

МОНИТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА МИЛЛИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛНАХ РЕШЕНИЕ ВАЖНЕЙШЕЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ

Одна из серьезных проблем наступившего века – исследование озонового слоя атмосферы, защищающего жизнь на Земле от УФ-излучения Солнца и влияющего на тепловой режим атмосферы и климат. Особую остроту этой проблеме придают отчетливо обозначившееся в последние десятилетия истощение озонового слоя в полярных и средних широтах и появление “озонных дыр” и “мини-дыр” над Антарктидой и Северным полушарием. Для получения оперативной и точной информации о состоянии озонового слоя и прогнозирования изменений в нем необходимы надежные методы измерения содержания озона на различных высотах. Значительный объем информации о глобальном состоянии озоносферы поступает со спутников, однако особенности вертикального распределения озона (ВРО) над конкретными регионами, в том числе над таким густонаселенным, как московский, изучены хуже. Решить эту задачу может наземное дистанционное зондирование озона на миллиметровых радиоволнах.

ЗАДАЧИ И ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ОЗОНА НА ММ-ВОЛНАХ

Озон играет важную роль в физико-химических процессах в атмосфере. Поглощаемое им УФ-излучение Солнца вносит основной вклад в нагрев стратосферы (высоты 10-50 км) и мезосферы (50-90 км). Изменение пространственного распределения озона, вызванное естественными или антропогенными причинами, влияет на тепловой баланс и динамику атмосферы, на температуру поверхности Земли и климат. Выше 30 км на содержание озона сильно влияет загрязнение атмосферы. По оценкам [1], уменьшение содержания озона на высотах около 40 км происходит в результате каталитических реакций с участием хлора. На меньших высотах на пространственное распределение озона больше влияет динамика атмосферы. Для контроля состояния озонового слоя на высотах от 15 до 75 км и обнаружения изменений, происходящих под влиянием как динамических, так и химических воздей-

С.Соломонов, С.Розанов

ствий, а также для исследования процессов в озоновом слое при смене дня и ночи незаменимо наземное дистанционное зондирование на мм-волнах. Этот метод имеет существенные преимущества перед наземными оптическими (УФ-спектрометры и лидары) и контактными (с шаров-зондов, ракет и самолетов) методами. Миллиметровые волны, по сравнению с ИК-, видимым и УФ-излучением, относительно слабо поглощаются в облаках и аэрозолях, поэтому в мм-диапазоне озон можно контролировать круглосуточно и при различных метеорологических условиях (сплошная облачность, снег и пр.). По предельным высотам мониторинг на мм-волнах превосходит озонзонды (потолок около 30 км), оптические спектрометры и лидары (предельные высоты около 40 км). К тому же, метод – пассивный и экологически безопасный.

Значительная часть территории России лежит в зоне полярных и приполярных широт, где в холодные сезоны последних лет происходит значительное истощение озонового слоя. Мониторинг на мм-волнах позволяет обнаружить ранние стадии разрушения озонового слоя и тем самым своевременно оповещать население о повышенном потоке УФ-излучения.

ОСНОВЫ МЕТОДА

Предлагаемый метод предусматривает регистрацию с поверхности Земли собственного теплового излучения озона на частотах одной из вращательных спектральных линий его молекул. Наиболее удобны для измерений линии с центральными частотами 110,836 и 142,175 ГГц (длины волн 2,7 и 2,1 мм). Эти оптически тонкие линии расположены в окнах прозрачности атмосферы между сильными линиями поглощения кислорода и водяного пара. На высотах $H \leq 75$ км их ширина определяется столкновениями молекул и пропорциональна давлению воздуха. Выше 75 км преобладает доплеровское уширение. Результирующая линия имеет узкий центральный пик, формирующийся на больших высотах, и широкие крылья, соответствующие вкладу озона с малых высот. Форма линии отражает вклад излучения озона из различных слоев атмосферы и содержит информацию о ВРО. Она очень чувствительна к вариациям содержания озона на луче зрения. В мм-диапазоне интенсивность теплового излучения озона можно ха-

Представляем авторов статьи

СОЛОМОНОВ Сергей Вячеславович. Кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Отделения Оптики ФИАН, руководитель группы “Спектроскопия мм-волн атмосферы Земли и космических источников”. Тел.: (095) 132-64-62. Факс: (095) 135-24-08. E-mail: solomon@sci.lebedev.ru

РОЗАНОВ Сергей Борисович. Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отделения Оптики ФИАН. Тел.: (095) 132-66-11. Факс: (095) 135-24-08. E-mail: sergroz@sci.lebedev.ru

рактировать яркостной температурой спектральной линии T_B , связанной с высотным профилем концентрации озона $C(H)$ соотношением

$$T_B(f) = \int_{H_0}^{H_1} C(H) \cdot K(C, f, \Theta, H) dH,$$

где $K(C, f, \Theta, H)$ – нелинейное ядро уравнения, f – частота, Θ – зенитный угол [2,3]. Задача состоит в определении $C(H)$ по измеренному спектру $T_B(f)$. При достаточно высоких спектральном разрешении и чувствительности прибора линия регистрируется практически без искажений, что позволяет с помощью специальных математических методов восстановить ВРО над пунктом наблюдения при известных распределениях температуры и давления на луче зрения [2,3]. Диапазон зондируемых высот и точность определения ВРО зависят от ширины полосы анализатора спектра (АС), его спектрального разрешения и чувствительности приемника.

РАДИОСПЕКТРОМЕТР ММ-ДИАПАЗОНА ВОЛН

Радиоспектрометр Физического института им. П.Н.Лебедева РАН (ФИАН) для мониторинга озона на частоте 142,2 ГГц состоит из малошумящего приемника, двух АС и ПК (рис. 1) [2,4,5]. Параметры спектрометра выбраны на основе результатов численного эксперимента

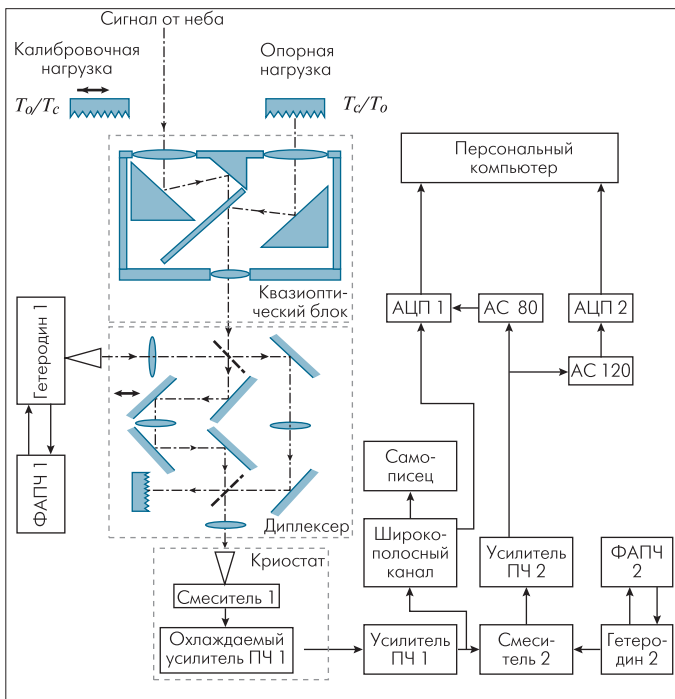


Рис. 1. Блок-схема радиоспектрометра ФИАН

[2,3]. В приемник входят антенный блок, преобразовательно-усилительный тракт и система стабилизации частот гетеродинов. Антенный блок принимает сигнал под оптимальным зенитным углом, зависящим от метеоусловий и обычно равным 60–70°. Два входных канала блока переключаются с частотой 75 Гц вращающимся зеркалом модулятора. Ширина гауссовых диаграмм направленности (ДН) каналов составляет 2,8° по уровню -10 дБ при диаметрах входных линз 120 мм (рис.2). В один из каналов поступает излучение неба, в другой – излучение от опорной чернотельной нагрузки, находящейся при температуре жидкого азота, близкой к яркостной температуре неба.

Шумовой сигнал в диплексере (интерферометр Маха-Цендера с делителями луча из плавленного кварца) складывается с колебаниями первого гетеродина на частоте 138,5 ГГц и через скалярный рупор поступает в первый смеситель. Диплексер обеспечивает однополосный режим приемника с подавлением зеркальной полосы на 20 дБ. Шумы

гетеродина подавляются интерферометром Фабри-Перо и поляризационным интерферометром Майкельсона (на рис.1 не показаны). В квазиоптических устройствах использованы линзы из плавленного

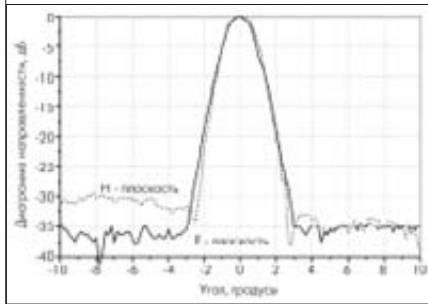
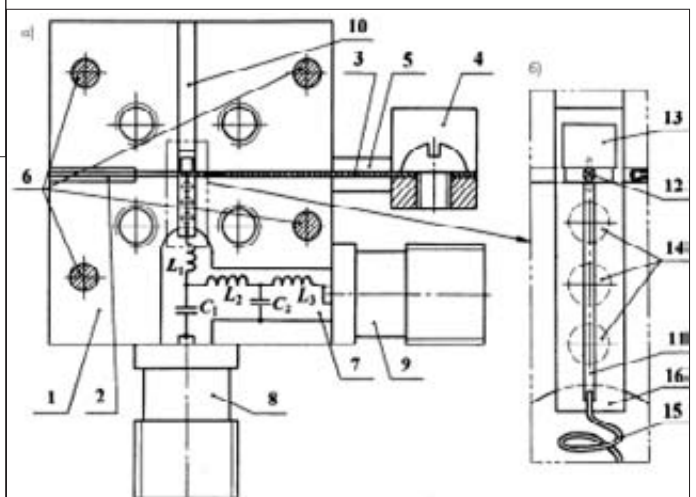


Рис.2. Диаграммы направленности одного из каналов приемника на частоте 142,2 ГГц

(ПЧ1) 3,4–4,0 ГГц. Для снижения шумов приемника смеситель и предварительный усилитель ПЧ1 с ферритовым вентилем на входе помещаются в вакуумный отсек азотного криостата и охлаждаются до -80 К. Достоинства смесителя – низкие значения шумовой температуры и потерь преобразования, высокая надежность, простота конструкции, возможность глубокого охлаждения, низкий уровень мощности гетеродина.

Волновод смесителя образован двумя симметричными латунными деталями с золотым покрытием (рис.3а). Диод устанавливается в волноводе пониженного сечения 1,6x0,2 мм² (рис.3б), переход к которому от стандартного волновода 1,6x0,8 мм² осуществляет трансформатор с крестообразным поперечным сечением. В стенках канала полосковой линии между волноводом и цепями постоянного тока и ПЧ1 с двух сторон просверлены отверстия диаметром 0,6 мм, так что линия образует семисекционный четвертьволновый НЧ-фильтр. Настройка смесителя производится петлеобразным контактным поршнем. Размеры корпуса смесителя – 19x19x16,5 мм³.

В 2-мм диапазоне смесители ФИАН не уступают лучшим приборам как на сотовых, так и на планарных ДБШ. На частоте гетеродина 147,5 ГГц при комнатной температуре однополосная шумовая температура смесителя составила 460 К. При охлаждении смесителя до 85 К на частоте гетеродина 135,2 ГГц были получены однополосная и двухполосная шумовые температуры 180 и 100 К, соответственно. На частотах ~140 ГГц однополосные потери преобразования смесителя со-



1 - Половина волноводного блока, 2 - Волноводный трансформатор, 3 - Поршень, 4 - Держатель лопоры, 5 - Направляющая лопоры, 6 - Шпилька, 7 - Палочка для цепей постоянного тока и ПЧ1, 8 - Разъем ПЧ1, 9 - Разъем полупроводникового диода, 10 - Контакт полосковой линии, 11 - Медная пластина, 12 - Диод, 13 - Контакт на диоде, 14 - Отверстие НЧ-фильтра, 15 - Силиконовый инертный изолятор, 16 - Нижний изолятор полосковой линии (ловсан)

Рис.3. Разрез смесителя в Е-плоскости волновода (а) и детали монтажа диода (б)

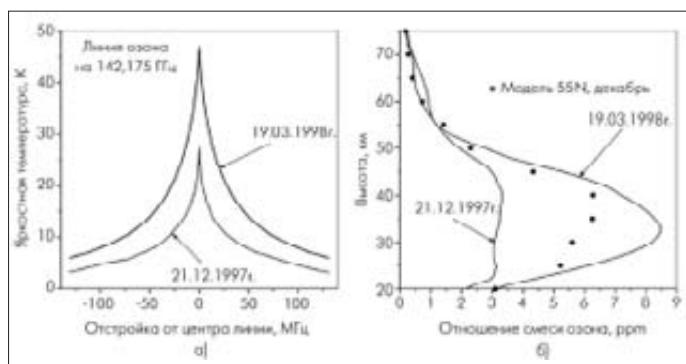


Рис.4. Пересчитанные к внеатмосферным условиям спектры озона (а) и соответствующие им ВРО (б) над Москвой 21 декабря 1997 года (истощение озона) и 19 марта 1998 года (содержание озона выше модельного). Содержание озона приведено в единицах отношения смеси, ppт, что соответствует 10^{-6} . Точками на рисунке (б) показано модельное ВРО [10]

ставляют 5–6 дБ, двухполосные – ~3 дБ. Однополосная шумовая температура радиоспектрометра на частоте 142 ГГц равна ~700 К при охлаждении приемника и ~1500 К – без охлаждения.

Часть сигнала, усиленного на ПЧ1, поступает в широкополосный канал спектрометра, содержащий квадратичный и синхронный детекторы, АЦП и самописец. В этом канале измеряется яркостная температура фонового излучения атмосферы (широких крыльев линий кислорода и водяного пара), что позволяет определить ослабление озонной линии в тропосфере. Остальная часть сигнала преобразуется во втором смесителе в полосу ПЧ2 с центром на 240 МГц (частота второго гетеродина – 3,45 ГГц) и делится между двумя фильтровыми АС (см. рис. 1). В качестве первого гетеродина использована лампа обратной волны ОВ-76. Стабильность частоты гетеродинов обеспечивают системы ФАПЧ на основе синтезаторов Ч6-31 и Ч6-71. Кратковременная (за 0,2 с) относительная стабильность частоты первого гетеродина составляет около $2 \cdot 10^{-8}$.

Анализатор АС-80 имеет 80 каналов. Ширина анализируемой полосы – 283 МГц, а ширина каналов возрастает ступенями с 0,2 МГц в центре линии до 20 МГц на крыльях с промежуточными значениями 0,5; 2 и 5 МГц. Анализатор адаптирован к форме спектральной линии в соответствии с результатами численных экспериментов [2,3]. АС-120 имеет 120 каналов по 100 кГц и в центре линии в полосе 12 МГц обеспечивает высокое спектральное разрешение, необходимое для измерения мезосферного озона. На выходах каналов установлены синхродетекторы, управляемые опорным напряжением с частотой 75 Гц, формируемым в модуляторе. Выходные напряжения синхродетекторов оцифровываются многоканальными 10-разрядными АЦП с регулируемым усилением. Калибровка спектрометра производится с помощью чернотельных нагрузок, находящихся при комнатной и азотной температурах, которые по очереди перекрывают входы антенного блока. Все параметры сеанса наблюдений (время калибровки и измерений, калибровочная «ступенька» температур, число используемых каналов, период их опроса и др.) устанавливаются оператором в соответствии с задачей и условиями наблюдений. По завершении накопления отдельной spectroграммы (калибровка обычно длится 100 с, накопление сигнала – 200 с) на экран выводится спектр в яркостных температурах с указанием характерных параметров. Полученные спектры хранятся в памяти ПК.

Далее отдельные спектры усредняются и пересчитываются к внеатмосферным условиям для последующего восстановления ВРО в стратосфере и мезосфере с помощью усовершенствованного метода регуляризации Тихонова [3]. Этот метод позволяет получить более высокую точность и лучшее вертикальное разрешение, чем методы, ис-

пользуемые в зарубежных обсерваториях. При измерениях с неохлаждаемым приемником точность определения ВРО оказывается не хуже 5–7%. В остальной области зондируемых высот (15–20 и 50–75 км) при времени накопления сигнала 1–2 ч точность была не хуже 20–30%.

Летом 2001 года в ФИАНе были успешно проведены пробные измерения спектров озона с акустооптическим АС, разработанным в Санкт-Петербургском государственном техническом университете [7]. АС имеет 1024 канала и перекрывает полосу частот 1,5–2,0 ГГц при спектральном разрешении 0,9 МГц. В нем использованы He-Ne лазер и акустооптический модулятор на кристалле LiNbO_3 . Расширение полосы анализа до 500 МГц позволяет получить нижнюю границу зондируемого диапазона высот ~10 км и повысить точность определения ВРО в области максимума абсолютного содержания озона на высотах 15–20 км. Благодаря высокой чувствительности, применению оптимизированных АС и эффективным методам обработки спектров радиоспектрометра ФИАН по своим характеристикам не уступает лучшим мировым образцам. Он был включен в состав глобальной озонметрической сети во время международных программ исследования атмосферы DYANA (1990 г.), CRISTA/MAHRSI (1994 и 1997 гг.) и SOLVE 2000 (1999-2000 гг.). Сравнение результатов измерений спектров озона, полученных на мм-волнах, и соответствующих им ВРО над Москвой при различных состояниях озоносферы на мм-волнах (рис.4) с данными озонзондов и спутников показало их хорошее соответствие [8].

МОНИТОРИНГ ОЗОННОГО СЛОЯ НАД МОСКВОЙ

Исследования озонного слоя ведутся в ФИАНе с 1987 года в сотрудничестве с обсерваториями Франции, Швеции и Германии. За последние годы получена детальная картина высотно-временного распределения озона над Москвой, содержащая уникальные данные с труднодоступных для других методов высот [2,9]. Результаты измерений ВРО качественно соответствуют модели [10], однако заметно отклоняются от нее в холодные полугодия. На фоне сезонных изменений содержания озона в стратосфере – от относительно низких значений в холодные полугодия к более высоким в весенне-летние периоды – существуют короткопериодные (1–4 недели) вариации (рис.5). Анализ показал, что эти вариации связаны с крупномасштабными динамическими процессами, с перемещением областей высокого и низкого давления в стратосфере Северного полушария.

Важный результат мониторинга – выявление в холодные сезоны периодов длительного (до месяца и более) устойчивого истощения озона над Москвой на высотах 25–45 км, до 30–40% ниже модельных значений [10]. Было установлено, что такое истощение возникает каждый раз при смещении полярного стратосферного вихря к Европе под влиянием динамических процессов в стратосфере Северного полушария. Химические процессы в воздухе вихря приводят к разрушению озона, и «озонная дыра» над Антарктидой возникает именно внутри та-

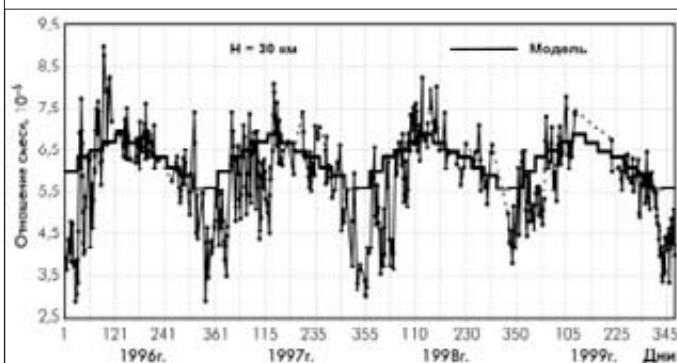


Рис.5. Изменения содержания озона на высоте 30 км над Москвой в 1996–1999 годах

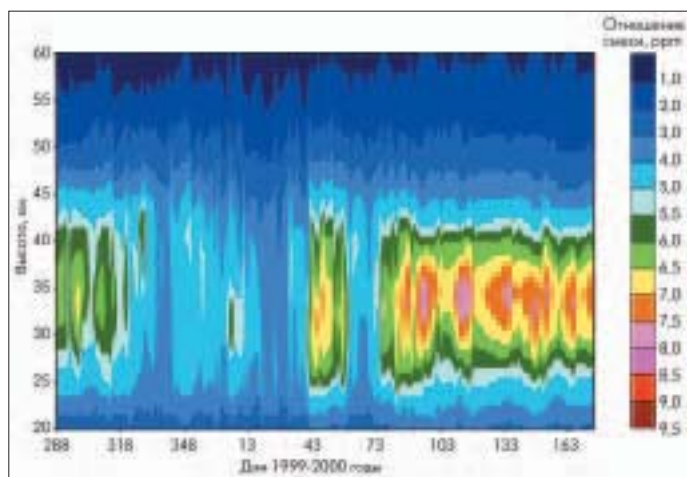


Рис.6. Высотно-временное распределение озона над Москвой в холодный период 1999–2000 годов

кого полярного вихря. На графике рис.6, построенном по результатам измерений, проведенных в ФИАНе по программе SOLVE 2000, отчетливо видны периоды истощения озона в стратосфере (сине-голубые участки) в холодные месяцы.

При усреднении профилей озона, полученных на мм-волнах в 1996–1999 годах, было обнаружено заметное отклонение среднегодового экспериментального ВРО от усредненных за год данных модели [10]. Относительная величина отклонения отрицательна и зависит от высоты. Наибольшее отличие от модели составляет ~13% на высоте 40 км. Основной вклад в него вносит отклонение ВРО от модели в холодное полугодие. Поскольку модель использует результаты измерений со спутников, полученные в конце 70-х–начале 80-х годов, обнаруженное отличие можно рассматривать как оценку убыли озона в озоносфере за прошедшие 17 лет. Вычисленная в ФИАНе (с небольшой поправкой на изменение солнечной активности) среднегодовая убыль озона в стратосфере (тренд) на различных высотах хорошо согласуется с данными о тренде озона над средними широтами Северного полушария, полученными оптическими методами со спутников в ходе экспериментов SAGE I, SAGE II, SBUV, SBUV II и с поверхности Земли в обсерваториях Польши, Франции и США [1] (рис.7). Максимум

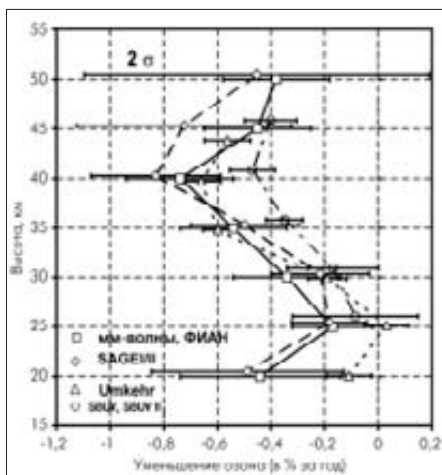


Рис.7. Долговременное уменьшения содержания озона по результатам наблюдений на мм-волнах над Москвой и данным работы [1]

тренда на 40 км связан, по современным представлениям, с потерями озона в реакциях с участием хлора [1].

ПЕРСПЕКТИВЫ МОНИТОРИНГА ОЗОНА И ДРУГИХ АТМОСФЕРНЫХ ГАЗОВ НА ММ-ВОЛНАХ

В последние годы атмосферный озон измеряли на мм-волнах примерно в 20 пунктах мира. Кроме того, наблюдались более слабые спектральные линии окислов углерода, хлора и азота, водяного пара и ряда других важных малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, неко-

торые из которых могут разрушать озон. В России измерения озона на мм-волнах пока кроме ФИАНа проводятся только в Нижнем Новгороде. В условиях значительного загрязнения атмосферы долгоживущими озоноразрушающими веществами следует ожидать долговременных изменений в озоновом слое. Поэтому необходимо продолжение регулярных наблюдений озона на мм-волнах.

Действующие и готовящиеся к запуску спутники (UARS, ERS-2, ODIN, AURA, ENVISAT-1) объективно не могут дать достаточно плотных рядов данных для детального изучения одновременных вариаций озона и других МГС над выбранным районом. Эта информация должна быть дополнена данными с наземных станций. Кроме того, в ходе длительных спутниковых экспериментов возможно изменение параметров бортовых приборов. Поэтому наземные измерения на мм-радиоволнах необходимы для контроля и подтверждения данных, полученных из космоса.

Для надежного мониторинга озонового слоя над территорией России и соседних стран СНГ (в первую очередь, Беларуси и Украины) необходима сеть из 10–20 наземных станций, оснащенных мм-спектрометрами, с шагом около 1000 км по широте и долготе. Такие спектрометры могут быть размещены в научных учреждениях и вузах соответствующего профиля, что позволит одновременно готовить специалистов по дистанционному зондированию. Эта сеть может быть оснащена приборами типа спектрометра, разработанного в ФИАНе.

Одновременные измерения на мм-волнах озона и озоноразрушающих молекул, в первую очередь окислов хлора и азота, в различных географических зонах Земли, наряду с регулярным мониторингом озона, – одно из самых актуальных направлений дальнейших исследований на мм-волнах.

Авторы выражают глубокую признательность директору Отделения Оптики ФИАН, члену-корреспонденту РАН И.И.Собельману за постоянную поддержку и внимание к работе. Результаты, приведенные в данной статье, были получены при непосредственном участии канд. физ.-мат. наук Е.П.Кропоткиной, А.Н.Лукина и В.Н.Леонова, которым авторы выражают свою искреннюю благодарность. Работа поддержана грантами РФФИ № 96-02-19093, 99-02-18132, 00-05-64976 и 00-15-96586.

ЛИТЕРАТУРА

1. Scientific assessment of ozone depletion: 1998. World Meteorological Organization. Global ozone research and monitoring project. – Rep. No.44. – Geneva: WMO, 1999.
2. Solomonov S.V., Rozanov S.B., Kropotkina E.P., Lukin A.N. – Proc. SPIE, 1998, v.3406, p.135–157.
3. Гайкович К.П., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В. – Изв. АН. Физ. атмосфер. и океана, 1999, т.35, №1, с.86–95.
4. Rozanov S.B., Lukin A.N., Solomonov S.V. – Int. J. Infrared and Millimeter Waves, 1998, v.19, No.2, p.195–222.
5. Соломонов С.В., Розанов С.Б., Кропоткина Е.П., Лукин А.Н. – Радиотехника и электроника, 2000, т.45, №12, с.1519–1525.
6. Розанов С.Б. – Радиотехника и электроника, 1996, т.41, №3, с.362–369.
7. Есепкина Н.А., Бардышев А.О., Круглов С.К., Мансырев М.И., Сотникова Г.Ю. – Препринт Спец. Астрофиз. Обсерв. РАН №125–СПб. – С.-Петербург, 1997.
8. Кропоткина Е.П., Лукин А.Н., Розанов С.Б., Соломонов С.В. – Тезисы докладов III Всероссийской конференции "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды". Муром, 17-18 июня 1999 г.: Изд. Муромского института ВлГУ, 1999, с.63–64.
9. Кропоткина Е.П., Пирогов Ю.А., Розанов С.Б., Соломонов С.В. – Краткие сообщения по физике, 2000, №8, с.37–45.
10. Keating G.M., Chiou L.S., Hsu N.C. – Adv. Space Res., 1996, v.18, No.9/10, p.11–58.