

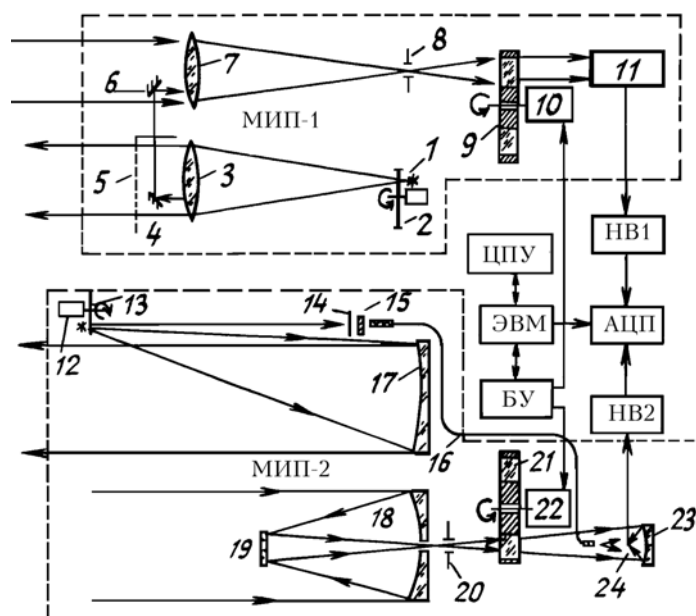
Ю.А. Пхалагов, В.Н. Ужegov, Н.Н. Щелканов

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МНОГОВОЛНОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Описан фильтровый автоматизированный измеритель спектральной прозрачности атмосферы, работающий на горизонтальной трассе с отражением на базе 500 м в 22 дискретных точках спектрального диапазона 0,44–12,2 мкм.

При решении ряда научных и прикладных задач возникает потребность оперативно организовать измерения спектральной прозрачности приземного слоя атмосферы в заданном районе и в широком диапазоне длин волн. Для этого необходим измерительный комплекс, который отвечал бы следующим основным требованиям — малый вес, транспортабельность, относительно небольшая измерительная база, простота настройки оптических систем и удобство в работе.

Такой прибор на область длин волн 0,44–12 мкм был разработан и изготовлен в ИОА СО РАН в 1991 г. и впервые апробирован в комплексных исследованиях атмосферы по программе SATOR. Он состоит из многоволнового измерителя прозрачности на область 0,44–1,06 мкм — МИП-1 и МИП-2 — на область 1,06–12,0 мкм.



Функциональная схема многоволнового измерителя спектральной прозрачности атмосферы: 1 — светоизмерительная лампа СИРШ 6×100; 2 — модулятор МИП-1; 3 — передающий объектив МТО-1000; 4, 6 — плоские зеркала; 5 — коммутатор рабочего и контрольного каналов МИП-1; 7 — приемный объектив МТО-1000; 8 — диафрагма поля зрения МИП-1; 9 — барабан интерференционных фильтров МИП-1; 10 — двигатель; 11 — приемник излучения ФЭУ-28; 12 — глобар; 13 — модулятор МИП-2; 14 — заслонка контрольного канала МИП-2; 15 — обрезкающий фильтр; 16 — световод; 17 — передающее внеосевое параболическое зеркало ($\varnothing = 250$ мм); 18 — приемное сферическое зеркало ($\varnothing = 250$ мм); 19 — плоское зеркало; 20 — диафрагма поля зрения МИП-2; 21 — барабан интерференционных светофильтров МИП-2; 22 — двигатель; 23 — эллиптическое зеркало; 24 — приемник излучения — болометр БМ6-К1

В этом варианте оба измерителя работают по схеме с отражением на базе 500 м (общая длина измерительной трассы составляет 1000 м).

Приемопередающая оптика в обоих измерителях разнесена, но размещается на одном поворотном устройстве. Весь комплекс установлен на массивном столе, где расстояние между оптическими осями приемных систем МИП-1 и МИП-2 не превышает 60–70 см. Такое компактное расположение измерительных приборов в отапливаемом лабораторном помещении с выходом в атмосферу через ограниченные диафрагмы в оконном проеме делает этот комплекс практически всепогодным. Функциональная схема измерителя представлена на рисунке. Основные составляющие элементы схемы перечислены в подрисуночной подписи. Отметим, что выделение необходимой длины волны в МИП-1 производится интерференционными светофильтрами, а в МИП-2 как интерференционными (в области

$\lambda = 1,06 \pm 2,17$ мкм), так и комбинированными ($\lambda = 3,91 \pm 12,2$ мкм). Для устранения обертонов в пропускании интерференционных фильтров применяются цветные стекла, а в двух случаях ($\lambda = 1,06$ и $1,22$ мкм) дополнительно устанавливаются 5-миллиметровые кюветы с дистиллированной водой. В обоих измерителях фильтры крепятся в барабанах револьверного типа.

Барабан интерференционных фильтров в МИП-1 содержит 8, а барабан в МИП-2, рассчитанный на 16 положений, — 15 фильтров и одну металлическую заглушку. Последняя необходима для перекрывания измерительного пучка во время регистрации сигнала по контрольному каналу. Характеристики используемых интерференционных фильтров приведены в таблице.

Характеристики используемых интерференционных фильтров

МИП-1		МИП-2			
λ , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	λ , мкм	$\Delta\lambda$, мкм	λ , мкм	$\Delta\lambda$, мкм
0,44	0,009	1,06	0,015	9,12	0,25
0,48	0,006	1,22	0,02	9,55	0,24
0,55	0,010	1,60	0,02	10,34	0,24
0,63	0,004	2,17	0,02	10,66	0,22
0,69	0,008	3,91	0,10	11,21	0,29
0,87	0,015	4,69	0,18	11,76	0,32
0,94	0,015	8,18	0,25	12,19	0,38
1,06	0,015	8,66	0,28	—	—

В качестве отражателя излучения для обоих приборов в конце измерительной трассы используется один зеркальный катафот с диаметром главного зеркала 500 и фокусным расстоянием 1500 мм (на рисунке не показан). Применение катафота позволило в значительной мере снять проблемы наводки оптических систем и тем самым повысить точность измерений прозрачности атмосферы. Конструктивно отражатель размещен в металлическом защитном тубусе и снабжен системой подогрева, предохраняющей зеркало от запотевания в любое время года. Поскольку катафот обладает автоколлимационным свойством, отраженный пучок света возвращается строго назад, к источнику излучения. Диаметр возвращенного пучка в плоскости источника излучения для идеальной оптической системы катафота определяется из выражения

$$D = 2D_1 - D_2,$$

где D_1 — диаметр отражателя, D_2 — объектива источника. Отсюда следует, что для МИП-1 равнорядный диаметр пучка будет составлять 900, а для МИП-2 — 750 мм, что вполне достаточно для размещения приемной оптики.

Оптическая схема и принцип работы измерителя достаточно просты и понятны из приведенной функциональной схемы.

Работа МИП-1. Излучение лампы 1 модулируется с частотой 450 Гц, коллимируется объективом 3 и расходящимся пучком направляется на атмосферную трассу, в конце которой установлен зеркальный катафот. Последний перехватывает примерно $1/20$ часть проходящего пучка и направляет ее на приемный объектив 7, который, в свою очередь, также перехватывает лишь небольшую часть проходящего пучка. Пришедшее излучение фокусируется в плоскости диафрагмы поля зрения 8, проходит через интерференционный фильтр 9 и затем попадает на фотоэлектронный умножитель 11.

Работа МИП-2. Излучение глобара 12 модулируется с частотой 12 Гц, коллимируется зеркалом 17 и направляется на атмосферную трассу. Отразившись от того же самого зеркального катафота в конце трассы, поток ИК-радиации возвращается строго в обратном направлении. Часть проходящего потока перехватывается зеркальной системой 18, 19 (система Ньютона), фокусируется на диафрагму поля зрения 20, проходит интерференционный фильтр 21 и, отразившись от эллиптического зеркала 23, попадает на приемную площадку болометра 24.

Для повышения точности в обоих измерителях предусмотрен контроль за стабильностью источников излучения и чувствительностью фотодетекторов.

В МИП-1 контрольный канал формируется жестко закрепленными плоскими зеркалами 4 и 6. Коммутация рабочего и контрольного каналов осуществляется с помощью автоматически управляемой шторки специальной конфигурации. Измерения по рабочему и контрольному каналам производятся поочередно на всех длинах волн.

Подобный канал в МИП-2 предназначен в основном для контроля за температурой глобара на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм (фильтр 15). С помощью световода 16 излучение глобара, минуя интерференционные фильтры, сразу направляется на эллиптическое зеркало 23 и затем на болометр БМ6-К1. Коммутация контрольного и рабочего каналов осуществляется заслонкой 14, связанной с электромагнитным приводом. Контроль проводится в начале каждого цикла измерений и при необходимости регулируется температура глобара. Фильтр 15 подбирается таким образом, чтобы величина сигнала по контрольному каналу находилась в том же динамическом диапазоне, что и при измерениях с трассы.

Помимо контрольного канала в МИП-2 предусмотрена возможность эпизодического контроля за состоянием зеркал 17, 18, 19 и за постоянством излучающей способности глобара. Такой контроль

осуществляется с помощью специальной зеркальной приставки, состоящей из двух плоских зеркал (на рисунке не показана), которая устанавливается перед приемопередающей оптикой МИП-2.

Измерения на обоих приборах проводятся одновременно. Усиленные селективными нановольтметрами (НВ1 и НВ2) электрические сигналы с ФЭУ и болометра подаются на двухканальный двенадцатиразрядный АЦП. Здесь аналоговые сигналы преобразуются в цифровые и поступают на ЭВМ, где за 20 с происходит их накопление и усреднение. Регистрация измеренных сигналов осуществляется на ЦПУ. Заметим, что использование в измерителе модулируемых световых потоков и селективных усилителей позволило значительно улучшить соотношение сигнал/фон измерителя в светлое время суток.

Управление двигателями барабанов с интерференционными фильтрами (10 и 22) производится от блока управления (БУ) и соответствующих оптронных и герконовых пар, установленных на барабанах. Кроме указанных функций, ЭВМ также полностью управляет работой всего комплекса в автоматическом режиме.

Прибор компактен и удобен в эксплуатации. Наводка быстро и точно осуществляется с помощью гелий-неонового лазера, установленного между МИП-1 и МИП-2. Для работы обоих измерителей в автоматическом режиме достаточно набрать исходную информацию на дисплее ЭВМ и запустить программу, которая обеспечивает всю последовательность необходимых операций. Один цикл измерений по всем длинам волн занимает 10 мин.

Методика определения спектральной прозрачности атмосферы. Методика измерений прозрачности атмосферы (T) предполагает получение абсолютных значений $T(\lambda)$ по первому каналу (МИП-1) и относительных по второму (МИП-2).

Прозрачность атмосферы для заданной трассы длиной L_1 в общем случае для измерителя МИП-1 можно представить в виде

$$T_{L_1}(\lambda) = K(\lambda)U(\lambda)/U^k(\lambda), \quad (1)$$

где $U(\lambda)$ — сигнал на длине волны λ , полученный с измерительной трассы с использованием катафота; $U^k(\lambda)$ — сигнал по контрольному каналу; $K(\lambda)$ — коэффициент пропорциональности, учитывающий расходимость пучка и включающий в себя исходную интенсивность источника излучения.

Для нахождения $K(\lambda)$ во всем диапазоне длин волн МИП-1 достаточно параллельно с измерениями сигналов $U(\lambda)$ от катафота измерить пропускание атмосферы либо с помощью точечного источника, либо с использованием переносного плоского зеркала. Рассмотрим, в частности, методику определения $K(\lambda)$ с использованием переносного зеркала. В этом случае выбирается дополнительная калибровочная трасса L_2 , которая должна быть много меньше L_1 , но больше зоны формирования пучка источника излучения МИП-1. При выполнении этих условий можно определить прозрачность атмосферы в слое $L_1 - L_2$, используя следующее выражение:

$$T_{L_1 - L_2}(\lambda) = \frac{U_{L_1}^*(\lambda) U^{k_2}(\lambda) L_1^2}{U_{L_2}^*(\lambda) U^{k_1}(\lambda) L_2^2}, \quad (2)$$

где $U_{L_1}^*$ и $U_{L_2}^*$ — сигналы от плоского зеркала, установленного на расстоянии L_1 и L_2 , а U^{k_1} и U^{k_2} — соответствующие им контрольные сигналы.

В предположении выполнимости закона Бугера в окнах прозрачности атмосферы для спектрального разрешения $\Delta\lambda$, указанного в таблице, можно показать, что T_{L_1} связано с $T_{L_1 - L_2}$ $T_{L_1 - L_2}$ следующим соотношением: $T_{L_1} = (T_{L_1 - L_2})^{L_1/(L_1 - L_2)}$. Тогда величину $K(\lambda)$ в выражении (1) можно определить по формуле

$$K(\lambda) = \frac{U^k(\lambda)}{U(\lambda)} (T_{L_1 - L_2})^{L_1/(L_1 - L_2)}. \quad (3)$$

Методика измерения спектральной прозрачности атмосферы в ИК-области спектра с использованием МИП-2 основана на получении относительных спектров пропускания с последующей их привязкой к абсолютным значениям на длине волны 1,06 мкм по данным МИП-1.

Алгоритм расчета прозрачности $T_{L_1 - L_2}^{\text{ИК}}(\lambda)$ в этом случае для разностной трассы $L_1 - L_2$ имеет вид

$$T_{L_1 - L_2}^{\text{ИК}}(\lambda) = T_{L_1 - L_2}(1,06) \frac{V_{L_1}(\lambda)V_{L_2}(1,06)}{V_{L_2}(\lambda)V_{L_1}(1,06)}, \quad (4)$$

где $T_{L_1 - L_2}(1,06)$ — абсолютная прозрачность в области $\lambda = 1,06$ мкм на разностной трассе по данным

МИП-1; $V_{L_1}(\lambda)$, $V_{L_1}(1,06)$ — сигналы, измеренные на трассе L_1 с использованием катафота, по данным МИП-2. Величины $V_{L_2}(\lambda)$ и $V_{L_2}(1,06)$ находятся из соотношения

$$V_{L_2}(\lambda) = \frac{V_{L_1}(\lambda) V_{L_2}^*(\lambda)}{V_{L_1}^*(\lambda)},$$

где $V_{L_1}^*$ и $V_{L_2}^*$ — сигналы, полученные от плоского зеркала сравнения, расположенного на удалении L_1 и L_2 .

По своему физическому смыслу $V_{L_2}(\lambda)$ соответствуют рассчитанным сигналам от катафота, расположенного на удалении L_2 . Переход к прозрачности на трассе L_1 осуществляется по формулам (3) и (1).

Расчет коэффициентов общего ослабления по обоим каналам производится по известной формуле.

$$\varepsilon(\lambda) = -\ln[T(\lambda)]/L_1.$$

Оценка погрешностей, проведенная по стандартным методикам, дает величину случайной погрешности определения коэффициента ослабления $0,02 \div 0,03$, а систематической — $0,03 \text{ км}^{-1}$.

В заключение авторы выражают благодарность А.П. Ростову и А.П. Иванову за помощь в автоматизации измерительного комплекса.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
12 марта 1992 г.

Yu. A. Pkhalagov, V. N. Uzhegov, N. N. Shchelkanov. An Automated Multiwavelength Measurer of the Spectral Transmittance of the Ground Atmospheric Layer.

An automated spectral transmissometer for measuring the spectral transmittance of the atmospheric ground layer along a horizontal path with a retroreflector at 500 m distance is described. The spectroscopic block of the device provides for isolating 22 spectral intervals within the range from 0.44 to 12.2 μm using optical filters.