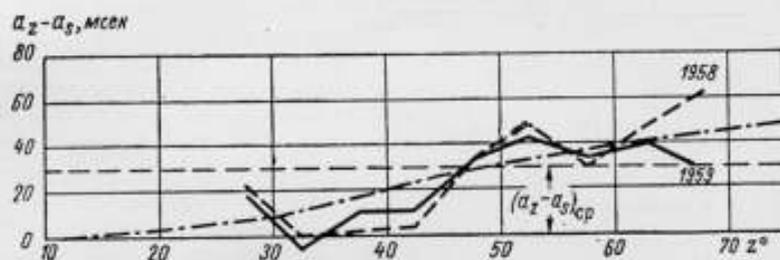


Рис. 2. График значений разностей азимутов инструмента $a_z - a_s$.

Штрих-пунктирная линия — по результатам исследования цаф, пунктирная линия — по астрономическим наблюдениям 1958 г., сплошная линия — по астрономическим наблюдениям 1959 г.

Для проверки поправок Δa из наблюдений были вычислены разности $a_z - a_s$ для 170 близэкваториальных звезд в 1958 г. и для 830 в 1959 г. Эти разности, полученные по каждой пятиградусной зоне по зенитному расстоянию, показаны на рис. 2. Хорошая сходимость этих графиков подтверждает правильность результатов исследования.

В литературе не встречается указаний на то, что в течение такого длительного периода поправки, полученные из исследования цаф, согласовались бы с поправками, полученными из наблюдений. Можно предположить, что хромирование достаточно надежно предохраняет цафы от износа и обеспечивает постоянство их формы.

Все поправки часов, полученные после ремонта инструмента были перевычислены с новыми значениями азимута:

$$\frac{1}{2}(a'_s + a_z),$$

где a'_s — азимут инструмента при наблюдении в зенитной зоне.

$$a'_s = a_s + (\Delta a_s - \Delta a_z).$$

Здесь: a_s — азимут инструмента, полученный по наблюдениям близэкваториальных звезд и группы зенитных;

Δa_s и Δa_z — поправки в азимут инструмента за неправильности цаф.

Перевычисление изменило моменты прохождения звезд до $0,020$ сек. и значения поправок часов до $0,003$ сек.

За два года, прошедшие после ремонта цаф, было произведено около 5500 наблюдений звезд. Для изучения влияния длительности наблюдений на форму цаф разности азимутов инструмента, определенных по близзенитным и близэкваториальным звездам, вычислялись отдельно для каждой группы из 18—20 поправок часов.

На рис. 3 приводится график изменения разностей азимутов инструмента. Как видно из графика, разности $a_z - a_s$ имеют сезонные изменения. При этом среднее значение разности $(a_z - a_s)_{cp}$ совпадает со значением, полученным при исследовании цапф. Наибольшие значения разностей наблюдались осенью и зимой, наименьшие — весной и летом. Можно предположить, что изменение разностей азимутов в течение года является следствием систематических погрешностей Δa_s прямых восхождений каталога FK3. Если погрешности прямых восхождений

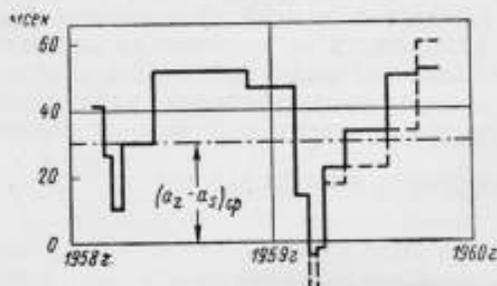


Рис. 3. График изменения разностей азимутов инструмента

Сплошная линия — по наблюдениям близзенитных и близэкваториальных звезд, $(a_z - a_s)$; пунктирная линия — по наблюдениям близзенитных звезд и звезд в нижней кульминации

0,02 сек. Таким образом появление периодической ошибки в определении азимута с амплитудой 0,003 сек. вполне объяснимо. Амплитуда изменения разностей азимутов $a_z - a_s$ зависит от широты места наблюдения.

Выводы

1. Неправильность фигуры цапф пассажного инструмента Бомберга № 75464 в основном влияет на определение азимута горизонтальной оси.
2. За два года работы хромированные цапфы не изменили заметным образом свою форму, что дало возможность вводить поправки в наблюдения.
3. По наблюдениям двух лет замечены сезонные изменения разностей азимутов пассажного инструмента, определенных по звездам зенитной и южной зоны, которые являются следствием погрешностей прямых восхождений звезд каталога FK3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
Предисловие	3
Константинов А. И. Астрономическая система счисления времени	4
Панченко Н. И. и Федоров Е. П. Об определении координат полюса для нужд службы времени	39
Белоцерковский Д. Ю. О вычислении эталонного времени в средние моменты передачи радиосигналов	65
Белоцерковский Д. Ю. Исследование ходов четырех кварцевых часов	83
Федченко Ф. М. Астрономические часы с электромагнитным возбуждением колебаний маятника	92
Флеер А. Г. Аналитическое исследование процесса возбуждения свободного маятника	101
Тельпуховский Н. А. Электронная схема установки для подачи сигналов точного времени	108
Сопельников М. Д. Затухание колебаний маятника при различных давлени- ях воздуха	120
Орлова А. И. и Соловьева Л. А. Влияние неправильностей фигуры цапф пассажного инструмента на определение его азимута	128

Редактор изд-ва А. Л. Шевченко.

Техн. редактор А. Г. Каширина

Корректор В. М. Панова

T-04731
4,125 бум. листа.

Сдано в наб. 26/IV 1961 г.
8,25 п. л. 11,3 усл. п. л.

Попа. к печ. 20/IV 1962 г.
Тир. 3000 экз.

Тип. «Московский печатник», Москва, Ляляна пер., б. Зак. 950



