

## АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 535.243+551.508.953

Д.М. Кабанов, С.М. Сакерин, С.А. Турчинович

# Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы)

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 5.11.2001 г.

Приводится описание многоволнового солнечного фотометра для круглогодичных автоматизированных измерений прозрачности атмосферы в диапазоне спектра 0,37–4 мкм. Измерительный комплекс позволяет определять аэрозольные оптические толщи (АОТ), влагосодержание атмосферы, прямую и суммарную радиацию. Рассматриваются методические вопросы автоматизации эксперимента, калибровки фотометра и расчета АОТ атмосферы.

### Введение

Метод солнечной фотометрии атмосферы имеет богатую историю и хорошо известен в атмосферно-оптических исследованиях. С помощью этого метода возможно: 1) измерение прямой радиации в различных участках спектра; 2) в «окнах прозрачности» атмосферы – определение аэрозольной оптической толщи (АОТ); 3) в полосах поглощения газов (дифференциальная методика) – определение их общего содержания в атмосфере; 4) измерение угловых и поляризационных характеристик рассеянного света. Кроме того, путем решения обратной задачи можно восстановить микрофизические характеристики аэрозоля.

Важным этапом развития метода стала организация мониторинга АОТ атмосферы и общего содержания озона на сети станций, действующих под эгидой ВМО и оснащенных стандартными солнечными фотометрами (среди современных – MS-115 (Япония), SPUV-6 (США), PFR (Швейцария) и др.). Единобразные методики наблюдений и обработки данных позволили получить многочисленную информацию о вариациях прозрачности атмосферы в области спектра 0,37–0,87 мкм в различных районах планеты. (К сожалению, в последние годы сетевые наблюдения на территории России фактически прекратились). Наряду с сетевыми фотометрами в научных организациях разрабатываются приборы для решения более широкого круга задач за счет расширения спектрального диапазона, измерения угловых характеристик рассеянного излучения и др.

Метод солнечной фотометрии имеет такие достоинства, как простота и информативность, но необходимо отметить, что его реализация возможна только в периоды, когда Солнце не закрыто облаками. Этот недостаток ограничивает широкое использование метода и возможности автоматизации эксперимента, особенно при круглогодичном мониторинге. Основные функции солнечного фотометра (наведение на Солнце, смена светофильтров (или сканирование

спектра), регистрация сигналов) относительно легко реализовать технически, но принятие решения о начале (окончании) измерений без участия оператора затруднено. Использование в экспериментальных исследованиях компьютерных технологий открывает возможность для преодоления и этой трудности.

В данной статье представлено описание многоволнового солнечного фотометра SP-4м, предназначенного для автоматизированных круглогодичных измерений прозрачности атмосферы в широком спектральном диапазоне. Кроме того, авторы сочли целесообразным обобщить методические вопросы калибровки и измерений, часть из которых не были изложены в предшествующих статьях [1, 2].

### 1. Устройство солнечного фотометра

При разработке солнечного фотометра SP-4м (рис. 1, 2) учитывались опыт эксплуатации и отдельные технические решения предшествующих образцов [2, 3]. Солнечный фотометр состоит из двух отдельных частей, соединенных кабелем. Оптико-электронный блок фотометра на двухкоординатном (азимут/зенит) поворотном столе устанавливается снаружи. В помещении располагаются блок питания и дистанционного управления, компьютер, аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи (АЦП/ЦАП). Фотометр включает в себя три измерительных канала, съюстированных в одном направлении, – коротковолновый (КВ) канал с кремниевым фотодиодом, длинноволновый (ДВ) канал с пироэлектрическим детектором и встроенный актинометр М-3. В состав измерительного комплекса входят также пиранометр ПП-1 с устройством дистанционного открытия защитного кожуха [4] и датчик освещенности (обычный фотодиод с рассеивающей насадкой), которые устанавливаются рядом с фотометром. Стандартные актинометрические приборы М-3 и ПП-1 предназначены для измерений прямой и суммарной солнечной радиации в спектральном диапазоне ~ 0,3–3 мкм.

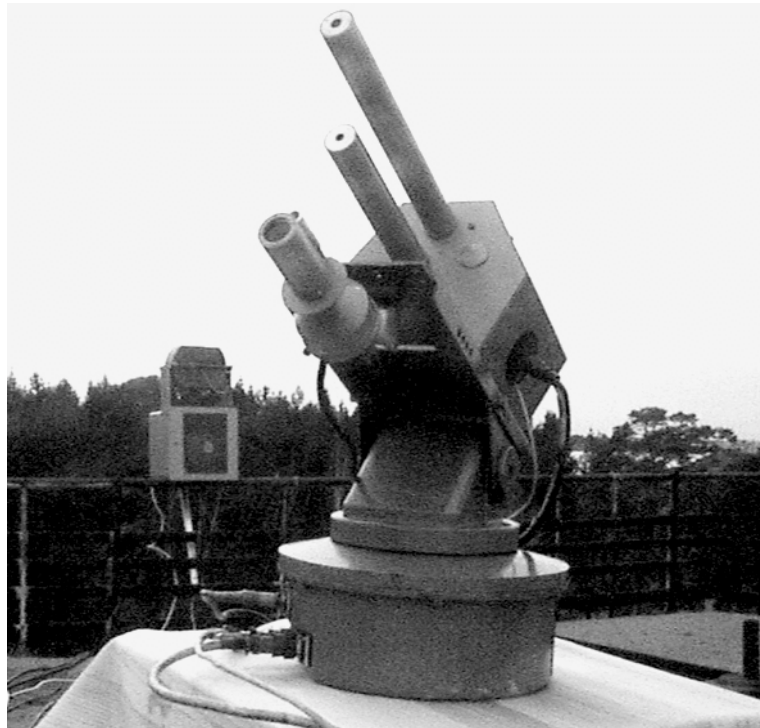


Рис. 1. Внешний вид солнечного фотометра SP-4м

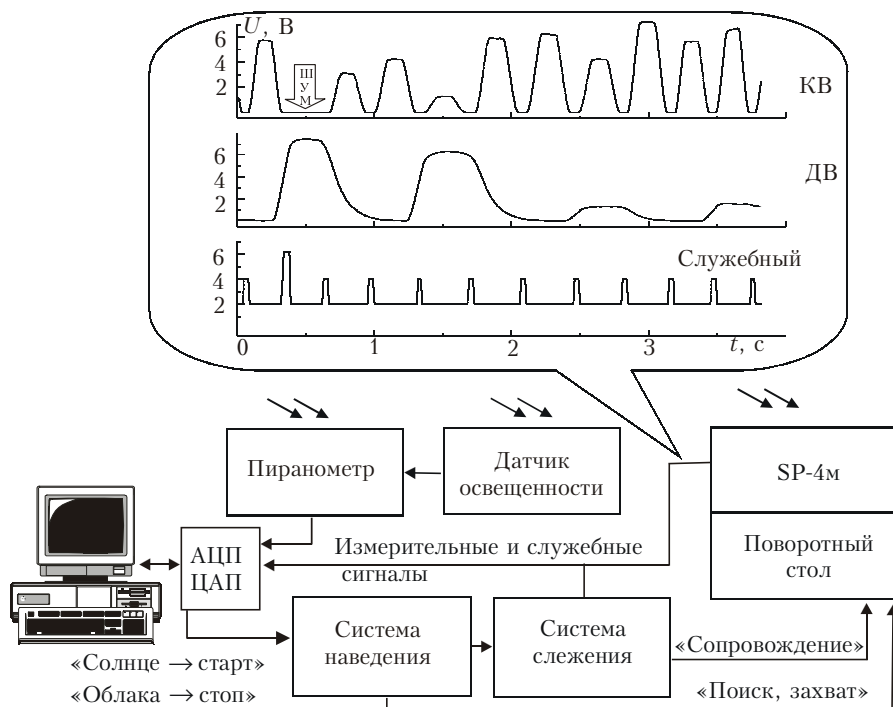


Рис. 2. Состав измерительного комплекса и условная схема работы (на вставке – эшора служебных и измерительных сигналов)

Оптические схемы измерительных каналов – безлинзовые, углы поля зрения формируются полевыми диафрагмами, установленными в блендах перед входными окнами. Спектральная селекция солнечного излучения осуществляется с помощью интерференционных фильтров, установленных в непрерывно вращающемся барабане. При пересечении оптических

осей очередными фильтрами электронной схемой с оптронными парами вырабатываются служебные сигналы, которые позволяют в дальнейшем рассортировать сигналы прозрачности по длинам волн. Для постоянного контроля шумов и возможных засветок вместо одного из фильтров установлена заглушка. В ДВ-канале проходящее излучение сначала модулируется

электромеханическим модулятором со схемой стабилизации, а затем усиливается селективным усилителем и детектируется. Измерительные и служебные сигналы передаются по экранированному кабелю на АЦП и регистрируются на компьютере.

Для снижения влияния внешних воздействий (влажность, температура, электромагнитные наводки) оптико-электронный блок размещен в двойном кожухе. Внутренний влагозащитный корпус имеет схему термостатирования и обогрева входных окон. Наружный кожух служит для защиты от осадков и дополнительного обогрева фотометра в зимних условиях. Основные характеристики разработанного фотометра приведены в табл. 1.

Отличительная особенность методики [1] состоит в том, что исключение молекулярного поглощения и рассеяния осуществляется на начальном этапе – путем деления измеренных сигналов на функции пропускания  $T_{\Delta\lambda}^j$  для каждого  $j$ -го спектрального канала.

Функции пропускания  $T_{\Delta\lambda}^j$  рассчитываются по модели LOWTRAN-7 [5] с учетом реальной изменчивости переменных газовых компонент ( $H_2O$ ,  $O_3$ ) и спектральной аппаратной функции фотометра  $A_\lambda$  (спектров Солнца, пропускания фильтров и входных окон):

$$T_{\Delta\lambda}^j = \left( \int A_\lambda T_\lambda^W T_\lambda^X T_\lambda^C T_\lambda^R d\lambda / \int A_\lambda d\lambda \right). \quad (2)$$

Таблица 1

Характеристики солнечного фотометра SP-4м		
Характеристика	КВ-канал	ДВ-канал
Центральный угол поля зрения, град	1,38	1,48
Количество длин волн	10	4
Максимумы полос пропускания светофильтров, мкм	0,371; 0,408; 0,438; 0,475; 0,500; 0,547; 0,675; 0,871; 0,938; 1,052	1,246; 1,557; 2,20; 3,97
Полуширина пропускания светофильтров, нм	5–12	15–40
Тип фотоприемника	ФД-24к	МГ-32
Погрешность фотометрирования, %	0,3	0,7
Погрешность слежения за Солнцем, град	0,2	
Время измерения «спектра» (1 об. барабана), с	5	
Диапазон углов наведения (зенит/азимут), град	90×300	
Температура термостата, °С	32 ± 0,3	
Диапазон окружающих температур, °С	-50 ÷ 35	
Общая масса фотометра (оценка), кг	30	
Измеряемые характеристики (диапазон/погрешность):		
аэрозольная оптическая толщина;	0 – 1/0,01	
влагосодержание атмосферы, г/см <sup>2</sup> ;	0 – 6/0,07	
прямая, суммарная, рассеянная радиация, Вт/м <sup>2</sup>	0 – 1500/6%	

## 2. Методика калибровки и определения АОТ

Используемая нами методика определения АОТ уже рассматривалась [1], поэтому ограничимся ее краткой характеристикой, а основное внимание уделим вопросу калибровки.

Как известно, метод солнечной фотометрии основывается на законе Бугера–Ламберта, который связывает измеряемую прямую солнечную радиацию с прозрачностью атмосферы:

$$U_\lambda = \rho U_{0\lambda} T_\lambda^\Sigma = \rho U_{0\lambda} T_\lambda^W T_\lambda^X T_\lambda^C \exp[-M(\tau_\lambda^R + \tau_\lambda^A)], \quad (1)$$

где  $M(Z)$  – оптическая масса атмосферы для зенитного угла Солнца  $Z$ ;  $\rho$  – корректирующая поправка на годовое изменение расстояния до Солнца;  $U_\lambda$  – измеряемые сигналы прямой радиации на различных длинах волн  $\lambda$ ;  $U_{0\lambda}$  – внеатмосферные значения сигналов (калибровочные константы);  $T_\lambda^\Sigma, T_\lambda^W, T_\lambda^X, T_\lambda^C$  – функции пропускания атмосферы (общая, водяного пара, озона и «постоянных» газов соответственно);  $\tau_\lambda^R$  – оптическая толщина молекулярного (рэлеевского) рассеяния;  $\tau_\lambda^A$  – аэрозольная оптическая толщина.

Общее представление о величине молекулярного поглощения и рассеяния в различных ( $j$ -х) спектральных каналах дает табл. 2, где приведены оптические толщины  $\tau_j^G = \ln T_{\Delta\lambda}^j$  для лета умеренных широт при  $M = 1$ .

После перехода к «аэрозольным» сигналам  $Y_\lambda^j = U_\lambda / T_{\Delta\lambda}^j$  осуществляется калибровка (см. ниже) и определяются искомые значения АОТ атмосферы:

$$\tau_\lambda^A = M^{-1} \ln(U_{0\lambda} / Y_\lambda^j). \quad (3)$$

Обратим внимание, что функции пропускания отдельных компонент атмосферы вместе со своими оптическими массами  $M_i$  рассчитываются отдельно. Поэтому рассмотренная методика дает возможность относительно просто расширить диапазон измерений до больших зенитных углов с учетом индивидуальной зависимости  $M_i(Z)$  [6].

Погрешность определения  $\tau_\lambda^A$  в значительной степени зависит от тщательности калибровки. Суть калибровки состоит в экстраполяции зависимостей  $\ln U_\lambda = f(M)$  к массе  $M = 0$  [7] (метод Бугера). Улучшением и развитием новых методик определения  $U_{0\lambda}$

Таблица 2

Оптические толщи $\tau_j^G$ и $\tau_\lambda^R$ для солнечного фотометра SP-4м													
$\lambda$ , МКМ	0,371	0,408	0,438	0,475	0,500	0,547	0,675	0,871	1,052	1,246	1,557	2,20	3,97
$\tau_j^G$	0	0	0,002	0,005	0,010	0,026	0,032	0,082	0,044	0,053	0,060	0,188	0,217
$\tau_\lambda^R$	0,499	0,328	0,244	0,175	0,143	0,102	0,042	0,014	0,008	0,003	0,001	0	0

занимались большинство исследователей прозрачности атмосферы [8–10 и др.]. Напомним, что для выполнения калибровки необходим выбор измерительных дней, удовлетворяющих условиям стабильной атмосферы, высокой прозрачности и большого диапазона оптических масс. При массовых многоволновых измерениях процесс «ручного» отбора данных и построения калибровочных графиков [7] (пример см. на рис. 3) становится затруднительным. Поэтому была разработана итерационная методика расчета  $U_{0\lambda}$  [11].

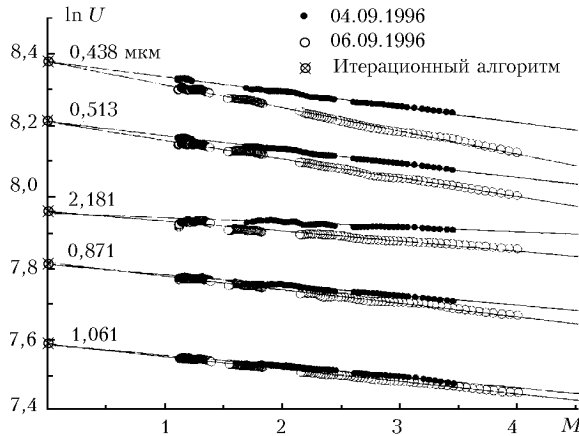


Рис. 3. Иллюстрация калибровочных прямых, построенных методом Бутера (точками на оси ординат показаны значения  $U_{0\lambda}$ , рассчитанные итерационным методом)

Алгоритм основывается на том, что в ситуациях высокой прозрачности атмосферы должна быть минимальная зависимость  $\tau_\lambda^A$  от времени дня и оптической массы. Вариации  $\tau_\lambda^A$  при ее минимальных значениях становятся сравнимы с погрешностями измерений. В этом случае искомое  $U_0^*$  и истинное  $U_0$  значения калибровочных констант можно связать соотношением  $U_0^* = U_0(1+k)$  и при выборе  $U_0^*$  использовать регрессионное уравнение

$$\tau^* = v + (\varepsilon \pm \delta_\varepsilon) M^{-1}, \quad (4)$$

где параметры  $\varepsilon$  и  $\delta_\varepsilon$  соответствуют систематической и случайной ошибкам подбора  $U_0$ .

Качество подбора  $U_0^*$  определялось в диалоговом режиме по виду выводимой на экран монитора зависимости  $\varepsilon(\tau_i^*)$ , где  $\tau_i^*$  – переменная верхняя граница подмассива оптических толщ ( $\tau^* < \tau_i^*$ ), по которому рассчитывается параметр  $\varepsilon$ . Критерием служила сходимость к нулю значений  $\varepsilon(\tau_i^*)$  при уменьшении  $\tau_i^*$ . Для исключения субъективности «диалоговой» методики в дальнейшем был разработан

алгоритм, основанный на формализованном критерии выбора  $U_0^*$ . При расчете используются величины

$$\Theta = \sum_{j=1}^{10} |\varepsilon(\tau_j^*)|, \quad \delta_\Theta = \sqrt{\sum_{j=1}^{10} \delta_\varepsilon^2(\tau_j^*)}, \quad (5)$$

где параметр  $\varepsilon$  определяется по подмножеству  $\tau_{\min}^* \leq \tau^* \leq \tau_j^*$ ,  $\tau_j^* = \tau_{\min}^* + 0,005j$  при условии, что количество экспериментальных точек, попадающих в подмножество, больше пяти.

Характер зависимостей  $\Theta(U_0^*)$  и  $\delta_\Theta(U_0^*)$  показан на рис. 4. Уменьшение рассматриваемых значений  $\Theta(U_0^*)$  и  $\delta_\Theta(U_0^*)$  соответствует приближению величины  $U_0^*$  к истинному  $U_0$ .

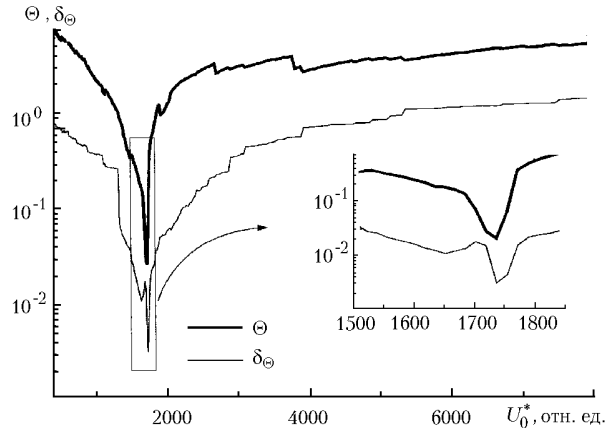


Рис. 4. Пример зависимостей  $\Theta(U_0^*)$  и  $\delta_\Theta(U_0^*)$ , получаемых при итерационной калибровке

Наиболее точному подбору  $U_0^*$  соответствуют минимумы  $\Theta$  и  $\delta_\Theta$ . Точность разработанного алгоритма проверялась на ранее полученном массиве данных во время морской экспедиции 1994 г. В этом случае была возможность провести сравнение калибровок, рассчитанных не только по диалоговому варианту [11], но и по традиционной методике [7], примененной к результатам контрольных измерений в горных условиях (на территории Тенерифской астрофизической обсерватории с высоты 2,38 км). Наблюдения в горах, как известно, обеспечивают наиболее надежную калибровку. Сопоставление значений  $U_{0\lambda}$ , полученных разными методами (см. рис. 3, табл. 3), показывает, что отличие не превышает  $\pm 0,3\%$ .

Результаты еще одной проверки алгоритма (для 1996 г.) представлены табл. 4 в виде относительных величин отличия калибровочных сигналов  $\Delta_i = (U_{00} - U_{0i})/U_{00}$ , где индексами обозначены следующие варианты расчета  $\Delta_i$ : 0 – итерационный

Таблица 3

Сравнение калибровочных констант, рассчитанных различными методами

$\lambda$ , мкм	0,369	0,408	0,423	0,438	0,484	0,514	0,553	0,637	0,673	0,871	1,061
Метод Бугера	1659	2232	2460	2294	2468	2182	1734	942	1733	1410	799
Диалоговый алгоритм (4)	1650	2229	2450	2285	2482	2190	1730	–	–	–	–
Итерационный алгоритм (5)	1659	2223	2456	2286	2480	2186	1733	942	1731	1405	797
Различие $U_{0\lambda}$ , $\pm$ %	0,27	0,20	0,20	0,20	0,28	0,18	0,12	0	0,06	0,17	0,25

Таблица 4

Отличие калибровочных сигналов  $\Delta_i$ , %, рассчитанных для разных вариантов

Вариант	0,369	0,408	0,423	0,438	0,484	0,514	0,553	0,637	0,673	0,871	1,061	2,18	4,0
1	-0,48	0,29	0,19	0	0	-0,19	-0,91	0	-0,19	-0,57	0,38	1,19	0
2	0,72	0,10	-0,29	-0,29	0,48	0,38	0,71	0	0,10	0,19	-0,10	-0,67	-0,96
3	0	0,67	-0,09	0,19	0,10	-1,16	0,58	-0,96	-0,96	-0,67	-0,48	0,19	0,29
4	-0,78	0,30	-0,25	0,42	-0,93	0,04	-0,30	-0,06	0,04	-0,35	-0,86	-0,34	0,01
5	-0,16	0,48	0,07	-0,01	0,06	-0,41	0,87	-0,39	-0,42	-0,78	0,16	-0,65	-0,34

алгоритм, примененный для всего массива данных; 1, 2 – для до- и послеполуденных измерений; 3, 4 – для первой и второй половины экспедиционного периода; 5 – калибровка методом Бугера. Из табл. 4 видно, что средняя величина отклонения от основного варианта ( $U_{00}$ ) во всем спектральном диапазоне составляет  $\pm 0,5\%$ . Кроме того, из сравнения вариантов 3 и 4 можно сделать вывод о достаточно стабильной чувствительности фотометра за несколько месяцев наблюдений.

Таким образом, с разработкой итерационного алгоритма (5) процедура калибровки была существенно упрощена. Условием для ее реализации является накопление достаточно продолжительного ряда наблюдений с ситуациями высокой прозрачности атмосферы. Поэтому основное требование к эксперименту состоит в обеспечении долговременной стабильной работы солнечного фотометра в сложных условиях воздействия окружающей среды.

### 3. Система ориентации фотометра и автоматизации измерений

Методика эксперимента заключается в ориентации фотометра на открытое от облачности Солнце в процессе его движения по небосводу и измерении прямого излучения на разных длинах волн. С точки зрения автоматизации наиболее сложными являются определение ситуаций, когда Солнце не закрыто облачностью, и пространственная ориентация фотометра.

В практике автоматизированных измерений применяются два метода наведения приборов на Солнце – «астрономический» и «оптико-локационный». В первом случае ориентация производится в направлении расчетной траектории движения Солнца (см. например, [12, 13]). Вторым методом является экспериментальным, и наведение фотометра осуществляется на реально наблюдаемое Солнце с помощью специальных оптико-электронных устройств. Не останавливаясь на анализе двух подходов, отметим, что в полевых и мобильных условиях «локационный» способ является более предпочтительным.

Разработанная система наведения и слежения за Солнцем является результатом развития предшествующих устройств [2, 3]. В ее состав входят четыре фотодиода схемы грубого наведения и четырехсекторный фотодиод ФД-142 схемы точного слежения, которые размещены в общем корпусе. Еще один фотодиод – «центральный», осуществляет переключение управления от одной схемы к другой. Четырехсекторный фотодиод установлен в фокусе линзы, а фотодиоды грубого наведения развернуты друг относительно друга для увеличения общего поля обзора. Оптические оси двух систем совмещены таким образом, что после работы схемы грубого наведения Солнце оказывается в поле зрения линзовой системы точного слежения. Управление электроприводами поворотного стола осуществляется с помощью электронных схем разностных сигналов, поступающих от датчиков грубого или точного наведения. Кроме того, схемой предусмотрено ручное наведение фотометра, которое осуществляется с пульта управления. Положение Солнца относительно направления визирования контролируется по четырем светодиодам – «вверх», «вниз», «влево», «вправо».

Для решения второй задачи – определение факта «безоблачного Солнца», используется пиранометр со специальным алгоритмом компьютерной обработки результатов непрерывных измерений суммарной радиации. Ранее уже обсуждались возможности повышения информативности пиранометрических измерений [14]. Один из таких подходов был применен в рассматриваемом устройстве.

При анализе дневных распределений суммарной радиации, накопленных для различных сезонов и атмосферных условий, было выявлено, что общее поле регистрируемых значений достаточно определенно разделяется на две зоны (рис. 5). Как показали параллельные инструментально-визуальные наблюдения, область более высоких значений радиации I соответствует открытому от облачности Солнцу при различной прозрачности атмосферы, а зона низких значений II характеризует облачные ситуации. Следовательно, линию раздела двух зон можно использовать в качестве

ве порогового значения  $Q_n(h)$  для принятия решения о наличии в области Солнца облачности. С учетом отмеченного был разработан простой алгоритм, заключающийся в постоянном сравнении измеряемой радиации  $Q_i(h)$  с порогом  $Q_n(h)$  для рассчитанной высоты Солнца  $h$ . Эффективность выбранной методики была проверена и подтверждена в процессе многомесячной опытной эксплуатации комплекса.

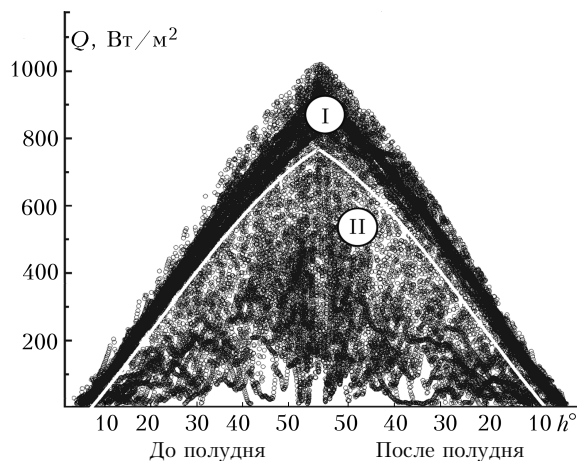


Рис. 5. Общее поле дневных распределений суммарной радиации

Общий алгоритм автоматизированной работы фотометра поясняется рис. 2:

- при восходе Солнца датчик освещенности «открывает» защитный кожух пиранометра и «запускает» программу измерений суммарной радиации;
- при «безоблачном Солнце» ( $Q_i > Q_n$ ) компьютером принимается соответствующее решение и сигнал от ЦАП включается система поиска Солнца (грубого наведения);
- при попадании Солнца в поле зрения «центрального» фотодиода управление поворотным столом переключается на схему точного слежения, включается солнечный фотометр и на компьютере «запускается» программа измерений спектральной прозрачности атмосферы (дополнительно к суммарной);
- при появлении облачности по служебному сигналу ЦАП отключается режим измерений прозрачности и фотометр на поворотном столе переводится в дежурное положение – «вниз – на юг» (необходимо для облегчения последующего процесса поиска Солнца и защиты входной оптики от осадков);
- при заходе Солнца датчик освещенности «отключает» программу измерений и «закрывает» защитный кожух пиранометра.

Процедура измерения сигналов  $U_\lambda$  в фотометрах данного типа имеет особенность, так как осуществляется при непрерывном вращении барабана с интерференционными фильтрами. В процессе работы одновременно со сменой длин волн происходит модуляция светового потока (см. вставку на рис. 2). Искомым сигналам в различных спектральных участках соответствуют максимумы амплитуд в последовательности

импульсов, а промежуточные значения относятся к переходному процессу смены фильтров. Кроме того, в процессе реальных измерений возможны кратковременные уменьшения сигналов из-за попадания в поле зрения облачности или неточности работы следящей системы. В результате максимумы регистрируемых амплитуд импульсов не всегда могут достигать своего истинного значения. Действительное – максимальное значение сигнала будет только в моменты, когда центры светофильтров находятся на оптической оси фотоприемника, последняя ориентирована точно на Солнце и в поле зрения не попадает облачность.

Применение традиционного усреднения сигналов в рассмотренной схеме регистрации было бы неправильным. Поэтому оптимальной была признана следующая процедура обработки исходных сигналов:

1) при пересечении очередным светофильтром оптической оси проводится опрос АЦП и выбирается максимальный замер  $U'_\lambda$ ;

2) полученные значения  $U'_\lambda$  для каждой длины волны накапливаются в течение 10 оборотов барабана фильтров (по времени менее 1 мин) и из них снова выбирается максимальный сигнал  $U''_\lambda$ ;

3) после определения сигналов  $U''_\lambda$  проводится привязка замеров к текущему времени. Указанные процедуры осуществляются компьютерной программой (см. ниже).

Обработка данных с выбором максимальных замеров может приводить к ложным результатам при больших шумах фотометра, но в данном случае отношение «сигнал-шум», как правило, составляет не менее 100. Опыт эксплуатации фотометров типа SP [2, 3] подтвердил эффективность применения описанного алгоритма измерений даже в наиболее сложных условиях – фотометрировании солнечного излучения в небольших, быстроменяющихся разрывах облачности.

#### 4. Программное обеспечение

Автоматизация измерений, предварительная обработка данных и контроль за работой фотометра обеспечиваются пакетом программ – «измерение», «редактирование», «тестирование». (Содержание большинства процедур рассматривалось выше).

Измерительная программа (рис. 6) предназначена для обработки информации, поступающей с КВ, ДВ и служебного каналов фотометра, пиранометра и актинометра, для формирования массивов данных и сохранения их на магнитном носителе. Программа включает три режима работы и выполняет следующие операции.

1. Ожидание восхода Солнца и переход в следящий режим при включении пиранометра.

2. Измерение суммарной радиации (средней за минуту), а в случае превышения «порога» ( $Q_i > Q_n$ ) – выдача команды на запуск системы наведения фотометра и переход в режим 3 после «захвата» Солнца.

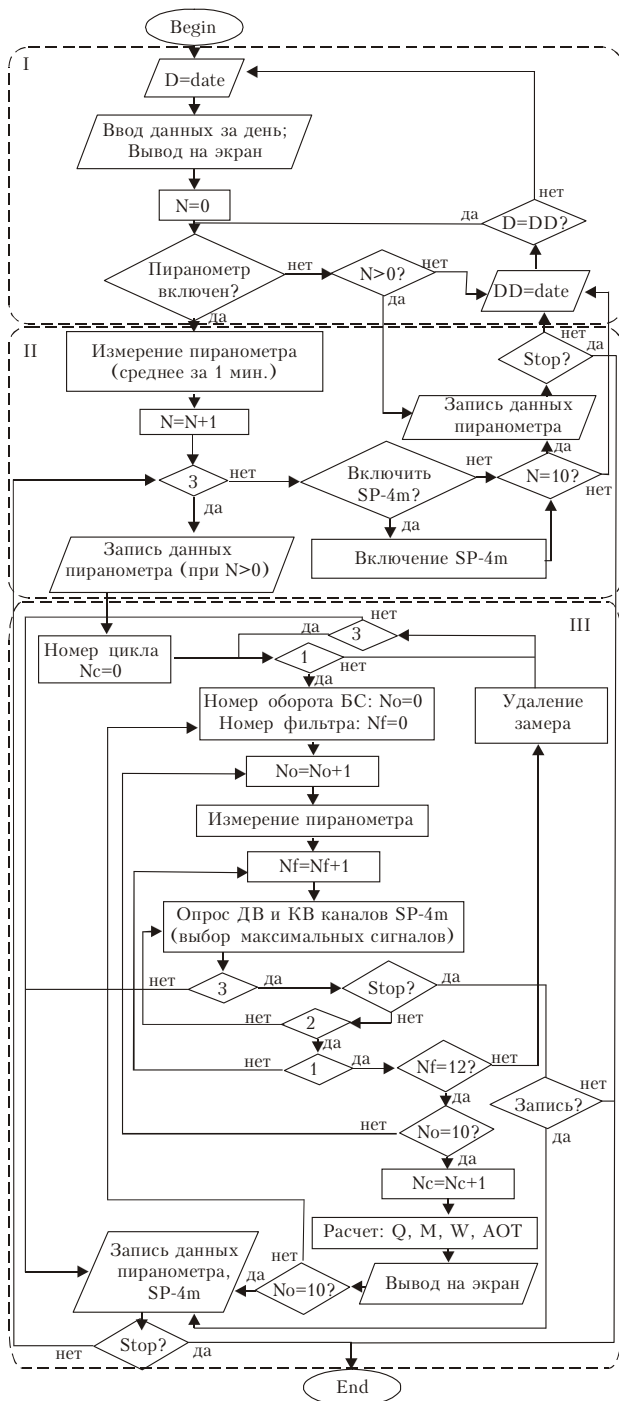


Рис. 6. Блок-схема измерительной программы: I, II – проверка служебных сигналов «начало оборота» и «фильтр»; III – проверка включения фотометра

### 3. Режим совместной регистрации данных фотометра и пиранометра:

- с использованием служебных сигналов разного уровня, поступающих от схемы вращения барабана фильтров, проводит спектральную селекцию сигналов прозрачности;
- осуществляет автоматическую фильтрацию замеров, искаженных погрешностями работы фотометра

- (следящей системы, барабана фильтров) и кратковременными перекрытиями Солнца облачностью;
- выполняет временную привязку текущих замеров, расчет высоты Солнца и оптической массы атмосферы;
- отображает на экране компьютера текущую (за день) информацию в цифровом и графическом виде – рис. 7 (при известных калибровочных константах, вместо сигналов прозрачности отображаются рассчитанные значения АОТ и влагосодержания);
- выполняет текущий контроль за работой отдельных элементов фотометра и исключает ложные замеры, возникающие при аппаратных сбоях.

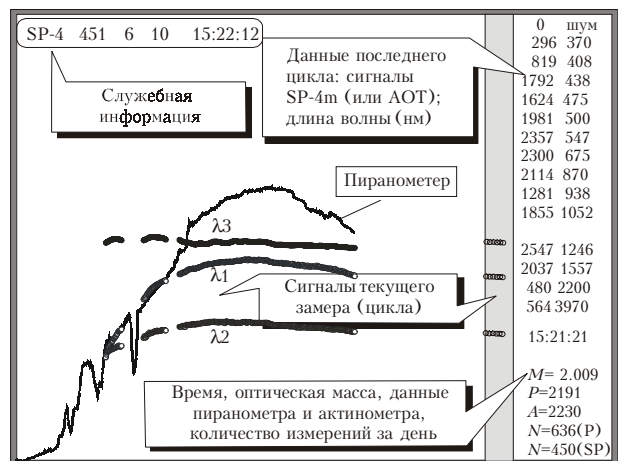


Рис. 7. Вид информации, отображаемой на экране компьютера в процессе измерений

В результате работы программы формируются два файла с данными пиранометра и фотометра, пополняемые через каждые 10 мин. Выход из программы осуществляется по команде оператора с сохранением или без сохранения последних измерений.

Программа редактирования применяется в любой день после измерений и служит для исключения ложных замеров, не отфильтрованных в процессе измерений. Отбраковка выполняется оператором на основе графической и цифровой информации о сигналах прозрачности за весь день или отдельные промежутки времени. Предусмотрены два типа удаления данных: без их сохранения и с записью в отдельный файл для последующего анализа, например, спектральной прозрачности перистой облачности.

Тестовая программа выводит в графическом и цифровом виде все служебные и измерительные сигналы без предварительной обработки. Указанная информация используется при настройке отдельных блоков и лабораторных испытаниях.

### Заключение

Многomesячная эксплуатация солнечного фотометра SP-4м в различных условиях (в том числе зимой и при осадках) подтвердила его пригодность для регулярных круглогодичных измерений характери-

стик приходящей радиации и прозрачности атмосферы. Разработка итерационного алгоритма калибровки фотометра позволила обойтись без дорогостоящих измерений в горных условиях и существенно упростить (вместе с рядом других программ) рутинные вычисления, связанные с обработкой больших массивов многоволновых измерений прозрачности атмосферы. Кроме того, благодаря выбранному алгоритму автоматизации, отпала необходимость постоянных наблюдений небосвода и ожидания ситуаций «безоблачного Солнца».

Таким образом, можно сделать вывод, что применение современных компьютерных технологий эксперимента позволило организовать малозатратный (с точки зрения содержания штата операторов) научный мониторинг характеристик прозрачности атмосферы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-05-64644) и Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 56.

1. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М.* О методике определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в ближнем ИК-диапазоне спектра // *Оптика атмосф. и океана*. 1997. Т. 10. № 8. С. 866–874.
2. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А.* Солнечные многоволновые фотометры для исследования прямой радиации и аэрозольно-газового состава атмосферы // *Региональный мониторинг Сибири. Ч. 2* / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: «Спектр», 1997. С. 131–145.
3. *Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Сутормин А.М., Турчинович С.А.* Широкодиапазонный солнечный фотометр для исследования морской атмосферы // *Оптика атмосф. и океана*. 1993. Т. 6. № 4. С. 444–451.

4. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Турчинович С.А.* Комплекс приборов для радиационных исследований // *Оптика атмосф. и океана*. 1996. Т. 9. № 12. С. 1643–1652.
5. *Kneizys F. X., Shettle E.P., Abreu L.W., Chetwynd J.H., Anderson J.P., Gallery W.O., Selby J.E.A., and Clough S.A.* Users Guide to LOWTRAN-7. AFGL-TR-0177. 1988. 137 p.
6. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* О раздельном учете оптических масс атмосферных компонент в методе солнечной фотометрии при больших зенитных углах наблюдения: Тезисы докл. // *IV Симпозиум «Оптика атмосферы и океана»*. Томск, 1997. С. 155–156.
7. *Гущин Г.П.* Методы, приборы и результаты измерений спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 200 с.
8. *Forgan B.W.* General method for calibration Sun photometers // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. N 12. P. 4841–4850.
9. *Soufflet V., Devaux C., Tanre D.* Modified Langley plot method for measuring the spectral aerosol optical thickness and its daily variations // *Appl. Opt.* 1992. V. 31. N 12. P. 2154–2162.
10. *Herman B. M., Box M. A., Reagan J. A., Evans C. M.* Alternative approach to the analysis of solar photometer data // *Appl. Opt.* 1981. V. 20. N 17. P. 2925–2928.
11. *Ignatov A.M., Dergileva I.L., Sakerin S.M., Kabanov D.M.* An algorithm for the sun photometer calibration // *Proc. IGARSS'93*. 1993. V. III. P. 1091–1093.
12. *Alt-azimuth solar tracker.* (<http://www.brusag.ch/intra.htm>).
13. *Давыдов Д.К., Плотников А.П., Складнева Т.К.* Система слежения за интенсивностью прямой солнечной радиации с помощью актинометра // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13. № 4. С. 1022–1025.
14. *Сакерин С.М.* О повышении информативности радиационных исследований на основе данных стандартных (сетевых) пиранометров: Тезисы докл. // *3-е Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу*. Томск, 1999. С. 73–74.

*D.M. Kabanov, S.M. Sakerin, S.A. Turchinovich. Solar-Photometer for scientific monitoring (instrumentation, techniques, algorithms).*

The paper presents a description of a multi-wave solar-photometer destined to all-year-round automated measurements of the atmospheric transparency in the wavelength range 0.37–4 μm. The instrumentation complex is capable of determining the aerosol optical thickness (AOT), columnar water vapor, direct and total solar radiation. A technique for automation of the experiment, calibration of the photometer, and calculation of AOT of the atmosphere are under consideration.