

Д.К. Давыдов, А.П. Плотников, Т.К. Складнева

Система слежения за интенсивностью прямой солнечной радиации с помощью актинометра

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 11.10.2000 г.

Описывается автоматическая система слежения за интенсивностью прямой солнечной радиации с помощью актинометра АТ-50. Представлены аппаратная и программная части системы. Приведены некоторые результаты измерений, демонстрирующие характеристики системы.

На базе автоматического (ТОР-станция) поста, созданного в ИОА СО РАН в 1992 г. [1], начиная с 1995 г. постоянно ведутся измерения суммарной солнечной радиации и радиационного баланса. Для более полного представления о радиационном режиме атмосферы в целом и факторах, его определяющих, желательно иметь данные о прямой солнечной радиации (S). Обычно эти измерения производятся вручную, с помощью актинометра АТ-50. Наведение прибора на Солнце осуществляется непосредственно самим оператором. Поэтому использовать актинометр в составе автоматического измерительного комплекса не представляется возможным.

В данной статье описывается автоматическая система слежения за интенсивностью прямой солнечной радиации с помощью актинометра АТ-50, работающего в составе ТОР-станции, и приводятся некоторые результаты измерений, демонстрирующие ее характеристики.

Система состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть представляет собой механизм наведения актинометра на Солнце, а также электронный блок для связи с ЭВМ. Наведение производится двумя шаговыми двигателями с редукторами. Один из них установлен внутри корпуса прибора (рис. 1) и является приводом подвижной платформы. Платформа, разворачиваясь вокруг собственной оси, перемещает актинометр по азимуту от 0 до 320° с точностью 0,25°. Второй шаговый двигатель установлен в верхней части платформы и служит для перемещения (поворота) актинометра по углу места от -20 до +90° с точностью 0,156°. В положениях актинометра 0 и 320° в основании, а также -20 и +90° в верхней части платформы установлены концевые выключатели для определения начального и конечного места его положения.

Электронный блок, установленный внутри корпуса, получая информацию от ЭВМ, управляет работой шаговых двигателей и отслеживает положение концевых выключателей. Управление прибором компьютер осуществляет при помощи платы расширенного ввода/вывода, которая обеспечивает двухстороннюю связь с вычислительным комплексом [2]. Подача питающего напряжения, управление и контроль прибора производится по 5-проводной линии: 1 – общая; 2 – напряжение питания (+ 12 В); 3 – управляющие импульсы на шаговый двигатель, устанавливающий угол по азимуту; 4 – управляющие импульсы на

шаговый двигатель, устанавливающий актинометр по углу места; 5 – сигнал «реверс» для обоих двигателей. Электронная схема разработана таким образом, что линии 3 и 4 выполняют двойную задачу. С одной стороны, по ним поступают управляющие импульсы. С другой стороны, на эти же линии, в промежутках между импульсами, подаются сигналы с концевых выключателей. Таким образом, учитывая то, что управление установкой происходит дистанционно, на достаточно большом расстоянии от ТОР-станции, получается реальная экономия соединительного кабеля.

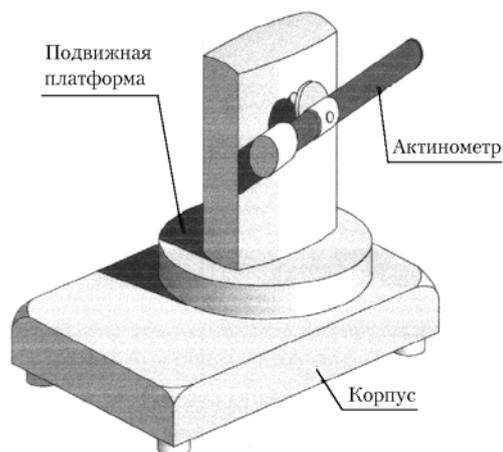


Рис. 1. Внешний вид прибора

Программное обеспечение состоит из трех основных модулей:

1. Расчет координат Солнца для данного места в заданное время.
2. Вычисление количества управляющих импульсов по азимуту и углу места.
3. Контроль и управление системой слежения за Солнцем.

Расчет точного местоположения Солнца является достаточно сложной задачей. В настоящее время известно большое количество формул для расчета основных астрономических величин. Многие из них сложны для расчета на персональном компьютере в реальном масштабе време-

ни, поэтому для вычисления местоположения Солнца использованы полуэмпирические формулы [3].

Азимут (A) и высота (h) Солнца определяются по формулам преобразования экваториальных координат в горизонтальные:

$$\operatorname{tg} A = \frac{\sin H}{\cos H \sin \varphi - \operatorname{tg} \delta \cos \varphi};$$

$$\sin H = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos H,$$

где H – местный часовой угол; φ – широта места наблюдения; δ – склонение Солнца.

Соответственно местный часовой угол находится по формуле уравнения времени, предложенной Смарттом [3]:

$$H = m - 12 - E,$$

где $m = t - N + 1 - 1$ для зимнего времени, $m = t - N + \lambda - 2$ для летнего времени (N – номер часового пояса; t – текущее время; λ – долгота места наблюдения); E – уравнение времени:

$$E = y \sin 2L - 2e \sin M + 4ey \sin M \cos 2L - \frac{1}{2} y^2 \sin 4L - \frac{5}{4} e^2 \sin 2M;$$

$$y = \operatorname{tg}^2 (\varepsilon/2),$$

где ε – наклон эклиптики; L – средняя долгота Солнца; e – эксцентриситет земной орбиты; M – средняя аномалия Солнца.

Склонение Солнца (δ) находится из следующей формулы:

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \theta.$$

Здесь θ – видимая долгота Солнца, исправленная на нутацию и аберацию:

$$\theta = L + C - 0,00569^\circ - 0,00479^\circ \sin \Omega;$$

$$\Omega = 259,18^\circ - 1934,142^\circ T,$$

где T – интервал времени, отсчитывается от эпохи 1990 г., январь 0,5 и измеряется в юлианских столетиях, содержащих 36525 эфемеридных суток; C – уравнение центра Солнца:

$$c = (1,91946^\circ - 0,004789^\circ T - 0,000014^\circ T^2) \sin M + (0,020094^\circ - 0,0001^\circ T) \sin 2M + 0,000293^\circ \sin 2M.$$

Средняя геометрическая долгота Солнца, средняя аномалия, эксцентриситет орбиты Земли и наклон эклиптики вычисляются по следующим полуэмпирическим формулам:

$$L = 279,69668^\circ + 36000,76892^\circ T + 0,0003025^\circ T^2;$$

$$M = 385,47583^\circ + 35999,04975^\circ T - 0,00015^\circ T^2 - 0,0000033^\circ T^3;$$

$$e = 0,01675104^\circ - 0,0000418^\circ T - 0,000000126^\circ T^2;$$

$$\varepsilon = 23,452294^\circ - 0,0130125^\circ T - 0,00000164^\circ T^2 + 0,000000503^\circ T^3 + 0,00256^\circ \cos \Omega.$$

Благодаря использованию вышеприведенной методики расчета местоположения Солнца, удалось полностью отказаться от применения справочных данных Астрономических эфемерид и получить достаточную точность вычислений. Сравнительные тесты вычислений по предложенной методике с известным пакетом астрономических программ Astro Meeus и данных Астрономических эфемерид показали, что погрешность вычислений по вышеприведенным формулам менее $10^{-3}\%$.

Расчет количества управляющих импульсов по азимуту и углу места производится по полуэмпирическим формулам, что позволяет избежать дополнительных погрешностей, связанных с установкой как самой системы, так и шаговых двигателей. Формулы определялись по следующей методике. В дни максимального солнцестояния по описанным выше соотношениям рассчитывались координаты Солнца и подсчитывалось необходимое количество управляющих импульсов по азимуту и углу места. Рассчитанные значения сопоставлялись с фактическими, которые определялись для установленной в рабочем положении платформы с наведенным на Солнце актинометром для этого же момента времени. Затем методом наименьших квадратов подбиралась формула расчета количества управляющих импульсов по азимуту и углу места.

Программа контроля и управления системой слежения за Солнцем работает в фоновом режиме, предоставляя максимум вычислительных ресурсов ЭВМ для расчета местоположения Солнца по предложенной методике. Минимальный квант времени ЭВМ типа IBM/PC хорошо согласуется с техническими требованиями по управлению шаговыми двигателями. Период между управляющими импульсами не должен быть менее 50 мс. Режим прерывания по таймеру, без дополнительного программирования микросхемы таймера 8253/8254, позволяет определить период между импульсами 55 мс. Программа построена таким образом, чтобы с интервалом 55 мс отслеживать сигналы от концевых микропереключателей и в соответствии с вычисленными координатами Солнца управлять шаговыми двигателями [4].

Программное обеспечение системы слежения за Солнцем полностью написано на языке программирования Турбо-Паскаль 7.0 с небольшими фрагментами на языке Ассемблер [5].

Временная диаграмма режима работы измерительной системы слежения за Солнцем приведена на рис. 2.

Изначально актинометр находится в нулевом положении, что соответствует координатам 0 и -20° по азимуту и углу места соответственно. Программа рассчитывает координаты места положения Солнца в момент времени начала измерений и определяет количество управляющих импульсов для обоих двигателей, далее производится наведение актинометра на Солнце. Так как измерения проходят в течение 10 мин, то происходит постоянная подстройка прибора в связи с изменением координат места положения Солнца во времени. По окончании измерений актинометр возвращается в исходное положение.

При организации измерений прямой солнечной радиации в автоматическом режиме возникает еще одна проблема, связанная с наличием облачности в реальной атмосфере. При «ручном» способе измерений оператор, когда диск Солнца закрыт облаками, не проводит наблюдений с помощью актинометра. При автоматическом режиме работы без оператора отслеживать закрытость диска Солнца затруднительно, поэтому приходится разрабатывать особые методы регистрации прямой радиации для автоматического способа измерений.



Рис. 2. Временная диаграмма режима работы актинометра

В нашем случае это делается следующим образом. Для исключения влияния облачности на измерение прямой солнечной радиации проводятся ежесекундные измерения S в течение 10 мин. При этом определяются среднее и максимальное значения. В условиях переменной облачности за редким исключением максимальные значения соответствуют интенсивности прямой солнечной радиации при безоблачном небе. Это иллюстрируется на рис. 3, где показан суточный ход суммарной и прямой радиации на горизонтальную поверхность 12 августа 2000 г., когда в сроки 14, 17 и 18 ч наблюдалась переменная облачность. Из рисунка видно, что максимальное значение S соответствует прямой солнечной радиации при безоблачном небе, а среднее значение S отражает наличие облачности в данные сроки наблюдения. В результирующий текстовый файл записываются средняя и максимальная интенсивности прямой солнечной радиации за 10 мин измерения, а также их значения, пересчитанные на горизонтальную поверхность. В условиях сплошной облачности измерения не проводятся.

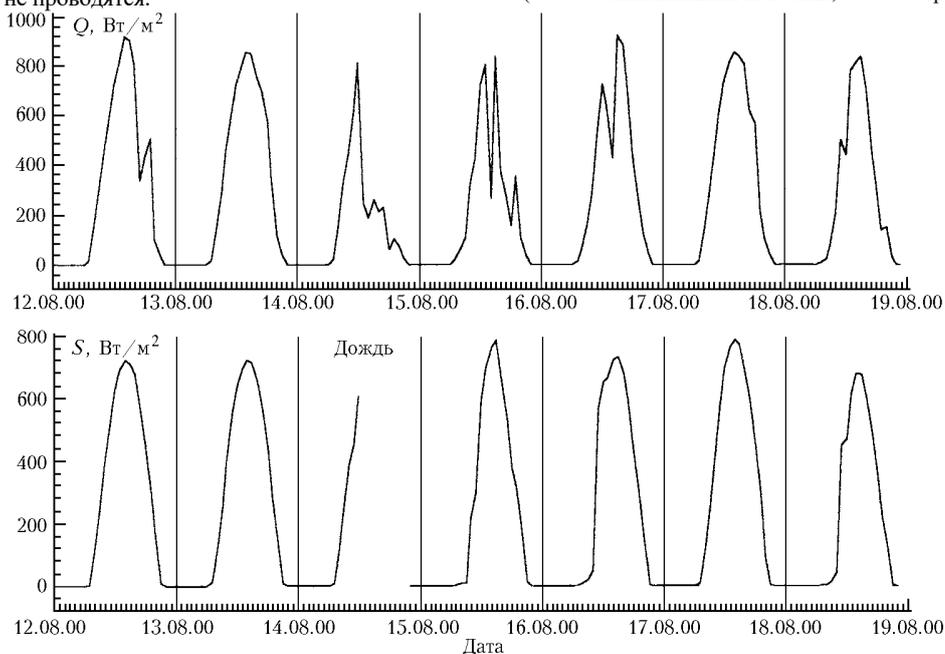
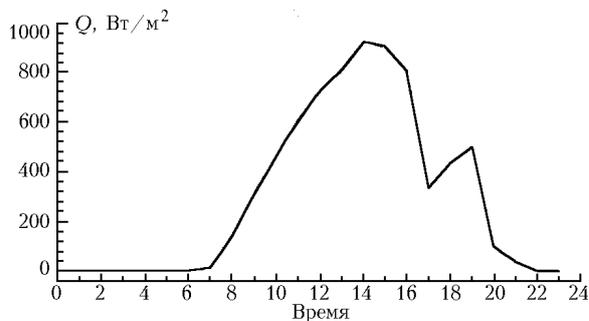
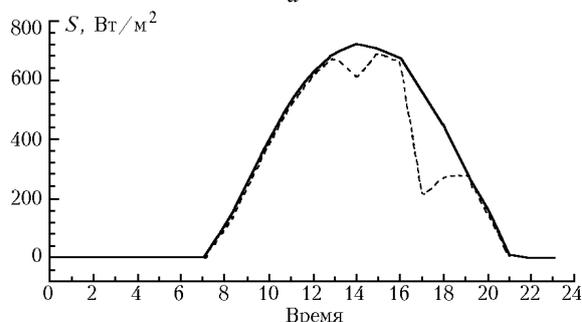


Рис. 4. Интенсивность суммарной (Q) и прямой (S) радиации на горизонтальную поверхность в августе 2000 г.

Как работает система слежения в мониторинговом режиме, можно судить по рис. 4, где показаны результаты измерения интенсивности суммарной и прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность в августе 2000 г. В ясные дни интенсивность прямой солнечной радиации на горизонтальную поверхность достигала $700\text{--}800\text{ Вт/м}^2$. Наличие облаков в отдельные сроки наблюдения приводит к уменьшению интенсивности прямой солнечной радиации на несколько порядков.



а



б

Рис. 3. Суточный ход суммарной (а) (— — Q) и прямой радиации на горизонтальную поверхность (б) 12 августа 2000 г. (— — S максимальная за 10 мин, - - - - S средняя за 10 мин)

Поскольку регулярных измерений прямой радиации в районе г. Томска ранее не проводилось, то представляет интерес сравнить полученные результаты с опубликованными данными на близлежащих станциях. Эти данные представлены в таблице, из которой видно, что результаты наших измерений согласуются с многолетними наблюдениями З.И. Пивоваровой [6] для отдельных сроков наблюдения. Месячная сумма прямой солнечной радиации в районе Томска в августе составила 368 МДж/м², что близко к средней месячной сумме прямой солнечной радиации в августе для станции «Огурцово» – 393 МДж/м² [7].

Интенсивность прямой солнечной радиации, Вт/м², поступающей на горизонтальную поверхность на широте 56° [6], и на TOR-станции при безоблачном небе в августе

Срок наблюдения (ч, мин)	Широта 56°	TOR-станция
9 ³⁰	516,52	459,28
12 ³⁰	621,22	658,35
15 ³⁰	404,84	506,74

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 00-05-72014.

1. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский и др. // Метеорология и гидрология. 1999. № 3. С. 110–118.
2. Белан Б.Д., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В. // Приборы и техника эксперимента. 1999. № 1. С. 156–157.
3. Меес Ж. Астрономические формулы для калькуляторов: Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 168 с.
4. Фролов А.В., Фролов В.Г. Аппаратное обеспечение IBM PC: В 2 частях. Ч. 1. М.: «ДИАЛОГ–МИФИ», 1992. 208 с.
5. Фаронов В.В. Турбо-Паскаль (в 3 книгах). Кн. 1. Основы Турбо Паскаля. М.: Учебно-инженерный центр «МВТУ–ФЕСТО ДИДАКТИК», 1992. 304 с.
6. Пивоварова З.И. Радиационные характеристики климата СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 335 с.
7. Пивоварова З.И., Стадник В.В. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 291 с.

D.K. Davydov, A.P. Plotnikov, T.K. Sklyadneva. The system of actinometric tracking the direct solar radiation.

The automated system of tracking the intensity of direct solar radiation, using the actinometer AT-50, is described. The system's hard-ware and soft-ware are presented. Some measurements are given, which demonstrate the system's characteristics.