

УДК 535.243.25

К. С. НИГМАТУЛЛИНА, В. П. СОРОКИН

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКИЙ ЭЛЕКТРОФОТОМЕТР СО СВЕТОФИЛЬТРАМИ

На кафедре физики атмосферы сконструирован и испытан полуавтоматический электрофотометр с интерференционными светофильтрами. Прибор предназначен для непрерывных в течение светового дня наблюдений за атмосферным озоном и аэрозолями, он обеспечивает непрерывную регистрацию прямой солнечной радиации в восьми спектральных участках от 3000 до 6200 Å. Прибор позволяет обнаружить быстрые изменения оптических свойств атмосферы и оценивать количество озона и аэрозолей в ней.

Насущной задачей в исследованиях по атмосферной оптике является создание надежных спектральных, в том числе фильтровых приборов (спектрометров, спектрографов, спектрофотометров, озонометров и т. п.), которые могут использоваться как в актинометрических целях, так и при решении более узких проблем в оптике атмосферы. Сюда относится и задача об определении количества атмосферного озона по наблюдениям поглощения в той или иной части солнечного спектра.

Довольно широкий круг наших исследователей [1, 2, 3, 4, 5, 6] занимается созданием новых типов спектральных приборов, получивших применение в озонометрии. Из зарубежных исследований хорошо известна конструкция спектрофотометра Добсона [7], являющегося эталонным в озонометрической сети. Интересен оригинальной конструкции фильтровый фотометр [8], который применялся для исследований сумерек и содержания пыли в верхней атмосфере.

При определении содержания озона в настоящее время чаще всего используют поглощение озона в ультрафиолетовой области спектра. Однако весьма заманчиво измерять также общее содержание озона по поглощению его в видимой области спектра (в полосе Шапюи). Коэффициенты поглощения озона здесь на 2—4 порядка ниже, чем в ультрафиолетовой области, и это накладывает дополнительные трудности на характер работы. В полосе Шапюи ослабление излучения за счет поглощения озона того же порядка, что и ослабление за счет молекулярного рассеяния и аэрозолей.

На кафедре физики атмосферы физического факультета МГУ уже давно ведутся работы по атмосферной оптике с применением озонометров конструкции ГГО (в них увеличено число фильтров) и двойных монохроматоров ДМР-1 и ДМР-4 с фотоэлектрической регистрацией. Наряду с этим ведется работа по созданию и применению различных

вариантов автоматических фильтровых электрофотометров для исследования прямого солнечного излучения в широком диапазоне длин волн (от 300 до 620 мкм).

По наблюдаемой интенсивности прямой солнечной радиации можно вычислить общее содержание озона, а также и величину аэрозольного ослабления. Одновременное определение содержания озона по поглощению в видимой и ультрафиолетовой областях спектра позволяет сравнивать и корректировать эти оба метода определения озона.

В данной работе рассматривается конструкция одного из вариантов электрофотометра.

Назначение прибора, конструкция и принцип действия

Полуавтоматический электрофотометр со светофильтрами предназначен для непрерывной в течение светового дня регистрации прямой солнечной радиации в восьми участках спектра.

Схема прибора приведена на рис. 1. Прибор состоит из оптической головки (1) с механизмом переключения светофильтров (2), устройства для слежения за Солнцем (3), автоматического записывающего устройства (4) и источника питания (5).

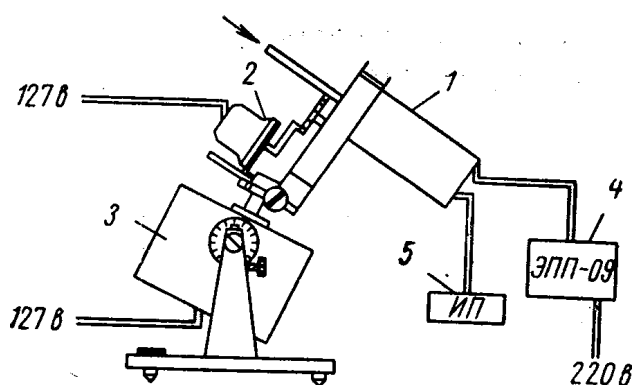


Рис. 1. Схема полуавтоматического электрофотометра со светофильтрами

Оптическая головка служит для выделения монохроматического солнечного излучения и содержит восемь фильтров и фотоэлектронный умножитель. Схема оптической головки приведена на рис. 2. Интегральный световой поток, пройдя через отверстия входной (1) и промежуточных диафрагм (8), попадает на светофильтр (3). Последний выделяет только часть потока в узком спектральном интервале ($60 \div 90 \text{ \AA}$). Пройдя через отверстие

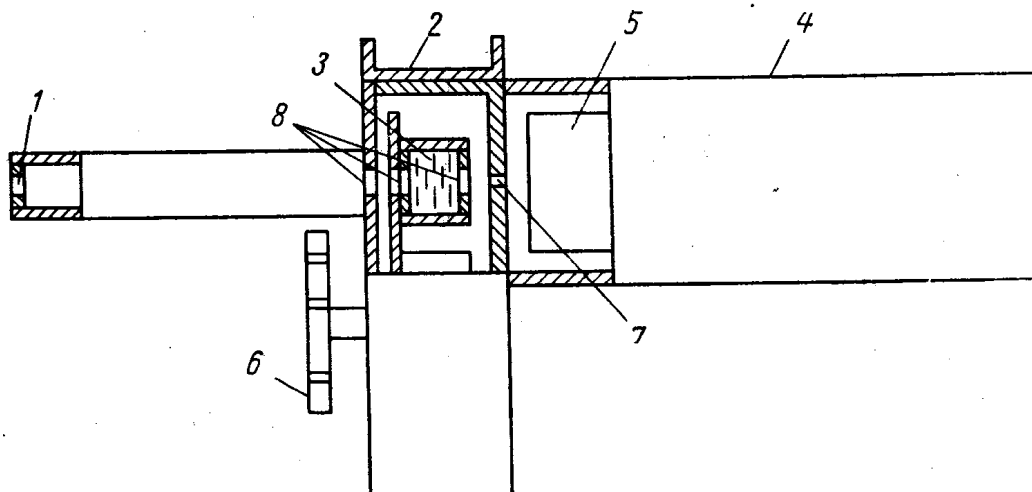


Рис. 2. Схема оптической головки

выходной диафрагмы (7), спектральный поток попадает на сурьмяно-цезиевый катод фотоумножителя (5).

Диафрагма (7) имеет наименьший диаметр и определяет поперечное сечение всех падающих на фотоумножитель световых потоков. Угол

зрения оптической головки (в эквивалентной плоскостной мере) равен 3° .

Камера (4) с фотоэлектронным умножителем (5) имеет только одно световое окно — отверстие диафрагмы (7). Вся внутренняя поверхность оптической головки зачернена. Это способствует тому, что на катод умножителя попадает только исследуемый монохроматический свет и сведена до минимума доля рассеянного в приборе света.

Проверка наводки оптической головки на Солнце осуществляется по установленному на ней оптическому целику (2).

В приборе используются интерференционные светофильтры (3) заводского серийного изготовления. Для уменьшения ширины кривой пропускания фильтра в некоторых случаях полный фильтр собирался из двух интерференционных фильтров, плотно прижатых друг к другу.

Плоскопараллельная пластинка интерференционного фильтра является единственным оптически активным элементом прибора. При косом падении лучей она может сместить световой луч на некоторый угол, и луч не попадет на отверстие выходной диафрагмы, а поглотится или отразится. Поэтому важным требованием к установке интерференционного фильтра является перпендикулярность падающих лучей к его поверхности. Как показал Ф. А. Королев [10], длина волны максимального пропускания λ_m и ширина кривой пропускания $2\delta\lambda_m$ связаны следующим образом с угловыми характеристиками падающего луча:

$$\lambda_m = \frac{2nh \cos \frac{\psi}{n}}{k - \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\pi}}, \quad (1)$$

$$2\delta\lambda_m = \frac{\lambda_m}{k - \frac{\lambda_m}{\pi} \frac{\partial \delta}{\partial \lambda}} \frac{1}{N_e}, \quad (2)$$

где ψ — угол выхода луча (для светофильтров с достаточно большими линейными размерами угол выхода приблизительно равен углу падения луча); h и n — толщина и показатель преломления разделительного слоя фильтра; k — порядок интерференции ($k=1, 2, 3, \dots$); δ_1 и δ_2 — скачки фаз на отражающих поверхностях фильтра; N_e — эффективное число интерферирующих лучей равной интенсивности.

Отсюда следует, что при косом падении лучей длина волны максимального пропускания будет смещаться в область коротких волн и монохроматичность выделяемого света ухудшается.

Характеристики	λ_m , мкм		$2\delta\lambda_m$, мкм		T_m , %	
	фильтр	прибор	фильтр	прибор	фильтр	прибор
1	595,5	595,0	6,0	6,0	9,0	1,3
2	554,0	554,5	6,0	5,0	10,1	4,9
3	544,0	543,3	6,2	6,0	12,8	7,3
4	474,5	474,3	7,6	7,3	10,0	9,4
5	368,2	368,5	16,0	15,0	10,4	8,9
5а	335,6	336,0	7,0	7,0	2,7	1,7
6	308,4	308,5	6,4	6,4	15,6	4,7
7	604,0	603,0	9,6	9,0	25,8	2,4
8	625,5	625,0	7,2	8,0	2,9	0,075

В таблице приведены длины волн максимального пропускания λ_m , величины максимального пропускания T_m и ширина кривой пропускания $2\delta\lambda_m$ светофильтров, используемых в приборе. Эти данные были получены при исследовании светофильтров на монохроматоре СФ-4, источником излучения служила водородная лампа.

В первых образцах прибора в качестве фильтра № 5 использовался фильтр, максимальное пропускание которого приходится на длину волны $\lambda_m = 368,2$ мкм, в последних — $\lambda_m = 335,6$ мкм.

В качестве приемника излучения используются фотоумножители ФЭУ-29 и ФЭУ-35. Из-за больших размеров фотоумножитель ФЭУ-29 в последних приборах был заменен малогабаритным умножителем ФЭУ-35, чувствительность которого вполне достаточна для проводимых измерений.

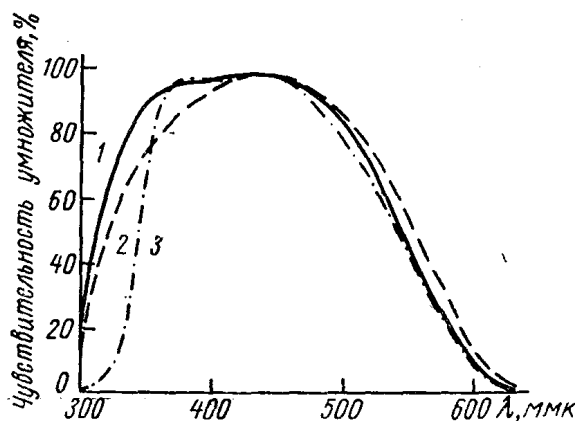


Рис. 3. Кривые спектральной чувствительности фотоумножителей — ФЭУ-29 № 135, — ФЭУ-35 № 10351, — ФЭУ-35 № 2889

Кривые спектральной чувствительности используемых фотоумножителей приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что использование умножителя ФЭУ-35 № 2889 не совсем удачное, так как у него мала чувствительность в области 300,0 мкм. Нужно учесть, что в этой ультрафиолетовой области спектра интенсивность солнечного излучения за пределами атмосферы значительно меньше, чем в видимой области, и что в атмосфере происходит сильное ослабление ультрафиолетового излучения за счет погло-

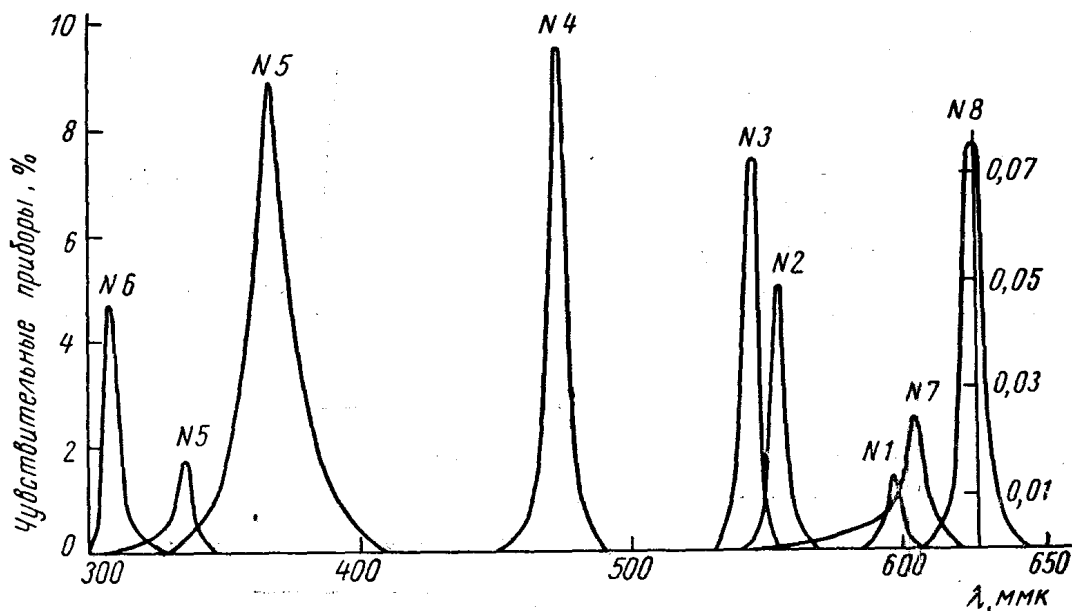


Рис. 4. Кривые спектральной чувствительности прибора

щения озоном и молекулярного рассеяния. Поэтому фотоумножитель нужно выбирать таким, чтобы в области 300,0 мкм он имел бы чувствительность не ниже 15—20% от максимальной.

Совместное действие фотоумножителя и интерференционных фильтров привело к тому, что прибор был чувствителен только в восьми участ-

ках спектра. В той же таблице приведены спектральные характеристики прибора с фотоумножителем ФЭУ-35 № 10351 и использованными фильтрами № 1—8 (для фильтра № 5 с $\lambda_m = 368,2$ мкм с ФЭУ-35 № 2889), а на рис. 4 — соответствующие кривые. Спектральная чувствительность прибора в восьми участках спектра $\gamma_{\text{п}}(\lambda)$ (рис. 4) рассчитывается по формуле [9]

$$\gamma_{\text{п}}(\lambda) = T_c(\lambda) \cdot \gamma_{\text{ф}}(\lambda), \quad (3)$$

где $T_c(\lambda)$ — спектральное пропускание светофильтра, относительные единицы; $\gamma_{\text{ф}}(\lambda)$ — спектральная чувствительность ФЭУ, % ($\gamma_{\text{ф}}(\lambda) = 100\%$ при $\lambda = 450$ мкм).

По $\gamma_{\text{п}}(\lambda)$ из рис. 4 получены и другие, скорректированные по чувствительности ФЭУ, характеристики прибора. Из таблицы и рис. 4 видно, что чувствительность прибора в разных участках спектра различна. Это приводит к тому, что получаемые сигналы трудно измерить на одном и том же приборе. Для устранения этой трудности фильтры № 1, 2, 3, 4, 7 были дополнены нейтральными стеклами различной плотности, которые не изменили спектральных свойств прибора.

Механизм переключения фильтров (2) на рис. 1 состоит из мальтийского креста (6) на рис. 2, находящегося на одной оси с кассетой с фильтрами (3), и электродвигателя Д-218, к оси которого прикреплен ведущий ролик. Скорость вращения электродвигателя равна 10 об/мин, при этом каждый фильтр фиксируется перед фотоумножителем на 4 сек. Период переключения всех фильтров равен 40 сек.

Для слежения за Солнцем в течение светового дня используется гелиостат. Основной частью его является специальным образом установленный мотор Уоррена с редуктором, центральная ось которого совершает один оборот за 24 час и на которой крепится оптическая головка с механизмом переключения фильтров.

Регистрирующим прибором служит шеститочечный потенциометр ЭПП-09М, цикл печати которого равен 3 сек. На рис. 5 приведен пример записи результатов наблюдений.

Источником питания фотоумножителя служат батареи ПМЦГ-315, ПМЦГ-160 или ГБ-400.

Перед началом работы центральная ось гелиостата располагается параллельно оси мира под углом к горизонту, равным широте места наблюдения. Угол устанавливается по специальному лимбу, закрепленному на корпусе гелиостата. Предварительно на месте наблюдения устанавливается визирная вежа, определяющая проекцию оси мира на земную поверхность в данном месте, т. е. меридиан. Оптическая головка крепится к центральной оси гелиостата таким образом, что может вращаться вокруг оси, перпендикулярной оси гелиостата и совмещенной с

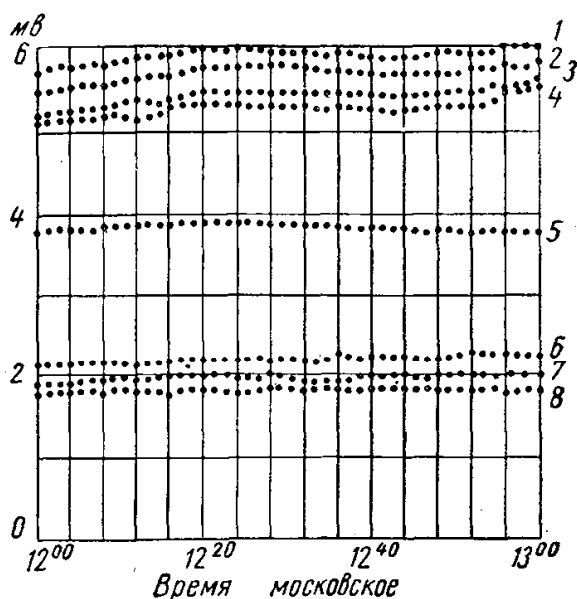


Рис. 5. Пример записи результатов наблюдений солнечной радиации. 13 июля 1968 г. (пос. Терскол). 1 — фильтр № 6, 2 — № 5, 3 — № 2, 4 — № 1, 5 — № 8, 6 — № 3, 7 — № 4 и 8 — № 7

осью склонения Солнца. При включенном моторе Уоррена входное отверстие прибора направляется на Солнце, проверка установки производится по оптическому целику. В течение дня она регулярно контролируется.

На этом установка прибора заканчивается, и в дальнейшем прибор всегда направлен на Солнце.

Испытания прибора

В течение летнего времени (1965—1968 гг.) прибор проходил испытания в экспедиционных условиях в разных районах страны. Измерения проводились на Кавказе (Терскол), в Средней Азии (Кызылча), Крыму (Карадаг) и в Мурманской области.

Наблюдения эти, проходившие в общем почти 6 месяцев, благодаря своей непрерывности дали обширный материал об интенсивности различных областей солнечного спектра и ее изменениях со временем дня и с условиями погоды. Они позволяют рассчитать количество озона по поглощению как в ультрафиолетовой, так и приближенно в видимой части спектра, а также ослабление света аэрозолями атмосферы. Еще важнее возникшая теперь возможность изучать пульсации этих элементов. Записи электрофотометра показали, что количество озона испытывает сравнительно медленные пульсации, порядка 10%, и что, наоборот, аэрозольное ослабление, меняющееся иногда заметно в течении 1—2 мин, указывает на существование небольших, быстро движущихся облаков аэрозоля.

Эти пульсации озона и прозрачности атмосферы составят предмет отдельных исследований.

Подводя итоги, отметим, что описанный прибор позволяет вести автоматическую регистрацию прямой солнечной радиации в восьми участках спектра, причем полный цикл наблюдений занимает 40 сек. Непрерывность регистрации позволяет обнаружить быстрые изменения оптических свойств атмосферы. Автоматический принцип регистрации устраняет субъективные ошибки наблюдения и позволяет значительно уточнить статистические характеристики прозрачности атмосферы и ее примесей.

В заключение авторы выражают благодарность Г. И. Кузнецову и Н. А. Петренко за ряд ценных советов, касающихся конструкции прибора, и помощь в организации его испытаний и наблюдений с ним.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гушин Г. П. Исследования атмосферного озона. Л., Гидрометеиздат, 1963.
2. Ошерович А. Л., Родионов С. Ф. Сб. «Атмосферный озон». Изд-во МГУ, 1961.
3. Иозенас В. А., Кузнецов А. П. Сб. «Атмосферный озон». Изд-во МГУ, 1961.
4. Стеблева Р. С. Сб. «Атмосферный озон». Изд-во МГУ, 1961.
5. Безверхний Ш. А., Ошерович А. Л., Родионов С. Ф. Фотоэлектрические озонметры. В сб.: «Международный Геофизический год». Изд-во МГУ, 1960.
6. Гольм Т. С. В сб.: «Атмосферный озон». Изд-во МГУ, 1961.
7. Dobson G. M. V. Adjustment and calibration of ozone spectrophotometer. Annals of the IGY. vol. V, Pergamon Press. 1957.
8. Volz F. E., Goody R. M. Journ. of Atmos. Scien., 19, No. 5, 1962.
9. Чечик Н. О. и др. Электронные умножители. М., ГИТТЛ, 1957.
10. Королев Ф. А. Теоретическая оптика. М., «Высшая школа», 1966.

Поступила в редакцию
7.4 1969 г.

Кафедра
физики атмосферы