

УДК 551.521

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ НАЗЕМНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СПЕКТРОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА ЧАСТОТАХ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА $10_{0,10} - 10_{1,9} (f_0 = 142,175 \text{ ГГц})$

С. В. Логвиненко, С. В. Соломонов, С. Б. Розанов, Е. П. Кропоткина, А. Н. Лукин

Созданный в Физическом институте им. П. Н. Лебедева автоматизированный спектро радиометр для измерения вращательного спектра излучения атмосферного озона (центральная частота 142,175 ГГц) позволяет осуществлять постоянные наблюдения озонного слоя над московским регионом. Описана методика измерений, программные средства, и приведены некоторые результаты спектральных измерений атмосферного озона.

Измерение спектров теплового радиоизлучения атмосферы с поверхности Земли на частотах спектральной линии озона с центром на 142,175 ГГц (вращательный переход $10_{0,10} - 10_{1,9}$, длина волны 2,2 мм) необходимо для изучения дистанционными методами вертикально-временного распределения озона в стратосфере и мезосфере, что важно для решения фундаментальных проблем физики атмосферы, актуальной проблемы изменений в озонном слое, задач распространения радиоволн в поглощающей озоносфере и др. [1].

Эта уширенная соударениями молекул спектральная линия расположена в окне прозрачности атмосферы, ее форма содержит информацию о концентрации молекул озона на различных высотах. Поэтому из измеренной с помощью наземного спектро радиометра спектральной линии озона можно восстановить вертикальный профиль содержания этой газовой составляющей [1 - 4] с использованием известных математических методов.

Созданный в ФИАН многоканальный спектро радиометр для измерения спектров излучения атмосферного озона с системой автоматизации на базе персональной ЭВМ позволяет осуществлять постоянные наблюдения озонного слоя над московским регионом

на миллиметровых (ММ) волнах и обеспечивает надежные измерения относительно слабого излучения в указанной спектральной линии.

Ниже описаны созданные программно-технические средства для измерений излучения атмосферного озона, оперативной обработки информации и приведены некоторые результаты этих измерений.

Методика измерений и программные средства. Методика измерений относительно слабых полезных сигналов с информацией о спектре теплового излучения молекул атмосферного озона имеет характерные особенности. Известно [1, 2], что яркостная температура в центре линии озона в среднем составляет около 30 K (при наблюдении под оптимальным углом места), что во много раз меньше температуры собственного шума приемника спектро радиометра, характерная величина которого составляет около 1500 K для неохлаждаемого приемника при однополосном режиме приема. Поэтому для увеличения отношения сигнала к шуму на выходе спектро радиометра осуществляется накопление сигнала в каждом из его спектральных каналов с помощью разработанных программно-технических средств на базе персональной ЭВМ.

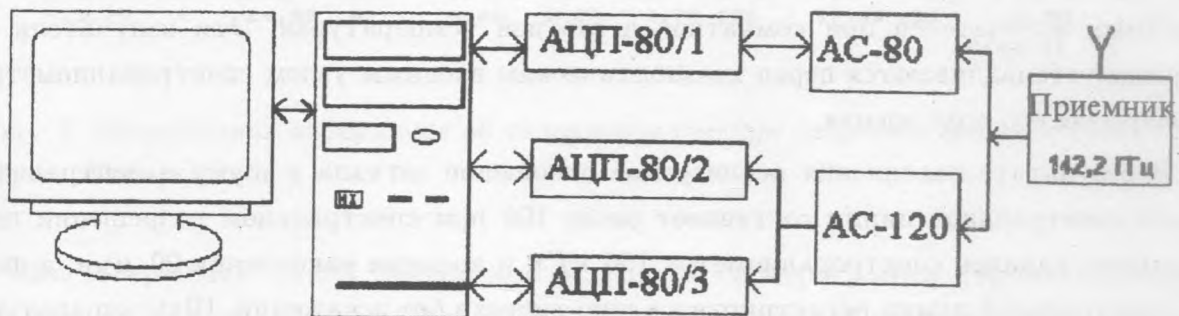


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного комплекса спектро радиометра.

Структурная схема автоматизированного комплекса спектро радиометра представлена на рис. 1. В состав этого комплекса входит супергетеродинный приемник диапазона $142,2\text{ ГГц}$, два включенных параллельно фильтровых анализатора спектра АС-80 и АС-120 (созданы в ИПФ РАН при участии ФИАН), интерфейсные модули и персональная ЭВМ. Анализатор спектра АС-80 имеет 80 спектральных каналов с переменным шагом по частоте и переменным спектральным разрешением от 200 кГц в центре линии до 20 МГц на ее крыле. Анализатор спектра АС-120 имеет 120 каналов, каждый с

разрешением 100 кГц . Первый анализатор спектра позволяет регистрировать всю спектральную линию в полосе 260 МГц , второй прибор дает возможность анализировать спектральные особенности центральной части линии в полосе 12 МГц .

Многоканальный ввод аналоговой информации в ЭВМ от обоих анализаторов спектра и цифровой ввод-вывод (также для управления приемной аппаратурой) реализованы на интерфейсных модулях АЦП-80 (рис. 1). Эти модули представляют собой 80-канальные аналого-цифровые преобразователи с масштабируемым усилением и возможностью наращивания количества каналов (в данном случае до 160 каналов). В состав модулей входят также шины приема-передачи цифровых данных. Время преобразования АЦП составляет 30 мкс , разрядность 10 бит .

Для оперативной проверки параметров комплекса спектрорадиометра созданы программы, с помощью которых на экран дисплея в графическом виде выводятся значения полезных сигналов (в милливольтгах), а также среднеквадратические значения, характеризующие шум аппаратуры в каждом из каналов. Оперативный контроль параметров аппаратуры осуществляется перед каждым сеансом наблюдения.

Для представления зарегистрированного полезного сигнала в единицах яркостной температуры производится калибровка спектрорадиометра с помощью чернотельных тепловых излучателей при комнатной и азотной температурах. Эти излучатели по очереди устанавливаются перед квазиоптическим входным узлом спектрорадиометра, перекрывая его поле зрения.

В результате накопления реализуемое отношение сигнала к шуму в центральной части спектральной линии составляет около 100 при спектральном разрешении центральных каналов спектрорадиометра 100 кГц и времени накопления 20 мин , а форма спектральной линии регистрируется практически без искажений. Шум аппаратуры снижает точность восстановления вертикального профиля озона по измеренной спектральной линии не более, чем на 5 процентов.

Одновременно со спектральными измерениями производятся широкополосные измерения фонового излучения тропосферы, результаты которых позволяют затем ввести поправки для исключения тропосферного ослабления (пары воды, облачность) и пересчета спектров озона к "внетропосферным" условиям наблюдения.

Программа наблюдения позволяет производить регистрацию сигналов с информацией о спектре атмосферного озона в автоматическом режиме. Все параметры, необходимые для проведения сеанса наблюдений (время калибровки и измерения, величина калибровочной "ступеньки", количество используемых спектральных каналов, диапа-

зон измеряемых напряжений на выходе анализатора спектра, период опроса каналов АС и др.), сгруппированы по функциональному признаку и помещены в отдельное меню. Предусмотрена возможность изменять эти параметры в соответствии с задачей и условиями наблюдения.

F1-ТАБЛИЦА F2-ЗВУК F3-ПРЕРВАТЬ F4-ПАРАМЕТРЫ F5-ДАТА F6-КАНАЛЫ F7-ЗАГОЛОВОК

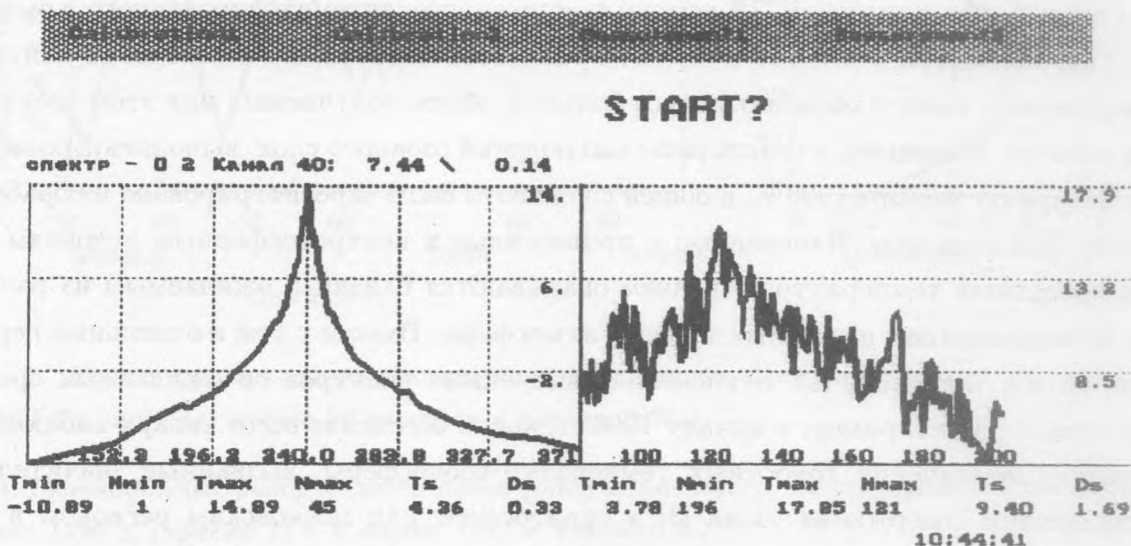


Рис. 2. Оперативная информация об измеряемом спектре излучения озонного слоя (вид на экране дисплея).

По завершении цикла накопления отдельной спектрограммы (время накопления обычно до нескольких минут) на экран дисплея выводятся графики спектра яркостных температур. На экран выводятся также и значения ряда измеренных параметров спектрограммы. В качестве примера, на рис. 2 представлен типичный вид спектра на экране, получаемого при времени накопления 100 с. На левом графике представлен измеренный спектр в полосе 260 МГц (АС-80), на правом графике представлен участок того же спектра, измеренный одновременно в полосе 12 МГц, с более высоким спектральным разрешением на АС-120. По оси абсцисс левого графика отложены значения частот в МГц (на выходе преамплификатора после второго преобразования сигнала по частоте) и номера каналов (с 81 до 200) на правом графике, по оси ординат – значения яркостных температур. Эти спектральные данные регистрируются в виде отдельных файлов на гибком диске, либо на любом другом накопителе.

Программа обработки информации обеспечивает возможность осреднять отдельные спектры и получать средний спектр за большой период наблюдения. С помощью этой программы результаты спектральных измерений пересчитываются к внетропосферным условиям наблюдения и представляются в единицах яркостных температур. Такое представление спектров, полученных в разное время, необходимо для выявления вариаций излучения озона различного масштаба времени от нескольких минут до нескольких лет.

Результаты измерений. С помощью описанного автоматизированного комплекса спектрометра в Москве в ФИАН проводятся постоянные наблюдения излучения атмосферного озона и обрабатывается большой объем получаемых при этом спектральных данных. Например, в результаты наблюдений озонного слоя, выполненных за период с января по декабрь 1996 г., в общей сложности было зарегистрировано и обработано свыше 3500 спектров. Измеренные и приведенные к внетропосферным условиям спектры яркостных температур в среднем оказываются близки к ожидаемым из расчетов [1] с использованием известных моделей атмосферы. Вместе с тем в отдельные периоды обнаружены значительные отклонения измеренных спектров от ожидаемых средних. Это относится, например, к началу 1996 г., когда в течение всего января наблюдались пониженные значения яркостных температур озоносферы, вызванные значительным уменьшением содержания озона [3] в стратосфере над московским регионом в условиях устойчивой зимней циркуляции. Постоянные измерения на ММ волнах позволили проследить особенности перехода озоносферы от истощенного состояния в январе к состоянию с повышенным содержанием озона в апреле 1996 г. Этот переход сопровождался поочередным увеличением и уменьшением излучения озоносферы (рис. 3).

Проведенный анализ результатов спектральных измерений (решение обратной задачи, представление полученных результатов в терминах вертикально-временного распределения содержания озона, сопоставление с данными аэрологического зондирования атмосферы) показал, что причиной наблюдавшихся вариаций интенсивности излучения является, в основном, изменчивость вертикального распределения озона под воздействием протекающих в стратосфере волновых процессов планетарного масштаба, развития финального стратосферного потепления [3]. В результате этих процессов в стратосфере над московским регионом поочередно появлялись воздушные массы с пониженным и повышенным содержанием озона.

Интересно сопоставить эти результаты с данными, полученными на ММ волнах в начале 1989 г. [4]. В этот период (также как и в начале 1996 г.) после устойчивой зимней циркуляции в стратосфере и сопутствующего ей уменьшения содержания озона в янва-

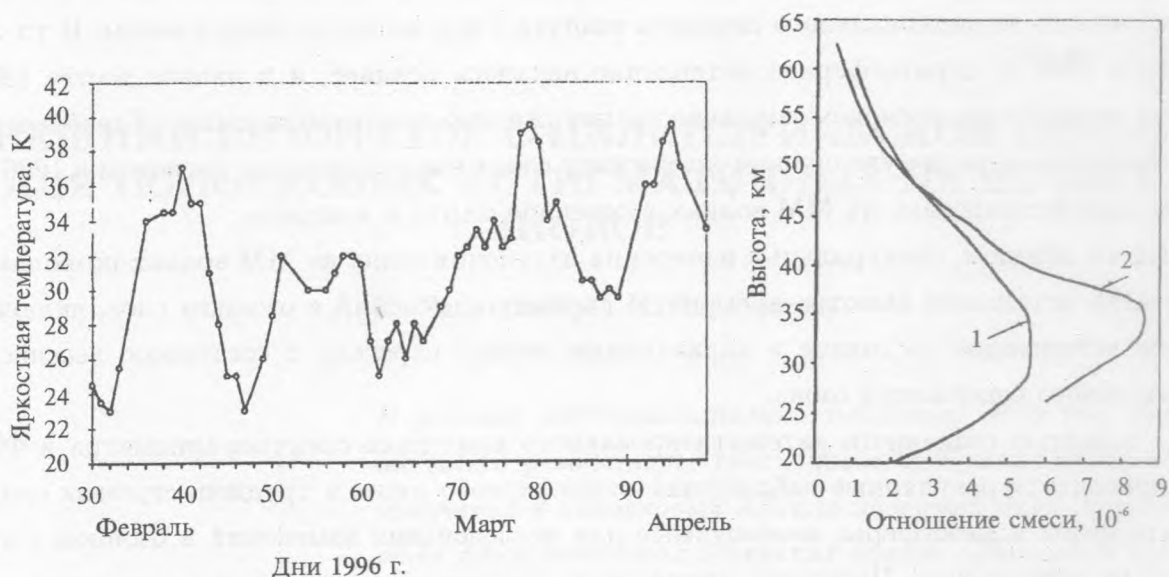


Рис. 3. Изменения яркостной температуры озонного слоя, измеренной на частоте 142,175 ГГц при угле места 30 градусов в начале 1996 г.

Рис. 4. Вертикальные распределения озона (отношение смеси) по результатам наблюдений 6 марта 1996 г. (кривая 1) и 6 марта 1989 г. (кривая 2).

ре возникло сильное возмущение – стратосферное потепление. Сравнение показывает, что в откликах озонного слоя на происходящие возмущения в начале 1989 г. и 1996 г. проявляются общие закономерности, хотя имеется и различие.

Общим для обоих периодов наблюдения является зарегистрированное на ММ волнах пониженное содержание озона в январе 1989 и январе 1996 гг. и последующее увеличение (в среднем) содержания озона как в 1989 г., так и в 1996 г. Отличие состоит прежде всего в более глубоком истощении озона в январе 1996 г., что может быть вызвано возросшим влиянием антропогенных загрязнений атмосферы. Другое отличие вызвано более ранним началом стратосферного потепления в 1989 г. Поэтому связанное с этим явлением увеличение содержания озона в стратосфере над Москвой в 1989 г. также произошло раньше. В качестве примера, на рис. 4 представлены результаты наблюдений вертикального распределения озона, выполненных в начале марта в разные годы (6 марта 1996 г., кривая 1, и 6 марта 1989 г., кривая 2). Различия этих результатов вызваны упомянутыми особенностями атмосферных процессов в марте 1996 и 1989 гг. В начале весны 1989 г. в стратосфере над московским регионом завершалось страто-

сферное потепление, и стратосфера в это время уже была обогащена озоном за счет интенсивного меридионального переноса воздуха с его высоким содержанием. В то же время в 1996 г. стратосферное потепление началось позднее, и в начале марта 1996 г. над московским регионом сохранялось пониженное содержание озона. Характерное для весеннего периода увеличение содержания озона над московским регионом в 1996 г. было зарегистрировано на ММ волнах в середине марта и в апреле.

Таким образом, спектральные измерения излучения озона на ММ волнах позволяют получить детальную высотно-временную картину изменений в озонном слое, включающую истощенное состояние и характерные детали перехода к состоянию весеннего повышенного содержания озона.

С помощью созданного автоматизированного комплекса спектрорадиометра в ФИАН проводятся регулярные наблюдения атмосферного озона в труднодоступных слоях стратосферы и мезосферы, необходимые для исследования изменений в озонном слое, включая аномальные. Получены уникальные данные об изменениях в озонном слое, вызванных атмосферными процессами.

Настоящая работа была поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований.

Авторы выражают глубокую благодарность чл.-корр. РАН И. И. Собельману и проф. Р. Л. Сороченко за поддержку работы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Собельман И. И., Соломонов С. В., Сороченко Р. Л. Вестник РАН, **63**, 8, 721 (1993).
- [2] Саломонович А. Е., Сороченко Р. Л., Кропоткина Е. П. и др. Известия ВУЗов, Радиофизика, **32**, 546 (1990).
- [3] Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н., Розанов С. Б. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 1 – 2, 75 (1997).
- [4] Соломонов С. В., Кропоткина Е. П., Лукин А. Н. и др., Известия АН. Физика атмосферы и океана, **29**, N 4, 525 (1993).

Поступила в редакцию 28 февраля 1997 г.