

АППАРАТУРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 551.510.534

А.Н. Красовский, А.М. Людчик, Л.Ч. Неверович, Л.Н. Турьшев,  
В.А. Вартанян, С.В. Долгий, Ю.А. Климов

**УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР-ОЗОНОМЕТР «ПИОН»:  
МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Обсуждается оригинальная методика измерения общего содержания озона в атмосфере с помощью солнечного ультрафиолетового спектрометра-озонметра «Пион» и приводятся результаты сравнения показаний «Пиона» с данными приборов Брюэра № 45 и Добсона № 107 за весенне-осенний период 1991 г. Показано, что точность среднедневных результатов измерений с помощью озонметра «Пион» близка к точности показаний приборов Брюэра и Добсона.

Начиная с 1989 года интенсивно ведутся испытания ультрафиолетового солнечного спектрометра — озонметра «Пион», разработанного в НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко при Бел. госуниверситете им. В.И. Ленина. Ко времени написания этой статьи изготовлены три прибора, последний экземпляр включает ряд модифицированных узлов, разработанных с учетом результатов испытаний и обнаруженных недостатков в работе первых двух образцов. Особенности конструкции прибора кратко описаны в [1, 2], общий подход к конструированию прецизионных спектрометров-озонметров изложен в [1], теоретические аспекты ультрафиолетовой солнечной озонметрии — в [3–6], а детальное описание конструкции и характеристик прибора будет дано в отдельной публикации.

Результаты лабораторных и натурных испытаний озонметров «Пион» № 1 и № 2 приведены в [2], где обсуждаются недостатки и достоинства приборов по сравнению с известными озонόμεтрами Добсона и Брюэра. Ниже подробно описывается оригинальная методика измерений, используемая в озонόμεтрах «Пион», и результаты сравнительных испытаний с озонόμεтрами Добсона и Брюэра в течение весны, лета и осени 1991 года, проведенных в Центральной аэрологической обсерватории Госкомгидромета СССР (г. Долгопрудный Московской обл.).

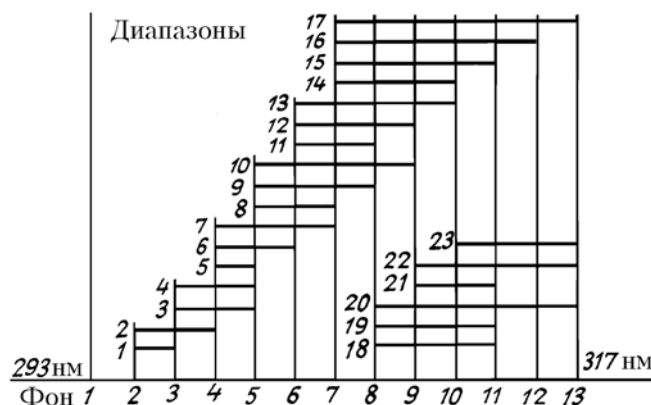


Рис. 1. Распределение рабочих участков и рабочих диапазонов по шкале длин волн спектрометра-озонметра «Пион»

Первоначально для измерения общего содержания озона (ОСО) в атмосфере для озонόμεтров «Пион» планировалось использовать один из вариантов многоволновой методики [4, 7–9], базирующийся на измерениях на 200 парах длин волн. Однако проведенный в [6] анализ показал, что непосредственное обобщение традиционных «маловолновых» методик на случай многих рабочих длин волн не является оптимальным способом повышения точности измерений ОСО. Вместе с тем идея использования избыточного числа рабочих длин волн оказалась перспективной с точки зрения расширения диапазона условий, допускающих проведение измерений. Детально аспекты этой проблемы рассмотрены в [6]. Здесь описывается конкретная реализация разработанной методики, сохраняющая до некоторой степени черты стандартного многоволнового подхода к измерению ОСО.

Перед началом каждого измерения подвижная спектральная щель монохроматора спектрометра-озонόμεтра устанавливается в начало спектрального диапазона (293–317 нм). Спектральный диапа-

зон при измерении ОСО разбит на 13 равномерно распределенных рабочих участков (см. рис. 1), каждый из которых включает 10 длин волн, отстоящих друг от друга на один шаг сканирования (0,02 нм). Самый коротковолновый участок используется для измерения фонового сигнала  $F$  и оценки его дисперсии  $DF$ .

Электронная схема блока управления и регистрации позволяет дискретно регулировать время накопления  $t_n$  сигнала на интеграторе в пределах 0,5 мс – 0,5 с. Программа обработки измерений автоматически устанавливает значение  $t_n$  в зависимости от уровня сигнала с фотоэлектронного умножителя для обеспечения оптимального режима работы линии аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Установленное значение времени накопления используется в качестве исходного для оптимизации при измерениях в следующем канале. Помимо изменения времени накопления сигнала допускается возможность проведения нескольких измерений (до 30) в каждом из каналов и последующего усреднения результата. На рис. 2 в качестве примера изображен зарегистрированный с оптимизацией времени накопления солнечный спектр (кривая 1) и результат пересчета его к единому времени (кривая 2).

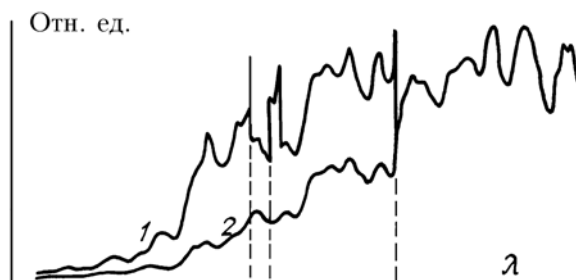


Рис. 2. Зарегистрированный солнечным УФ-спектр: 1 — с переменным временем накопления в зависимости от уровня сигнала (вертикальными линиями показаны точки изменения времени накопления в два раза); 2 — спектр, пересчитанный к единому времени накопления

Процедура измерений включает в себя этап грубой оценки сигнала в каждом из рабочих участков. Для этого с небольшим временем накопления выполняются измерения в первом канале каждого рабочего участка. Если оценка сигнала не превышает  $S_{\min} = F + 50\sqrt{DF}$ , то измерения не проводятся и осуществляется переход к следующему рабочему участку. Если во время измерений в области больших длин волн наступает переполнение АЦП при минимальном времени накопления, сканирование спектра прекращается во избежание пересветки фотоприемника.

Спектрометр-озонметр «Пион» снабжен следящей системой, работающей в автономном режиме и управляющей двигателями вращения прибора в вертикальной и горизонтальной плоскостях. очередное измерение начинается с отключения системы слежения, определения фона и его дисперсии, установки спектрометра на начало второго рабочего участка, включения системы слежения и ожидания (2–5 с) доводки спектрометра-озонметра на Солнце. По появлению сигнала «Солнце в захвате» система слежения выключается и начинается сканирование спектра с оценкой и измерением сигналов в рабочих участках (2–13). По окончании сканирования вновь включается система слежения и спектрометр устанавливается в начало диапазона. Во избежание дополнительных помех во время сканирования и измерения фона выключается также и система термостабилизации прибора. В зависимости от установленных значений максимально допустимого времени накопления, количества повторных измерений и уровня сигнала полное время сканирования изменяется в пределах от 2 до 10 с.

В результате однократного сканирования получают среднее значение фона и его дисперсии, номера начального и конечного информативных участков, отсчеты АЦП в каждом из 10 каналов каждого из информативных участков и соответствующие им времена накопления. Далее осуществляется приведение результатов измерений к единому времени накопления (0,5 мс), вычитание фона, логарифмирование и сложение значений, полученных для каждого из 10 каналов рабочего участка.

Из 12-ти рабочих участков (2–13) сформированы 23 пары перекрывающихся рабочих диапазонов (см. рис. 1). В зависимости от начального и конечного информативных рабочих участков определяются номера диапазонов, в которых возможно определение ОСО.

Расчет ОСО в отдельном диапазоне осуществляется по формуле

$$X = \frac{1}{\mu \Delta\alpha} (\Delta R - \Delta L - m \Delta\beta p/p_0), \quad (1)$$

которая представляет собой один из вариантов многоволновой методики [6], базирующейся на гипотезе о неселективности аэрозольного ослабления. В формуле (1)  $\mu$ ,  $m$  — относительные озонная и воздушная массы соответственно [10];  $\Delta\beta$  — разность сумм коэффициентов рассеяния на всех длинах волн первого и второго рабочих участков рассматриваемого диапазона;  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta R$  и  $\Delta L$  — аналогичные величины, рассчитываемые с использованием коэффициента поглощения озона, логарифмов плотности потока внеатмосферного солнечного излучения и логарифмов зарегистрированных сигналов соот-

ветственно;  $p/p_0$  — отношение давления в месте измерений к нормальному. Параметр  $\Delta\beta$  рассчитывается с использованием известных полуэмпирических формул [11] и привязки каналов спектрометра к шкале длин волн. Параметры  $\Delta R$  и  $\Delta\alpha$ , вообще говоря, можно рассчитывать, исходя из экспериментальных данных о внеатмосферном солнечном спектре, коэффициенте поглощения озона и привязки каналов спектрометра. Однако авторы предпочли определять эти параметры путем сравнительной калибровки с эталонным озонометром. Такой подход более трудоемок, но позволяет избежать дополнительных погрешностей, связанных с неточностями в исходных экспериментальных данных [3].

В зависимости от реального содержания ОСО, условий измерений и чувствительности прибора (регулируемой в известных пределах путем изменения высокого напряжения на фотоумножителе) доступные для измерений сигналы смещаются по шкале длин волн в ту или иную сторону. Эффект от использования многих перекрывающихся рабочих диапазонов, распределенных по всей шкале длин волн прибора, заключается в возможности получения результата (измерения ОСО) в широком интервале условий наблюдения, не предъявляя чересчур высоких требований к динамическим характеристикам электронного тракта регистрации. Это, пожалуй, единственное реальное преимущество применения многих длин волн для определения ОСО (в случае, если не стоит задача измерения содержания и других газов) [1, 6].

Как правило, в ходе каждого измерения значения ОСО получают сразу в нескольких диапазонах. За измеренное значение принимается среднее, определенное по всем доступным для вычислений диапазонам с исключением двух наиболее удаленных от среднего значений, если среднеквадратическое относительное отклонение превышает 1%.

В целях снижения погрешностей и исключения случайных выбросов ряды измерений разделяются на серии из нескольких одиночных измерений. Результаты, полученные в серии, усредняются по описанной выше процедуре и определяется среднеквадратическое отклонение, интерпретируемое как погрешность измерения ОСО в серии. Результаты сравнения дневных протоколов измерений озонометров «Пион» № 1 и № 2 и эталонного озонометра Брюэра № 43 (г. Кисловодск, Высокогорная научная станция Института физики атмосферы АН СССР) приведены в [2].

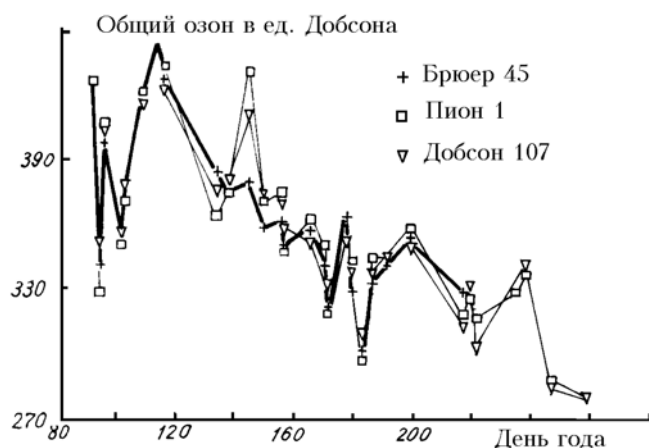


Рис. 3. Результаты измерений озонометрами Брюэра № 45, Добсона № 107 и озонометром «Пион» № 1 в весенне-осенний период 1991 г. в Центральной аэрологической обсерватории

Весной 1991 г. спектрометр-озонометр «Пион» № 1 был перевезен в Центральную аэрологическую обсерваторию и установлен на одной площадке с озонометрами Брюэра № 45 и Добсона № 107. Результаты совместных измерений представлены на рис. 3. Приведены среднедневные показания приборов в дни, когда включался «Пион». Рассчитанные среднеквадратические отклонения показаний двух приборов составляют соответственно: озонометр Добсона — озонометр Брюэра — 10; Добсона — «Пион» — 10, «Пион» — Брюэра — 14 Д. е. Таким образом, озонометр «Пион» оказывается почти того же класса точности, что и озонометры Брюэра и Добсона, если судить по среднедневным показаниям. При этом, однако, надо учитывать, что приборы Брюэра и Добсона обладают заметно лучшей воспроизводимостью показаний в ходе дневных наблюдений [2], но спектрометр-озонометр «Пион» обеспечивает возможность измерений в более широком диапазоне условий наблюдения (в частности, при больших значениях воздушных и озонных относительных масс [2]). Что касается улучшения воспроизводимости показаний (уменьшения случайных погрешностей измерений), то в третьем образце прибора предприняты модификации системы слежения и электронного тракта регистрации с целью устранения этого недостатка. О достигнутом эффекте можно будет судить после проведения испытаний спектрометра-озонометра «Пион» № 3.

1. Красовский А. Н., Людчик А. М., Неверович Л. Ч. и др. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 4. С. 422 — 427.

2. Ашкинадзе С.Д., Балин А.А., Долгий С.В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. № 1. С. 101–105.
3. Людчик А.М., Красовский А.Н., Турышев Л.Н., Чернявский А.Ф. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1988. Т. 24. № 1. С. 75–81.
4. Людчик А.М., Жучкевич В.В., Красовский А.Н., Турышев Л.Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. № 1. С. 45–52.
5. Людчик А.М., Красовский А.Н., Турышев Л.Н. О влиянии поправок к закону Бугера на точность работы УФ-спектрометров-озонметров. Минск, 1988. 15 с. Деп. в ВИНТИ 24.08.88 № 6705-B88.
6. Красовский А.Н., Людчик А.М., Неверович Л.Ч., Турышев Л.Н. // Журн. прикл. спектр. 1991. Т. 55. № 3. С. 472–477.
7. Кузнецов Г.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1975. Т. 11. № 6. С. 647–651.
8. Garrison L.M., Doda D. D., Green A.E.S. // Appl. Opt. 1979. V. 18. № 6. P. 850–855.
9. Saunders R.D., Kostkowski H.J., Green A.E.S. et al. // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. № D4. P. 5215–5226.
10. Хргиан А.Х., Кузнецов Г.И. Проблема наблюдений и исследований атмосферного озона. М.: МГУ, 1981. 216 с.
11. Frohlich C., Shaw G.E. // Appl. Opt. 1980. V. 19. № 11. P. 1773–1775.

НИИ прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко, Минск  
Центральная аэрологическая обсерватория, Долгопрудный

Поступила в редакцию  
3 января 1992 г.

A.N. Krasovskii, A.M. Lyudchik, L.Ch. Neverovich, L.N. Turyshev,  
V.A. Vartanyan, S.V. Dolgii, Yu.A. Klimov. **An UV Spectrometer- Ozonomeier «PION»:  
Measurement Technique and Some Results of Intercomparison.**

A novel technique for measuring total ozone content in the atmosphere with the help of an UV solar spectrometer-ozonometer «PION» is discussed. Measurement data obtained using a «PION» device during the spring to fall period of 1991 are compared with the data obtained with Brewer 45 and Dobson 107 instruments. The comparison has shown that the «PION's» daily mean data well agree with the data obtained with the Brewer and Dobson instruments.