

УДК 520.9

А. Ф. Пугач, М. М. Медведский

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27**Фотоэлектронное устройство для регистрации
движения коромысла крутильных весов**

Изготовлено и опробовано фотоэлектронное устройство, позволяющее в автоматическом режиме с разными временами дискретизации отсчетов определять относительное угловое положение коромысла миниатюрных крутильных весов и сохранять результаты в компьютере. Проведены измерения, захватившие момент частного солнечного затмения 11 сентября 2007 г., которые подтвердили факт изменения положения коромысла в момент затмения, ранее установленный путем визуальной регистрации.

ФОТОЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РЕЄСТРАЦІЇ РУХУ КОРОМИСЛА КРУТИЛЬНИХ ТЕРЕЗІВ, Пугач О. Ф., Медведський М. М. — *Виготовлено і випробувано фотоелектронний пристрій, який дозволяє в автоматичному режимі визначати відносно кутове положення коромисла мініатюрних крутильних терезів та зберігати результати у комп'ютері щосекунди. Спостереження часткового сонячного затемнення 11 вересня 2007 р. підтвердили факт зміни положення коромисла у момент затемнення, раніше встановлений шляхом візуальної реєстрації.*

PHOTOELECTRONIC DEVICE FOR WATCHING THE MOTION OF TINY TORSION BALANCE BEAM, by Pugach A. F., Medvedskiy M. M. — *The photoelectronic device to watch the motion of tiny torsion balance beam was created and tested. The device allows one to determine automatically the relative angle position of tiny torsion balance beam and to save the data in computer. The measurements were performed which caught a moment of the partial solar eclipse on 11 September 2007. The measurements supported the fact of a change of the beam position in a moment of the eclipse which was previously established only during visual detection.*

ВВЕДЕНИЕ

Крутильные весы (КВ) применяются в физических исследованиях с 18 века, когда в 1785 г. французский физик Ш. Кулон установил названный его

именем закон взаимодействия электрических зарядов. С помощью крутильных весов английским физиком Кавендишем было определено значение гравитационной постоянной γ . Этот исключительно чувствительный прибор эффективно используется и в наше время для уточнения константы γ , но для повышения точности результатов используются весы со все большими значениями гравитирующих масс. Так, в одном недавнем швейцарско-американском эксперименте по уточнению величины γ подвижная часть весов (цистерна со ртутью) имела массу около 16 т [3].

Крутильные весы, используемые нами, чрезвычайно легкие. Автоматизировать процесс регистрации положения коромысла КВ и определить угол поворота коромысла в горизонтальной плоскости довольно сложно, поскольку к нему невозможно подсоединить обычно применяемые датчики (селесины, электрические или механические датчики). Даже идея мобильного зеркальца с посылаемым на него коллимированным световым лучом, по отражению которого можно было бы судить о повороте коромысла, оказалась мало плодотворной, поскольку световой импульс луча, посылаемого на зеркальце, в разных положениях создает разный крутящий момент, который трудно учесть.

В нашем распоряжении имелись две перспективные идеи: либо с помощью WEB-камеры экспонировать отсчетный лимб прибора со спроектированным на него изображением коромысла, а затем полученные в автоматическом режиме изображения расшифровывать и определять положение коромысла, либо использовать помещенную под коромыслом матрицу фотодиодов для определения положения тени от коромысла, создаваемой вертикальным световым пучком. Преимущество первого способа состоит в том, что при частоте 25 Гц он позволяет определять угол с погрешностью менее 1° . Его недостатки — сложность подключения к одному компьютеру нескольких камер, а также необходимость в использовании громоздкого программного обеспечения. Мы избрали второй вариант, который прост в изготовлении, имеет простое программное обеспечение, практически неограниченное количество подключаемых приборов на один компьютер. Его недостаток — невысокая точность определения угла ($360/n$, где n — количество используемых фотоприемников). Однако это ограничение не является принципиальным: увеличивая количество фотодиодов, можно повысить точность во много раз. В нашем же случае использование широкой стрелки позволяет вдвое увеличить точность при одном и том же количестве фотоприемников, т. е. $360/(2n)$.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Первые результаты наблюдений двух солнечных затмений с помощью крутильных весов представлены в работе [1]. Эти наблюдения состояли в визуальном отсчитывании угла положения коромысла весов, поэтому их нельзя считать полностью объективными. По этой причине решено было создать электронное устройство для автоматической и объективной регистрации положения коромысла весов в горизонтальной плоскости.

Описываемые КВ представляют собой тонкую соломинку длиной около 11 см, подвешенную на нити из кокона тутового шелкопряда. Диаметр нити около 40 мкм. Масса их подвижной части менее 0.5 г. Подвес не симметричен: на коротком плече коромысла подвешен небольшой свинцовый противовес, длинное плечо свободно. Коэффициент асимметрии приближается к

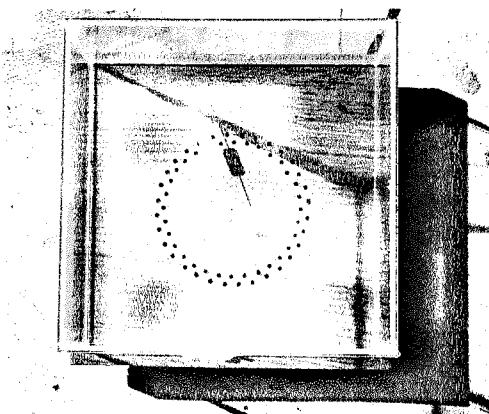


Рис. 1. Общий вид приемной части крутильных весов (регистрирующая часть не показана). Тень от лепестка, укрепленного на коромысле весов, отклонена в сторону из-за условий солнечного освещения. В рабочих условиях свет падает строго сверху

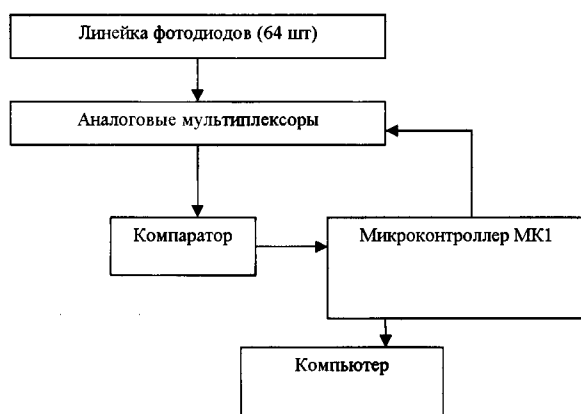


Рис. 2. Блок-схема электронной части прибора

значению 30. Вся подвижная часть помещена внутрь стеклянного сосуда прямоугольной формы, ребра которого, с целью герметизации, обработаны силиконовым герметиком и дополнительно проклеены липкой лентой. На нижней квадратной грани сосуда, по кругу, центр которого совпадает с центром квадрата и с точкой подвеса нити коромысла, расположены 64 фотодиода; угловое расстояние между ними составляет 5.62° (рис. 1).

Сверху над подвижной частью прибора находится источник света. Его вертикальное расположение исключает появление дополнительного момента силы, который влиял бы на положение коромысла в горизонтальной плоскости. Ширина тени коромысла выбрана такой, чтобы она была немного больше двойного расстояния между центрами фотодиодов, уменьшенного на величину диаметра фотодиода. В этом случае тень коромысла при своем круговом движении либо полностью перекрывает апертуру одного фотодиода, либо по частям проецируется на два соседних фотодиода. Анализируя количество затененных фотодиодов, можно увеличить разрешающую способность прибора в два раза. Это обстоятельство учитывается в дальнейшем при обработке результатов измерений. Блок-схема прибора представлена на рис. 2.

Работает измерительный модуль следующим образом:

- микроконтроллер МК1 переключает поочередно сигнал фотодиодов на вход компаратора;

- определяется порядковый номер первого затененного фотодиода;
- определяется количество затененных фотодиодов (1 или 2);
- номер фотодиода и количество затененных диодов выдается на внешний порт устройства;
- компьютер, подключенный к этому порту, читает информацию и декодирует в реальный угол.
- компаратор формирует сигнал стандартной амплитуды (ТТЛ), необходимый для фиксации номера затененного фотодиода микроконтроллером.

Весь цикл измерения занимает время около 70 мс. Таким образом, имеется возможность определять положение стрелки КВ с частотой до 10 Гц. Использование микроконтроллера в схеме измерения угла позволяет подключить к одному компьютеру практически любое количество аналогичных приборов. Это обстоятельство играет немаловажную роль. Теперь есть возможность поставить одновременные объективные наблюдения на нескольких приборах. Период считывания информации в компьютер задается программно (не чаще 10 Гц). В выходной файл записывается момент времени (используется компьютерная шкала времени), в который произведено измерение, и значение угла.

Для удобства настройки системы и повышения ее стабильности был минимизирован рассеянный свет внутри прибора. Внутренние поверхности покрывались черной бумагой, а между набором фотодиодов и источником света дополнительно устанавливались кольцевые и круговые диафрагмы для уменьшения рассеянного света.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью проверки работоспособности и надежности регистрирующей системы прибора в период с 10 по 12 сентября 2007 г. в ГАО НАНУ были проведены наблюдения с помощью КВ, снабженных фотоэлектронным регистрирующим устройством. Прибор был установлен на четвертом этаже административного здания ГАО вдали от людей и работающих приборов, однако в непосредственной близости от крутильных весов находился компьютер, обслуживающий их работу.

На рис. 3 приведены измеренные значения азимутов A , на которые указывал длинный конец коромысла, в зависимости от киевского времени T_K (в часах) и указаны даты. Нуль-пункт отсчетного устройства ориентировался на юг. Видно, что на протяжении длительного времени, приблизительно до 12 ч 11 сентября коромысло колебалось в пределах значений азимута $105\text{--}115^\circ$. Затем последовало существенное уменьшение угла на $25\text{--}30^\circ$ и возврат к прежнему положению, что в общей сложности заняло около 3.5 ч. А приблизительно в 16 ч 10 мин произошел скачкообразный поворот коромысла на 54° , после чего состояние КВ не изменялось 7.5 ч. Таким образом, 11 сентября 2007 г. в интервал времени продолжительностью около 4 ч прибор зарегистрировал значительные колебания коромысла с амплитудой в несколько десятков градусов.

Анализировать и интерпретировать эти результаты было бы очень сложно, если бы не опыт наших предшествующих наблюдений с крутильными весами. Как следует из работы [4], во время двух солнечных затмений, видимых в разных частях земного шара, КВ резко и существенно изменяли ориентацию коромысла, независимо от того, видимо ли данное

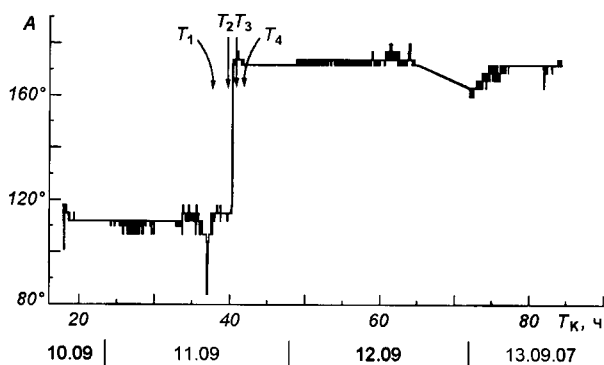


Рис. 3. Суммарный результат измерений в период с 10 по 13 сентября

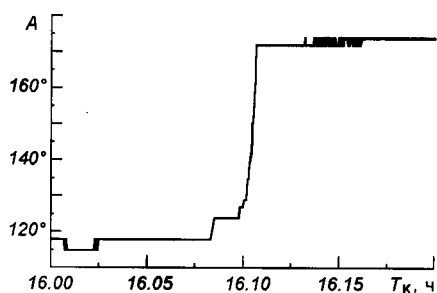


Рис. 4. Резкое изменение положения коромысла весов 11 сентября 2007 г. в период между максимальной фазой затмения и соединением Солнца и Луны по прямому восхождению

затмение в месте установки КВ. Исходя из этого, можно анализировать поведение коромысла прибора 11 сентября 2007 г. В этот день действительно имело место частное солнечное затмение, наблюдаемое в Южной Америке и в южной части Атлантики (начало частного затмения $T_1 = 13$ ч 25 мин 46 с (время — киевское); максимальная фаза затмения $T_2 = 15$ ч 31 мин 21 с; соединение по прямому восхождению $T_3 = 16$ ч 42 мин 43 с; конец частного затмения $T_4 = 17$ ч 36 мин 33 с).

На рис. 3 критические моменты T_1 , T_2 , T_3 и T_4 показаны стрелками. Очевидно, что основное значимое изменение положения стрелки коромысла произошло в интервал времени, ограниченный моментами $T_1 \dots T_4$, причем момент основного скачка в показаниях весов был очень близок к моменту T_3 — моменту соединения Солнца и Луны по прямому восхождению. Характерно также то, что предваряющий минимум наступил до момента T_1 . Такие опережающие экстремумы регистрировались нами ранее почти во всех наблюдениях затмений.

Поскольку в работе данного устройства предусмотрен режим записи отсчетов каждую секунду, представляет интерес рассмотреть характер быстрого движения коромысла в фазу его наибольшего углового перемещения. На рис. 4 представлен увеличенный фрагмент регистрограммы, отражающий поведение коромысла только в фазу его наиболее быстрого движения.

Видно, что весь процесс изменения положения коромысла на 54° занял всего 79 с. Такое быстрое движение коромысла прибора зарегистрировано впервые, хотя это совсем не означает, что подобные скачки отсутствовали в наших прежних наблюдениях. Дело однако в том, что при визуальных измерениях, которые были единственным методом регистрации до сих пор, такие быстрые движения зарегистрировать невозможно.

Таким образом, опробованная нами в реальных условиях схема фотоэлектронной регистрации показаний КВ проявила свою работоспособность, надежность и объективность.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Полученный с помощью фотоэлектронного устройства результат дал возможность подтвердить ранее полученный вывод о том, что в моменты солнечных затмений стрелка КВ изменяет положение в пространстве. Здесь мы не обсуждаем ни причины, ни механизм указанных воздействий. Цель данной публикации показать, что колебания коромысла крутильных весов во время солнечных затмений не связаны с присутствием наблюдателя, а являются отражением каких-то объективно существующих в природе сил и взаимодействий. Именно это показали измерения с использованием фотоэлектронного регистратора.

2. Тот факт, что большое по амплитуде и почти мгновенное изменение положения коромысла совпало по времени в тот день и в тот час, когда наблюдалось соединения Солнца и Луны по прямому восхождению, скорее всего указывает на то, что причина такой реакции КВ имеет астрономическую природу. Этот же вывод был получен из анализа наших предшествующих наблюдений.

3. Сравнение результатов настоящих наблюдений с результатами предшествующих наблюдений обнаруживает одно интересное обстоятельство. Наши прежние визуальные наблюдения показывали, что коромысло КВ очень редко находится в неподвижном состоянии. КВ настолько чувствительны к внешним воздействиям, что их показания почти все время изменяются с характерным временем десятков минут или часов. Причины этих флуктуаций многочисленны: это и температурные изменения окружающей среды, изменения внешних электрических и магнитных полей, наличие поблизости работающих компьютеров, людей, массивных скоплений металла, экранирование электропроводящими средами и так далее. Именно высокая чувствительность КВ ко многим внешним факторам приводит к тому, что их показания почти все время изменяются. Но, как следует из рис. 3, в наших наблюдениях имеются отдельные фрагменты, где отсчеты КВ оставались неизменными на протяжении многих часов.

Этот факт можно интерпретировать с тех позиций, что наличие рядом с КВ компьютера и работающей электронной аппаратуры создает сильный «сигнал-пьедестал», который подавляет другие шумовые факторы и удерживает положение коромысла в одном положении. И только лишь появление сильнейшего импульса во время солнечного затмения, намного превышающего по амплитуде «сигнал-пьедестал», выводит весы из временного равновесия. Если дело обстоит именно так, то дальнейшая работа по усовершенствованию системы фотоэлектронной регистрации будет направлена на снижение интенсивности сигнала-пьедестала до уровня, обеспечивающего адекватную регистрацию других сигналов.

Наблюдения солнечно-лунных затмений с целью изучения механизма их влияния на крутильные весы представляется нам перспективным направлением в науке, поскольку такие наблюдения могут дать новую информацию. Спектр воздействий солнечно-лунных конфигураций на физические приборы не ограничивается только их влиянием на КВ. Более полувека назад Аллья обнаружил, что во время полного солнечного затмения изме-

няется период колебания физического маятника, подвешенного на тонкой стальной проволоке длиной около метра [2]. В конце прошлого века группа китайских исследователей установила, что во время полного солнечного затмения скачком изменяется разность хода нескольких пар атомных часов, установленных вдоль полосы полного солнечного затмения 1992 г. [4]. Эти факты требуют объяснения. Одним из средств их исследования, как нам кажется, могут служить наблюдения с помощью КВ. До сих пор наблюдения с КВ не были полностью объективными, поскольку наблюдения основывались на визуальном снятии отсчетов. Этот метод мог давать искаженные результаты из-за присутствия самого наблюдателя возле прибора. Кроме того, метод требует привлечения большого количества наблюдателей для организации длительных наблюдений. Использование фотоэлектронного регистрирующего устройства описываемого типа позволит избежать этих трудностей и повысить достоверность измерений.

ВЫВОДЫ

Разработано и изготовлено действующее устройство, позволяющее непрерывно на протяжении неограниченного времени регистрировать положение коромысла крутильных весов. Полная независимость от наблюдателя, возможность снимать угловые отсчеты от 0 до 360° и возможность работать с разной частотой снятия отсчетов (от 3600 до 360 отсчетов в час) позволяют регистрировать как медленные, так и быстрые колебания коромысла, что делает такой прибор полезным и информативным инструментом исследования. Небольшая точность снятия отсчетов ($\pm 2.81^\circ$) не является принципиальным недостатком, поскольку амплитуда регистрируемых колебаний обычно составляет десятки градусов, что видно из приведенных выше рисунков.

Работа описываемого устройства в реальных условиях позволила объективно зарегистрировать факт изменения положения коромысла КВ в дату полного солнечного затмения в сентябре 2007 г. и тем самым независимо подтвердить то, что было известно из визуальных наблюдений за поведением крутильных весов в моменты других солнечных и лунных затмений. Кроме этого, зарегистрирован факт очень быстрого вращения коромысла с угловой скоростью около 0.7° в секунду, что со всей очевидностью показывает преимущества инструментальных наблюдений перед визуальными.

1. Пугач А. Ф., Медведский М. М., Перетятко Н. Н. и др. Первый опыт наблюдений солнечного затмения с помощью миниатюрных крутильных весов // Кинематика и физика небес. тел.—2008.—24, № 5.—С. 400—410.
2. Allias M. F. C. Mouvement du pendule paraconique et eclipse totale de Soleil du 30 juin 1954 // C. r. Acad. sci.—1957.—245.—P. 2001—2003.
3. Notling F., Schurr J., Schlamminger St., et al. Determination of the gravitational constant G by means of beam balance // Europhysics News.—2000.—31, N 4.
4. Zhou S. W., Huang B. J., Ren Z. M. The abnormal influence of the partial solar eclipse on December 24th, 1992, on the time comparison between atomic clocks // Nuovo cim. C.—1995.—18, N 2.—P. 223—236.

Поступила в редакцию 12.11.07