УДК 551.510.534:528.811

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ОЗОНА МЕТОДАМИ СПЕКТРОСКОПИИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

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

Описаны спектральные методы и приведены некоторые результаты наблюдений атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах в ФИАН.

Исследование вертикального распределения молекул атмосферного озона является важным для изучения процессов в озоносфере, ее откликов на возмущения естественного и антропогенного происхождения. Измерение вертикального профиля озона осуществляется разными методами. Новые возможности для решения проблемы озона открывают дистанционные спектральные методы исследования озонного слоя на миллиметровых (ММ) радиоволнах, дистанционное зондирование озоносферы путем регистрации спектра теплового излучения молекул озона в указанной области длин волн с поверхности Земли.

Важной особенностью диапазона миллиметровых (ММ) волн является возможность регистрации с поверхности Земли теплового излучения молекул ряда атмосферных газов, и в том числе озона, на частотах их вращательных спектральных линий, расположенных в окнах прозрачности атмосферы в диапазоне длин волн 1 – 3 *мм* [1, 2]. Контур спектральной линии озона формируется при переносе излучения через слои мезосферы и стратосферы с быстро меняющимся с высотой давлением воздуха. Поскольку в слоях ниже 70 *км* уширение спектральных линий молекул в миллиметровом диапазоне определяется в основном столкновениями молекул (доплеровское уширение становится определяющим выше 70 *км*), то более узкие линии формируются в верхних слоях атмосферы и характеризуют содержание там молекул озона, а широкие линии генерируются более низкими слоями стратосферы. На рис. 1 в качестве иллюстрации представлен результат расчета вкладов в яркостную температуру нескольких условно

выделенных слоев атмосферы (нижняя часть рисунка). Результирующий контур спектральной линии озона с центром на частоте $f_0 = 142.175\,ГГц$ (вращательный переход $10_{0.10} - 10_{1.9}$) представлен на верхней части рис. 1 для случая наблюдения с поверхности Земли под углом 70° в условиях зимней атмосферы умеренных широт (методика расчета изложена в [1]). Из расчетов следует, что форма результирующего контура спектральной линии озона чувствительна к вариациям содержания озона вдоль луча зрения и отражает особенности вертикального распределения концентрации этих молекул. Поэтому вертикальное распределение озона может быть восстановлено по форме спектральной линии, зарегистрированной многоканальным спектрорадиометром. Задача определения (восстановления) вертикального распределения характеристик атмосферы – в данном случае озона – по ее тепловому излучению в различных участках спектра с математической точки зрения сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода. Известны эффективные математические методы решения этой проблемы. В результате численного эксперимента по восстановлению вертикального профиля озона из указанной спектральной линии было оценено влияние различных факторов, таких, как шум приемной аппаратуры, ослабление полезного сигнала в тропосфере и др. на точность результатов восстановления вертикального профиля озона, и были сформулированы требования к озонометру диапазона ММ волн [1]. Этим требованиям удовлетворяют параметры созданного в ФИАН озонометра [2, 3], с помощью которого в течение ряда последних лет проводятся регулярные наблюдения озонного слоя на Радиоастрономической станции ФИАН (г. Пущино Московской области).

Отличительными особенностями этого озонометра являются реализуемые с его помощью круглосуточные измерения вертикального профиля озона в условиях дымки, тумана и при наличии облаков с низкой водностью и слоев аэрозоля, а также возможность измерений содержания озона в стратосфере и мезосфере, включая высоты, недоступные для шаров-озонозондов, лидаров и традиционных наземных оптических методов. С помощью озонометра ФИАН выполнялись наблюдения озоносферы в содружестве с обсерваториями других стран. Озонометр был включен в состав наземной сети по международной программе DYANA.

Озонометр ФИАН [2, 3] собран по схеме модуляционного супергетеродинного спектрорадиометра. В его состав входят: приемный блок с квазиоптическим узлом, преобразовательно-усилительным трактом, системами стабилизации частоты гетеродинов, анализатор спектра и ЭВМ, размещаемые внутри лабораторного помещения с радиопрозрачным окном. Диапазон возможных зенитных углов наблюдения составляет

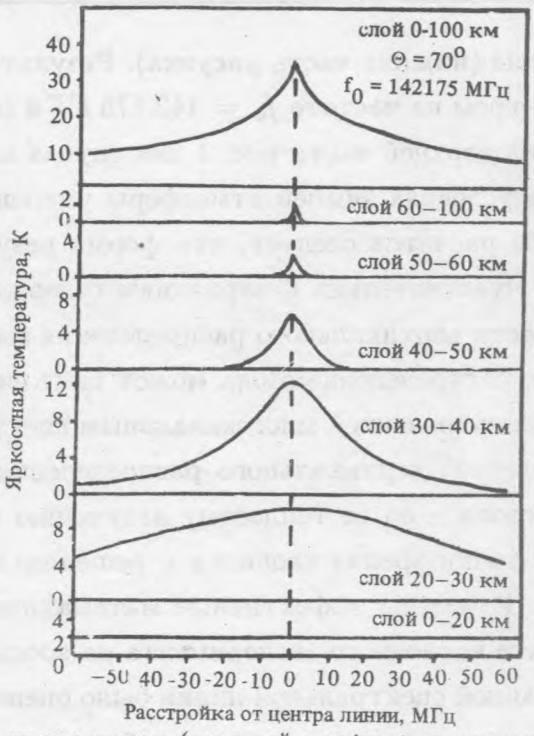

Рис. 1. *Спектральная линия озона (верхний график), полученная из решения уравнения переноса излучения, и вклады в излучение различных слоев атмосферы.*

от 0 до 90°. Регистрируемое тепловое излучение молекул озона на частотах спектральной линии с центром $f_0 = 142.175\,ГГц$ через радиопрозрачное окно поступает в приемный блок озонометра, где смешивается с колебаниями гетеродина (на основе лампы обратной волны) и преобразуется по частоте в область первой промежуточной частоты $3.5 - 4.2\,ГГц$ с помощью преобразователя частоты на диоде с барьером Шоттки. Затем происходит усиление полезных сигналов и производится их спектральный анализ с помощью 128-канального фильтрового анализатора спектра, работающего в режимах с разрешением $500\,кГц$ или $125\,кГц$. Первый режим используется для регистрации вертикального профиля озона на высотах примерно от 27 до $65\,км$, а второй для наблюдения озона выше $60\,км$. Для повышения чувствительности аппаратуры входные цепи приемного блока охлаждаются до криогенных температур и, кроме того, производится накопление сигнала с помощью ЭВМ. Шумовая температура приемного блока озонометра – около $1000\,K$. Высокая стабильность частоты аппаратуры (лучше, чем 10^{-7}) достигается благодаря системе автоподстройки фазы и частоты колебаний гетеродинов с использованием опорных кварцевых генераторов. Термостабилизация узлов озонометра, размещаемых внутри помещения с фиксированной температурой, а также

конструктивные и схемные особенности квазиоптического и электронного узлов обеспечивают высокую стабильность всех параметров озонометра, что было подтверждено тщательными исследованиями его характеристик при лабораторных и натурных испытаниях.

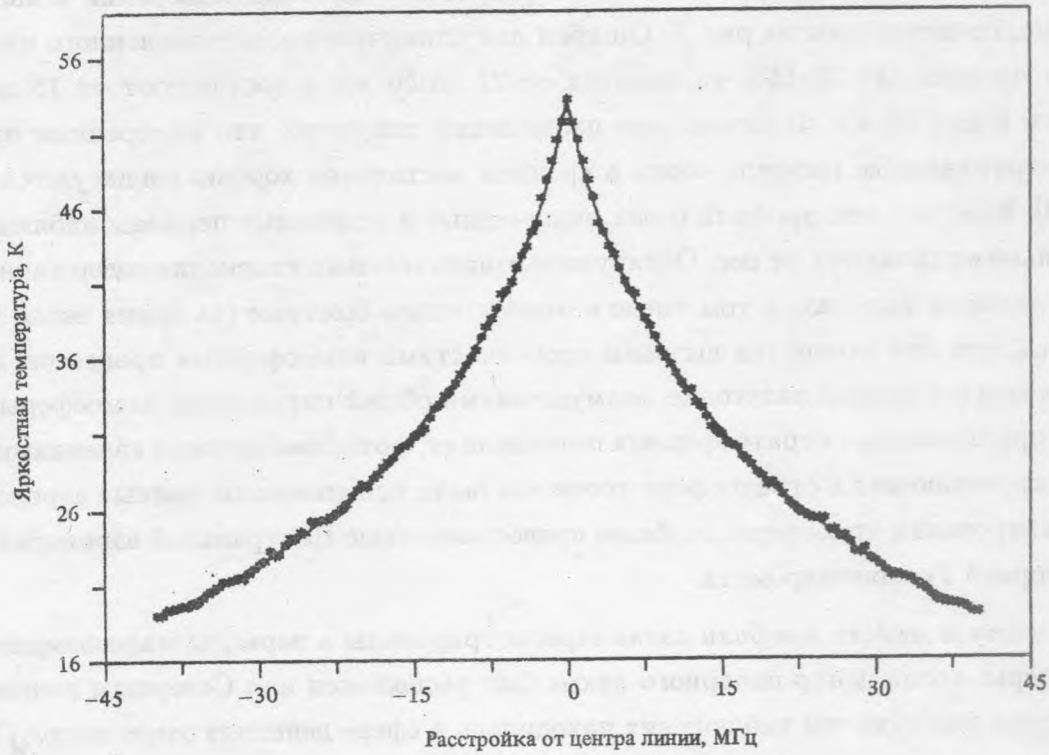

Рис. 2. *Пример спектральной линии озона на частоте 142 ГГц, зарегистрированной в обсерватории Пущино (РАС ФИАН).*

Автоматизированная процедура измерений спектра излучения атмосферного озона включает в себя периодическую калибровку озонометра с помощью двух тепловых излучателей (макетов "черного тела"), размещаемых поочередно перед приемным блоком. Один из них находится при комнатной температуре, а другой при температуре жидкого азота. Полезные сигналы с выхода анализатора спектра запоминаются и обрабатываются ЭВМ. Спектральная линия озона (рис. 2) регистрируется практически без искажений благодаря реализованному высокому спектральному разрешению и чувствительности аппаратуры. Величина ослабления сигнала в тропосфере определяется экспериментально путем измерения ее излучения в широкой полосе на волне 2 мм при различных зенитных углах радиоастрономическими методами с помощью отдельного канала.

Наблюдения стратосферного озона на ММ волнах проводились в отдельные периоды с 1987 по 1993 гг. За это время было зарегистрировано свыше 3000 спектров с информацией о вертикальном распределении содержания молекул озона. Примеры вертикальных профилей озона, полученных в результате дневных измерений в холодное полугодие, представлены на рис. 3. Ошибки для единичного восстановленного профиля озона не превосходят 10–15% на высотах от 27 до 50 *км* и составляют от 15 до 30% для слоев выше 50 *км*. В результате наблюдений получено, что измеренные на ММ волнах вертикальные профили озона в среднем достаточно хорошо согласуются с моделью [4]. Вместе с тем профили озона, полученные в отдельные периоды наблюдений, значительно отличаются от нее. Обнаружены значительные изменения содержания озона на отдельных высотах, в том числе и относительно быстрые (за время около часа). Оказалось, что эти изменения вызваны особенностями атмосферных процессов, их изменчивостью в холодное полугодие, возмущениями общей циркуляции атмосферы, процессами при внезапных стратосферных потеплениях, фотохимическими явлениями. При анализе протекающих в стратосфере процессов были использованы данные аэрологического зондирования атмосферы, любезно предоставленные Центральной аэрологической обсерваторией Роскомгидромета.

а. Близкие к модели профили озона зарегистрированы в периоды маловозмущенной стратосферы, когда центр полярного вихря был расположен над Северным полюсом, а стратосфера над пунктом наблюдения находилась в сфере действия этого вихря. Такие профили получены, например, во время наблюдений с 27 января по 3 февраля 1988 г. и с 15 по 20 ноября 1988 г. (кривая 1 на рис. 3).

б. Пониженное содержание озона. Пониженное на 20–50% по сравнению с моделью содержание озона на высотах 30–55 *км* обнаружено при смещении центра полярного стратосферного вихря в сторону Европы (кривая 2 на рис. 3). При этом максимум относительного истощения озона наблюдался на высоте 40–45 *км*, где озонный слой наиболее чувствителен к антропогенным загрязнениям. Оказалось, что такое истощение озонного слоя на указанных высотах связано с выносом полярного воздуха в умеренные широты, включая область стратосферы над пунктом наблюдения. Как известно, в последние годы в полярном воздухе были обнаружены повышенные концентрации хлоросодержащих компонент, поэтому можно предположить, что измеренное на ММ волнах истощение озона обусловлено его разрушением в каталитическом цикле с участием хлора.

в. Повышенное содержание озона в слое 30–40 *км* с малыми изменениями ото дня

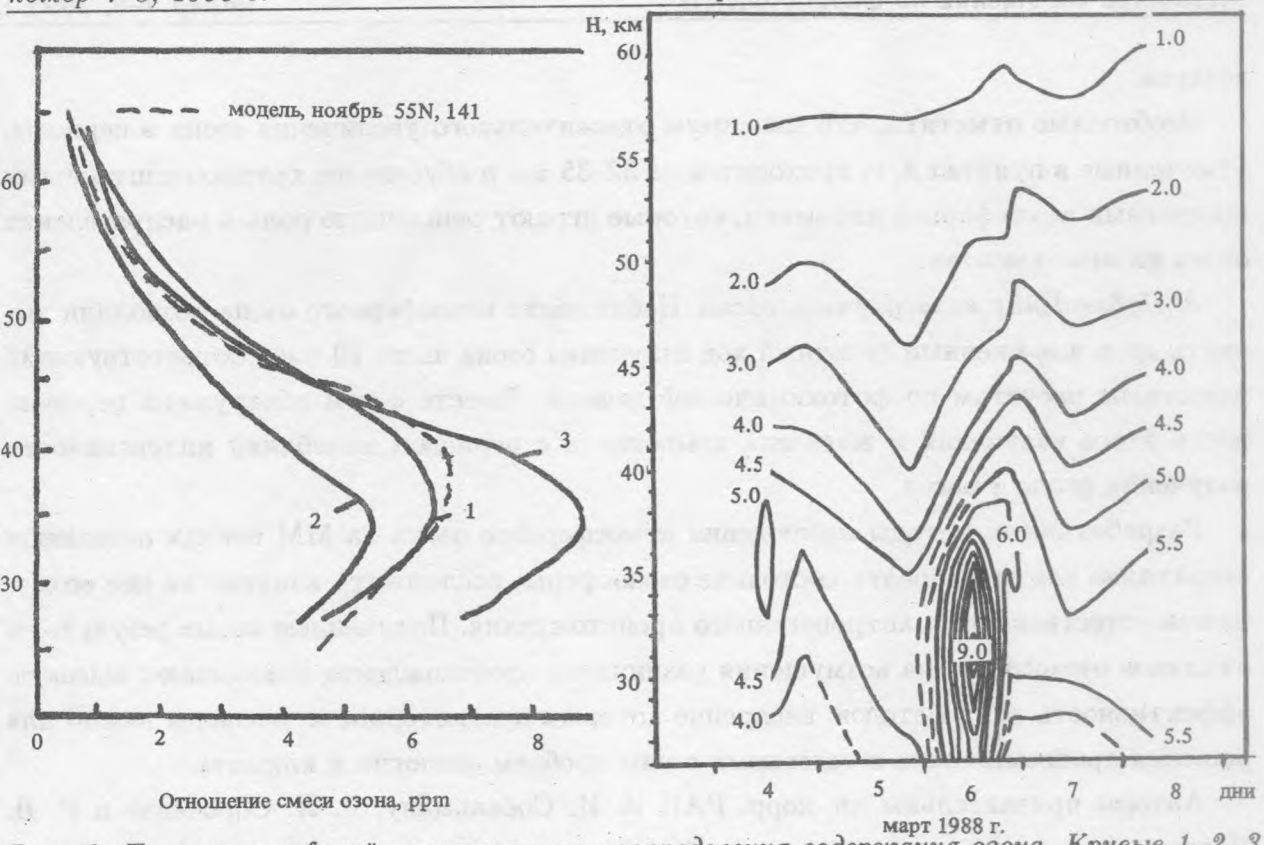

Рис. 3. *Примеры профилей вертикального распределения содержания озона. Кривые 1, 2, 3 – профили озона, зарегистрированные 20.11.1988, 4.01.1989 и 7.03.1989 гг, соответственно. Рис. 4. Распределение относительного содержания озона в pptv в зависимости от высоты и времени по результатам наблюдений в марте 1988 г.*

ко дню было зарегистрировано в периоды наблюдений, которым соответствовала либо последняя стадия стратосферного потепления, либо завершение весенней перестройки циркуляции стратосферы (кривая 3 на рис. 3). В это время уже завершился вынос богатого озоном воздуха в умеренные и высокие широты.

г. Быстропротекающие изменения озона. Во время таких явлений, как внезапные стратосферные потепления, были зарегистрированы большие по амплитуде (до 2 раз) изменения в вертикальном распределении озона, которые произошли относительно быстро – примерно в течение часа. Оказалось, что такие изменения в содержании озона обусловлены интенсивным межширотным обменом воздушных масс, переносом богатого озоном воздуха в высоких и средних широтах. Пример таких относительно быстрых изменений содержания озона, зарегистрированных в начале марта 1988 г., представлен на рис. 4., где линиями показаны уровни равных объемных отношений смеси озона и

воздуха.

Необходимо отметить, что максимум относительного увеличения озона в периоды, отмеченные в пунктах в, г, приходится на 32–35 *км* и обусловлен крупномасштабными процессами атмосферной динамики, которые играют решающую роль в распределении озона на этих высотах.

д. Наблюдения мезосферного озона. Наблюдения мезосферного озона позволили выявить ярко выраженный суточный ход излучения озона выше 60 *км*, соответствующий известным расчетам по фотохимической модели. Вместе с тем обнаружена переменность этого излучения и выявлена компонента с периодом колебаний интенсивности излучения около 4 часов.

Разработанные методы наблюдения атмосферного озона на ММ волнах позволяют оперативно контролировать состояние озоносферы, исследовать влияние на нее возмущений естественного и антропогенного происхождения. Полученные новые результаты откликов озоносферы на возмущения различного происхождения показывают высокую эффективность этих методов, внедрение которых в мониторинг атмосферы важно для решения проблемы озона и связанных с ним проблем экологии и климата.

Авторы признательны чл.-корр. РАН И. И. Собельману, Р. Л. Сороченко и Р. Д. Дагкесаманскому за поддержку данной работы, а также выражают глубокую благодарность Г. Т. Смирнову, В. А. Гусеву, С. В. Логвиненко и другим сотрудникам Радиоастрономической станции ФИАН, способствовавшим подготовке аппаратуры и проведению измерений.

Данная работа была поддержана грантом фонда Сороса, присужденным Американским Физическим обществом.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. Препринт ФИАН N 148, М., 1989.

[2] Собельман И. И., Соломонов С. В., Сороченко Р. Л. Вестник РАН, N 8 (1993).

[3] Саломонович А. Е. и др. Изв. ВУЗ. Радиофизика, N 5, 546 (1990).

[4] Keating G. M., Pitts M. C. Adv. Space Res., **7**, 37 (1987).

Поступила в редакцию 20 октября 1993 г.