

**Государственный комитет Российской Федерации
по высшему образованию
Ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский
радиофизический институт (НИРФИ)**

Препринт N 403

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСНЫХ
ГАЗОВ В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ
МЕТОДАМИ СВЧ РАДИОМЕТРИИ
(МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)**

**Н.Н.Маркина
А.П.Наумов
А.В.Гроизцкий**

Нижний Новгород 1994

Маркина Н.Н., Наумов А.П., Троицкий А.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСНЫХ ГАЗОВ
В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ МЕТОДАМИ СВЧ
РАДИОМЕТРИИ (МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ)//
Препринт N 403 -Нижний Новгород: НИРФИ. 1994.- 26 с.
УДК 537.52.77: 502.614.7

Развита общая методология наземного дистанционного зондирования пассивным радиометрическим методом в миллиметровом диапазоне радиоволн малых газовых составляющих атмосферы в основном антропогенного происхождения. Исходя из их распространенности и количественных характеристик радионизлучения определены экологически приоритетные для радиометрического мониторинга малые газовые составляющие. Найдены оптимальные условия (частоты и углы) дистанционного зондирования газовых составляющих. Изложена методика радиометрической диагностики загрязняющих примесей на примере дистанционного зондирования сернистого ангидрида.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время существенно возрос интерес к проблемам экологии и охраны окружающей среды [1], включая проведение комплексных оценок экологической обстановки в крупных городах [2]. Приоритет в экологических исследованиях принадлежит научному обоснованию и разработке систем мониторинга, представляющих собой системы слежения за состоянием природной среды, системы наблюдения, анализа и прогноза состояния природных параметров [3].

В основе большинства мониторинговых систем лежат оптические и радиофизические методы дистанционного зондирования (ДЗ) природных сред. Применение методов ДЗ для решения задач экологии основано на физических характеристиках распространения электромагнитного излучения. В этом аспекте в экологических исследованиях атмосферы весьма перспективным представляется использование миллиметровых (ММ) радиоволн, поскольку, с одной стороны, на ММ диапазон приходится большое количество спектральных линий малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, а, с другой стороны, - из измерений теплового радиоизлучения в ММ и сантиметровом (СМ) диапазонах волн дистанционно определяются температура атмосферы, характеристики влагосодержания и облачности, также влияющие на распространённость и временные параметры загрязнённости атмосферы.

В данной работе рассматриваются методические аспекты СВЧ ДЗ газовых загрязнителей и особо - содержания сернистого ангидрида и озона в нижних слоях атмосферы. В крупных городах приоритетными (с точки зрения экологической обстановки) загрязнителями обычно являются сернистый ангидрид, окислы углерода и азота, которые составляют основную часть массы выбросов в атмосферу от автомобильного транспорта и от стационарных источников [2]. Более сложная ситуация имеет место для озона. Являясь щитом для сохранения земной жизни от ультрафиолетовой радиации Солнца и активным элементом, определяющим фотохимические процессы в нижней атмосфере, озон, вместе с тем, при концентрациях более $5 \cdot 10^{-6}$ по объёму, представляет собой ядовитый газ, т.е. также является загрязнителем атмосферы. Повышенный интерес проявляется к изучению взаимосвязи процессов образования озона с электрическими процессами в тропосфере [4]. К настоящему времени известны результаты наземных радиофизических исследований в ММ диапазоне концентраций озона,

окиси хлора и окиси углерода в верхних слоях атмосферы. Обзор первых результатов по лимбовому зондированию с ИСЗ МГС в радиодиапазоне содержится в [5]. Что касается радиометрического мониторинга нижней атмосферы, то подобные исследования только еще начинаются [6-9]. И на первом этапе важно разработать научную концепцию такого мониторинга: определить какие газы могут быть обнаружены по их радиоизлучению в ММ диапазоне волн, установить приоритетность исследований тех или иных газовых компонент (в смысле степени превышения ими предельно допустимых концентраций (ПДК) и возможностей индикации соответствующих концентраций радиометрическими методами), а также разработать методические аспекты радиометрической диагностики загрязняющих примесей. Последняя задача представляет собой типичную задачу по измерению слабых спектральных сигналов на уровне большого фона, при решении которой необходимо учитывать специфику этого фона (наличие линейной или нелинейной зависимости по частоте). Рассмотрение некоторых из перечисленных проблем выполнено в данной работе.

1. НАИБОЛЕЕ АКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ИХ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Многие крупные города в настоящее время перегружены промышленными зонами и находятся по ряду экологических показателей в критическом состоянии. В [2] приведены данные по комплексной оценке экологической ситуации в Нижнем Новгороде. Ниже приведены некоторые экологические сведения по городу, согласно [2], с учетом возможностей использования этих сведений для разработки и организации радиофизического мониторинга нижних слоев атмосферы, т.е. здесь отражены те сведения, которые, с одной стороны, представляют собой экологический интерес, а с другой, сведения, которые могут быть использованы уже на первом этапе радиофизических (радиометрических) исследований атмосферного радиоизлучения в экологическом аспекте.

Главными источниками загрязнения атмосферного воздуха в городах являются:

- автомобильный транспорт;
- объекты энергетики (ТЭЦ, котельные);

- машиностроение, особенно металлургические производства ;

- предприятия нефтепереработки.

В выбросах присутствует более 100 различных ингредиентов. Максимальные концентрации большинства загрязняющих веществ превышают предельно допустимые концентрации (ПДК). Воздух города обычно сильно загрязнен взвешенными частицами, бенз(а)пиреном, формальдегидом, свинцом, диоксидом азота. Среднегодовые концентрации указанных веществ составляют 1-1,3 ПДК. Пять перечисленных веществ являются приоритетными загрязнителями для Нижнего Новгорода. Четыре ингредиента - твердые взвешенные частицы, сернистый ангидрид, окись углерода и двуокись азота составляют основную часть массы выбросов в атмосферу.

Натурные измерения, выполненные сотрудниками Гидромета вблизи магистралей, показали, что между интенсивностью движения и загрязнением воздуха в городе существует корреляция. Загрязнение распределяется неравномерно по площади и сосредоточено в основном в 100-метровой зоне вдоль дорог. Для оценки интегрального воздействия на окружающую среду обычно используется индекс загрязненности атмосферы или гигиенический показатель загрязнения атмосферы $K_{атм}$, представляющий собой сумму нормированных на ПДК среднегодовых концентраций примесей с учетом их токсичности. В городах санитарно-гигиеническое районирование выполняется на основании предложенного Минздравом показателя загрязнения атмосферы :

$$K_{атм} = \sum_{i=1}^4 \frac{f_i}{N_i ПДК_i}, \quad (1)$$

где f_i и ПДК_i - соответственно разовые концентрации и предельно допустимые концентрации 4-х основных загрязняющих веществ, которые упоминались выше (взвешенных частиц, сернистого ангидрида, окиси углерода и двуокиси азота). Именно на эти компоненты приходится 90% выбросов города ; N_i - коэффициент, величина которого зависит от класса опасности вещества. Он равен 1 для веществ I-го класса ; 1,5 - для веществ 2-го класса и соответственно 2 и 4 для веществ 3-его и 4-ого классов.

Для характеристики уровня загрязненности приняты следующие критерии оценок :

- зона допустимого загрязнения $K_{атм} = 2-4$;

- умеренно-загрязненная зона $K_{\text{атм}} = 4-10$;
- зона повышенного загрязнения $K_{\text{атм}} = 10-20$;
- зона высокого загрязнения $K_{\text{атм}} > 20$.

Обычно на территории городов преобладают зоны допустимого загрязнения, где концентрации основных загрязняющих веществ находятся на уровне 0,5-1 ПДК ($K_{\text{атм}} = 2-4$), а также умеренно-загрязненные зоны с концентрациями примесей на уровне 1-2,5 ПДК ($K_{\text{атм}} = 4-10$), хотя в ряде районов создается и особо неблагоприятная обстановка, где коэффициент $K_{\text{атм}}$ достигает значений 30-100.

Ниже подробно рассмотрены методические аспекты ДЗ сернистого ангидрида в СВЧ-диапазоне. Эти аспекты представляются актуальными в связи с тем, что сернистый ангидрид является одной из компонент, которая определяет показатель загрязнения $K_{\text{атм}}$ в городах.

В [9] проанализированы поглощающие свойства МГС атмосферы в СМ и ММ диапазонах волн на основе банка данных GEISA[10]. Используемая версия GEISA содержит 323 520 линий 36 молекул и 79 изотопов в спектральной области от $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ до $17\,879 \text{ см}^{-1}$. Банк данных GEISA включает для каждой линии рассматриваемой молекулы резонансные частоты $\nu_{ij}(\text{см}^{-1})$, интенсивности $I_{ij}(\text{см} \cdot \text{моль}^{-1})$ для $T_0 = 296\text{K}$, полуширины $\Delta\nu_{ij}(\text{см}^{-1})$ при $T_0 = 296\text{K}$ и $P_0 = 1 \text{ атм}$, энергии нижних состояний перехода $E_i(\text{см}^{-1})$ и квантовые числа, определяющие переход. Кроме того в атласе приведены для 10 молекул показатели степени температурной зависимости n_{ij} полуширины линии $\Delta\nu_{ij}$, обусловленные молекулярными соударениями (и, следовательно, атмосферным давлением).

Спектральными линиями, приходящимися на ММ и СМ диапазоны, обладают 12 из рассмотренных в атласе молекул: озон O_3 , закись азота N_2O , окись углерода CO , окись азота NO , двуокись серы SO_2 , аммиак NH_3 , азотная кислота HNO_3 , гидроксил OH , окись хлора ClO , карбонил сульфида COS , формальдегид H_2CO и сероводород H_2S . Анализ спектральных характеристик этих молекул в области $(1/\lambda) < 10\text{см}^{-1}$ приведен в таблице 1 работы [9].

Выражение для коэффициента поглощения МГС с учетом банка данных GEISA имеет вид:

$$\kappa(\text{км}^{-1}) = 10^5 N \sum I_i(T) (T_0/T)^{n_i} \frac{Q(T_0)}{Q(T)}$$

$$\exp[-hcE_l / k(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})] \frac{f_\nu(T)}{f_\nu(T_0)}. \quad (2)$$

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 F(\nu, \nu_j, \Delta \nu_j).$$

В (2) N - число молекул исследуемого газа в см^3 , h, k и c - соответственно постоянные Планка, Больцмана и скорость света, T и P - текущие значения температуры и давления, Q_r - вращательная функция распределения молекул, f_ν - относительная населенность колебательного квантового состояния, ν_{ij} - резонансная частота молекул, ν - рабочая частота в см^{-1} .

Структурный фактор в (2) использовался в виде упрощенного выражения Лоренца :

$$F(\nu, \nu_j, \Delta \nu_j) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\Delta \nu_j}{(\nu - \nu_j)^2 + \Delta \nu_j^2}, \quad (3)$$

где для нижних слоев атмосферы

$$\Delta \nu_j = \Delta \nu_j^0 \frac{P}{P_0} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-n_{ij}}. \quad (4)$$

На рис. 1-5 работы [9] приведены удельные коэффициенты поглощения всех 12-ти упомянутых выше МГС атмосферы, - молекулы которых обладают дипольными моментами, а их спектральные параметры содержатся в атласе [10]. Здесь мы воспроизводим данные работы [9] по удельным коэффициентам поглощения сернистого ангидрида и озона на уровне моря, т.е. тех газовых ингредиентов, характеристики радиоизлучения которых более подробно рассматриваются ниже. Основное содержание сернистого ангидрида приходится на приземный слой атмосферы. Содержание озона возрастает с высотой и достигает максимума на высотах ~ 35 км. Деформацию спектра поглощения O_3 из-за уменьшения атмосферного давления с высотой можно проследить, сравнивая результаты рис. 1 с результатами, представленными, например, на рис. 6,7 статьи [11].

Выполненные расчеты показывают, что значительная часть достаточно сильных линий рассмотренных примесных газов приходится на окна прозрачности основных газов атмосферы в ММ и СМ диапазонах волн. Этот факт способствует прин-

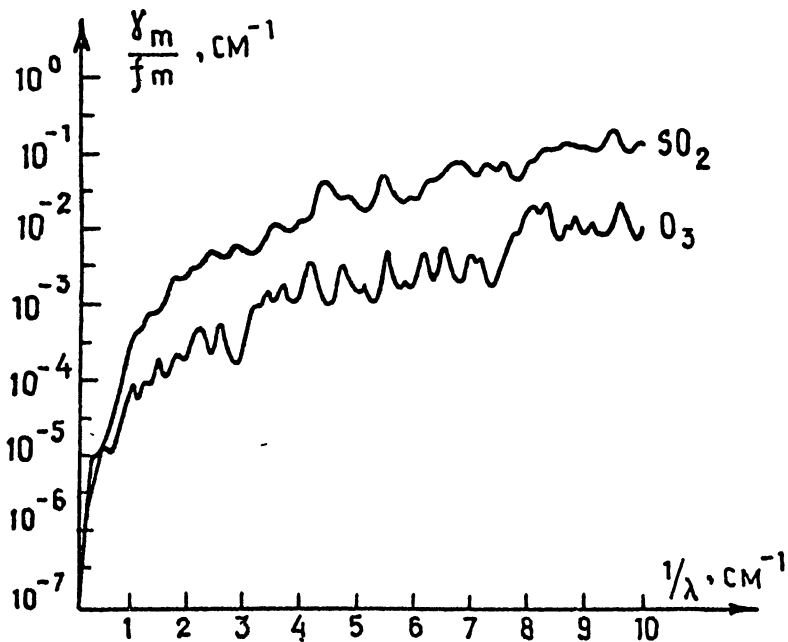


Рис.1. Удельные коэффициенты поглощения озона и сернистого ангидрида на уровне моря.

ципальной возможности индикации МГС атмосферы радиометрическим методом, хотя на пути практической реализации этой возможности существует немало тонких моментов (см. ниже).

В [9] получены критериальные концентрации f_i МГС, при которых отношение поглощения i -ой газовой компоненты к фону вблизи земной поверхности составляет 1%. Критериальные величины f_i сравнивались с разовыми предельно допустимыми концентрациями (ПДК_р) и с ПДК промышленных площадок (ПДК_{пл}). Таким образом были установлены газовые компоненты, для которых отношение $f_i / f_i^{\text{ПДКр}} \leq 10$. Поскольку в зонах повышенного и высокого загрязнения концентрации вредных компонент могут превышать ПДК в десятки и сотни раз, то выбранные по указанному критерию МГС являются приоритетными для экологического мониторинга радиометрическими методами. Перечень таких МГС вместе с отношениями критериальных концентраций к ПДК приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Приоритетные для наземного радиометрического мониторинга малые газовые составляющие нижней атмосферы.

Г а з	: $f_i / f_i^{\text{ПДКр}}$: $f_i / f_i^{\text{ПДКпл}}$
NH ₃	0,46	
HNO ₃	0,8	
SO ₂	1,5	0,24
H ₂ CO	5,0	1,1
CO	7,0	2,5
H ₂ S	390,0	1,0

Из таблицы видно, что наиболее активным в СВЧ диапазоне примесным газом является аммиак. Примеры дистанционной индикации аммиака радиометрическим методом вблизи промышленных выбросов приведены в [6]. Сернистый ангидрид также оказывается одним из наиболее приоритетных газов с точки зрения возможностей радиометрического мониторинга (см. табл. 1). И этот вывод согласуется с выводом о приоритетности мониторинга SO₂ по критериям загрязненности атмосферы в городах [2]. Теоретический анализ возможностей индикации загрязнения атмосферы сернистым ангидридом в ММ диапазоне волн проведен в [7].

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ В РЕЗОНАНСНЫХ ОБЛАСТЯХ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ.

Принципиальная возможность осуществления радиометрического мониторинга МГС основана на свойствах собственного (теплого) радиоизлучения, генерируемого атмосферными газами, которые обладают магнитными или электрическими дипольными моментами. Эти газы, в соответствии с квантовыми законами, дают максимумы излучения (поглощения) на резонансных частотах молекул. Проводя измерения уровня теплового излучения атмосферы вблизи резонансов МГС можно в принципе получить информацию о содержании загрязняющих газовых компонент.

Оптимизация условий ДЗ МГС включает в себя определение рабочих частот и зенитных углов зондирования, при которых контрасты радиоярких температур становятся измеримыми и принимают наибольшие значения. Под контрастами понимается разность

$$\Delta T_i = T_{\text{я}} - T_{\text{АЯ}}, \quad (5)$$

где яркостная температура атмосферы при наличии соответствующей газовой компоненты (наблюдения с поверхности Земли) :

$$T_{\text{я}} = \int_0^{H_1} T(l) \gamma_{\text{А}}(l) \exp \left[- \int_0^l \gamma_{\text{А}}(l') dl' \right] dl, \quad (6)$$

и $\gamma_{\text{а}} = \gamma_{\text{ф}} + \gamma_i$. В (6) $T(l)$ - распределение температуры по лучу антенны. Фоновое значение яркостной температуры $T_{\text{АЯ}}$ получается из (6) при значении коэффициента поглощения i -ой газовой окмпоненты $\gamma_i = 0$, т.е. соответствует такой рабочей частоте (или при фиксированной частоте), такому направлению ДЗ, при которых вклад соответствующей примесной компоненты является пренебрежимо малым. В ясную погоду $\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{о2}} + \gamma_{\text{вп}}$, где $\gamma_{\text{о2}}$ и $\gamma_{\text{вп}}$ - соответственно коэффициенты молекулярного поглощения кислорода и водяного пара.

В работе рассматривались ситуации, которые моделировали как выбросы из приподнятых стационарных источников, так и перемешанный слой загрязнения. В таблице 2 приведены значения ΔT_i для ДЗ в зенитном направлении при относительной концентрации МГС $f_i = 10^{-5}$ в летних и зимних условиях года. При малых концентрациях f_i , которые только и рассмат-

риваются в данной работе, оценки контрастов ΔT_i для различных значений f_i и слоев загрязнения Δh осуществляются с помощью линейной интерполяции табличных значений:

$$\Delta T_i(f_i, \Delta h) = 10^5 f_i \Delta T_i(f_i = 10^{-5}, \Delta h_1) \Delta h / \Delta h_1. \quad (7)$$

Слой перемешивания загрязняющих примесей обычно изменяется в пределах ~200-500 м [12,13].

Отметим, что при ПДК_р в слое загрязнения 0-500м для аммиака соответствующие контрасты составляют 0,1К летом и 0,2К зимой. В то же время для аммиака ПДК_{пл} ~ 10⁻⁵ и в этом случае, следовательно, реализующиеся контрасты приведены в таблицах.

При ПДК_р для сернистого ангидрида в том же слое загрязнения $\Delta T_i = 0,4К$ зимой и ~0,1К летом на частоте 282 ГГц. На частоте $\nu = 131 ГГц$ $\Delta T_i = 0,1К$ зимой и летом. При ПДК_{пл} $\Delta T_i = 0,4К$ летом и ~0,6К зимой также для частоты 131 ГГц.

Таблица 2.

Значения радиоярких контрастов $\Delta T_i, К$ (зенитный угол $\theta = 0^\circ$) в резонансных областях МГС для слоев загрязнения 100-200м и 0-500м при концентрации $f_i = 10^{-5}$ (летние и зимние условия года).

Газ	ν, ГГц	Лето		Зима	
		100-200 м	0-500 м	100-200 м	0-500 м
NH ₃	24	0,9	4,2	1,0	5,0
SO ₂	131	0,9	4,2	1,4	6,5
	282,5	0,9	3,6	3,6	16,5
CO	115,3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
	230,7	< 0,1	0,1	0,1	0,2
H ₂ S	168,9	0,2	1,1	0,6	3,0
NO	150,5	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2
	250,6	< 0,1	0,2	0,1	0,5
N ₂ O	150,8	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2
	276,5	0,1	0,2	0,1	0,6

Для сероводорода $\text{ПДК}_p \sim 6 \cdot 10^{-5}$ и поэтому соответствующие радиоконтрасты пренебрежимо малы. При $\text{ПДК}_{\text{пл}}$ для H_2S $\Delta T_i \approx 0,3\text{K}$ летом и $\Delta T_i \approx 0,8\text{K}$ зимой.

Для окислов углерода и азота радиоконтрасты малы даже при достаточно высоких концентрациях $f_i \approx 10^{-5}$.

Современные СВЧ радиометры позволяют обнаруживать слабые сигналы на атмосферном фоне с радиояркими контрастами $\sim 0,1\text{K}$ (см. раздел 3). Приведенные результаты показывают возможность дистанционной индикации радиометрическим методом загрязнения аммиаком, сернистым ангидридом и сероводородом районов промышленных площадок и рабочих зон, хотя следует подчеркнуть, что фоновые концентрации перечисленных МГС не определяются СВЧ радиометрическими методами. В выбросах концентрация загрязняющих веществ может превышать ПДК_p в зависимости от высоты труб в $10^3 - 10^6$ раз и более. Так для электростанций, работающих на угле, характерны концентрации SO_2 в выбросах $10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$ по объему, т.е. в $\sim 10^4$ раз выше ПДК_p [14]. Примерно такое же соотношение характерно и для окислов азота, выбрасываемых тепловыми электростанциями. В неорганизованных выбросах превышение ПДК_p бывает, как правило, существенно ниже.

Теоретически оптимальные углы наблюдения оцениваются из условия [15]:

$$\cos \theta_{\text{opt}} \approx \tau_{\phi}, \quad (8)$$

где τ_{ϕ} - фоновая оптическая толщина атмосферы. Расчеты контрастов ΔT_i радиоярких температур на различных углах подтвердили условие (8), но при этом показали, что существует плавная зависимость $\Delta T_i(\theta)$ и на самом деле целесообразно говорить об оптимальных областях углов $\Delta\theta$ ДЗ.

Область углов ДЗ, на которых контрасты ΔT_i имеют максимальные значения и слабо меняются, вместе с теоретическими значениями θ_{opt} по (8) приведены в табл.3.

Контрасты радиоярких температур ΔT_i в областях оптимальных углов могут возрастать в несколько раз (особенно зимой) по сравнению с соответствующими значениями для зенитного направления.

Более подробно рассмотрим контрасты радиоярких температур в резонансных областях двух газов - сернистого ангидрида и озона. Содержания SO_2 и O_3 в нижней атмосфере

ре*) представляют интерес в различных аспектах (см. Введение).

Таблица 3.
Области оптимальных зенитных углов
дистанционного зондирования МГС.

Газ	ν , ГГц	Летние условия		Зимние условия	
		θ опт :	$\Delta\theta$:	θ опт :	$\Delta\theta$:
N ₂ O	150,8	49°	40-55°	75°	70-80°
	276,5	0°	0-30°	40°	30-45°
NO	150,5	49°	45-55°	75°	70-80°
	250,6	0°	0-30°	52°	50-60°
CO	115,3	48°	50-60°	58°	50-60°
	230,7	0°	0-30°	58°	55-65°
SO ₂	131,0	61°	60-65°	77°	75-80°
	282,5	0°	0-25°	34°	20-35°
H ₂ S	168,9	0°	0-30°	61°	55-65°
NH ₃	24,0	82°	80-85°	86°	87-89°

Основными источниками сернистого газа в атмосфере являются сжигание и переработка ископаемого топлива: угля, нефти, газа, плавка руд, производство серной кислоты. Распределение сернистого газа в атмосфере крайне неравномерно. В промышленных районах обычны концентрации 10^{-7} - 10^{-6} , причем максимальные значения могут быть на порядок выше. В сельской местности наблюдаются значительно меньшие значения $\sim 10^{-8}$. Такое распределение является результатом относительно небольшого времени жизни сернистого газа при неравномерном распределении основных источников. Обычное время жизни SO₂ над континентальными областями

*) Поскольку озон содержится в протяженном слое от тропосферы до мезосферы, то нижним слоем для O₃ можно считать высоты $h < 25$ км.

составляет около 10 часов. За это время сернистый газ распространяется в нижней тропосфере на горизонтальные расстояния ~500км. В сильно загрязненной атмосфере время жизни SO₂ примерно на порядок меньше.

В таблице 4 приведены различные ПДК [16] (среднесуточное, разовое, промышленной площадки и рабочей зоны), нормирующие концентрации SO₂, при которых сернистый газ при соответствующей длительности воздействия оказывает вредное влияние на человека, животных и растительность.

Таблица 4.

Конц.λ	ПДК	ПДК _{срс}	ПДК _р	ПДК _{пл}	ПДК _{рз}
г		2.10 ⁻⁸	2.10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	4.10 ⁻⁶

Концентрация SO₂ в выбросах, как уже отмечалось, может превышать ПДК_р в зависимости от высоты труб в 10³ -10⁶ раз [14].

Поглощающие и излучающие характеристики сернистого ангидрида уже рассматривались выше. Здесь мы приведем количественные значения контрастов радиоярких температур в частотной области 125-170 ГГц на углах наблюдения 0-75°. Контрасты получены для летних условий года и следующих распределений SO₂ в нижней атмосфере :

Модель 1.

$$f_{SO_2}(h) = \begin{cases} 10f_{SO_2}^0 h, & 0 \leq h \leq 0,1 \text{ км} \\ f_{SO_2}^0, & 0,1 \leq h \leq 0,2 \text{ км} \\ 1,25(1-h)f_{SO_2}^0 & 0,2 < h \leq 1 \text{ км} \\ 0 & h > 1 \text{ км} \end{cases} \quad (9)$$

Модель 2.

$$f_{SO_2}(h) = \begin{cases} 0 & 0 \leq h < 0,1 \text{ км} \\ f_{SO_2}^0 & 0,1 \leq h \leq 0,2 \text{ км} \\ 0 & h > 0,2 \text{ км} \end{cases}$$

Из рис.2, построенного для модели 1 и $f_{SO_2}^0 = \text{ПДК}_{рз}$, видно, что величина ΔT_i достигает значений ~ 2,6-2,8К в области $\nu \sim 131 \text{ ГГц}$ на углах $\theta = 60-75^\circ$. В зимних условиях значения ΔT_i увеличиваются до ~5,8-6,6К. При этом оптимальные углы наблюдения возрастают до 70--80°. Аналогичные

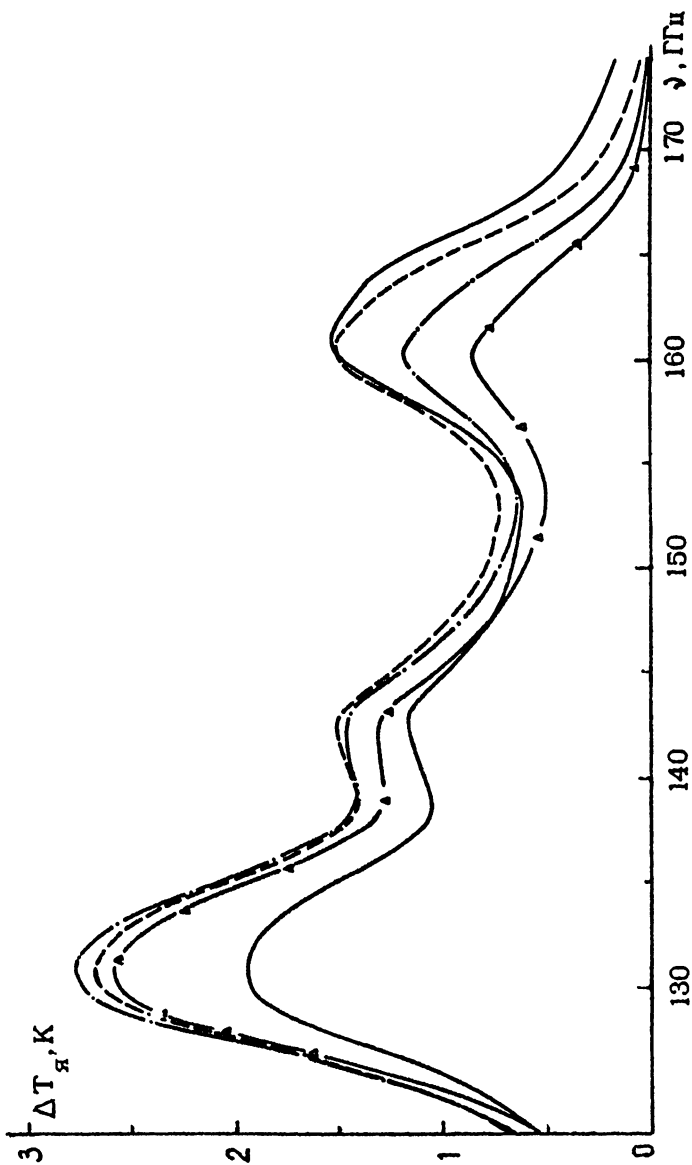


Рис.2. Величины контрастов в спектральной области 125-170 ГГц при наличии сернистого ангидрида : сплошная кривая $\theta = 0^\circ$, пунктир $\theta = 60^\circ$, штрих-пунктир $\theta = 75^\circ$. Летние условия года.

расчеты для модели 2 показали, что уярчение ΔT_i на частоте 131 ГГц составляет ~ 1 К. Модель 2 описывает дымовой факел выбросов и для концентрации $f_{SO_2}^0 = 1,3 \cdot 10^{-4}$ при наблюдении в зенит дает контрасты $\Delta T_i = 15,6$ К в летних условиях.

Алгоритм определения f_{SO_2} из результатов радиометрических измерений имеет вид :

$$f_{SO_2} \approx - \frac{\cos \theta}{\gamma'_{SO_2} \Delta h} \ln \left[1 - \frac{\Delta T_i e^{\tau_{v,\theta}^F(0, h_r + \Delta h)}}{T_{сл} - T_{АЯ}(h_r + \Delta h)} \right] \approx$$

$$\approx - \frac{\cos \theta}{\gamma'_{SO_2} \Delta h} \ln \left[1 - \frac{\Delta T_i}{T_o - T_{АЯ}} \right]. \quad (10)$$

В (10) γ'_{SO_2} - усредненное по слою Δh значение удельного коэффициента поглощения SO_2 ($\gamma'_{SO_2} = \gamma_{SO_2} / f_{SO_2}$); $T_{сл}$ и T_o - температура слоя загрязнения и точки наблюдения; $\tau_{v,\theta}^F(0, h_r + \Delta h)$ - фоновая оптическая толщина атмосферы от точки наблюдения до верхней границы загрязнения $h_r + \Delta h$; $T_{АЯ} = T_{АЯ}(0)$ и $T_{АЯ}(h_r + \Delta h)$ - фоновая яркостная температура атмосферы на зенитном угле θ и частоте ν соответственно в точке наблюдения и на $h = h_r + \Delta h$. Для случая вентиляционных выбросов ($T_{сл} \approx T_{атм}$) с параметрами $h_r = \Delta h = 100$ м на частоте излучения $\nu \approx 131$ ГГц и на угле наблюдения $\theta = 70^\circ$ перечисленные параметры равны $\tau_{v,\theta}^F(0, h_r + \Delta h) \approx 3,43 \cdot 10^{-2}$ Нп, $\gamma'_{SO_2} = 4,545 \cdot 10^3$ км⁻¹, $T_{АЯ}(h_r + \Delta h) = 145,9$ К. Приведенные численные значения позволяют по измеренным контрастам ΔT_i и яркостной температуре чистой атмосферы $T_{АЯ}$ с помощью формулы (10) оценивать концентрацию выбросов SO_2 .
Оценки данного раздела использовались при формулировке требований к радиометрической аппаратуре для индикации SO_2 в нижних слоях атмосферы.

На рис.3 представлены вклад нижней атмосферы (кривая 2) в общее радиоизлучение атмосферы (кривая 1) в области вращательной линии $\nu_o = 142,175$ ГГц на оптимальных углах $\theta_{опт} \approx 80^\circ$ для среднесезонного распределения озона по высоте (зимняя модель атмосферы) и фоновое радиоизлучение (кривая 3). Из рисунка видно, что информация об озоне нижней атмосферы содержится в области спектральной отстройки

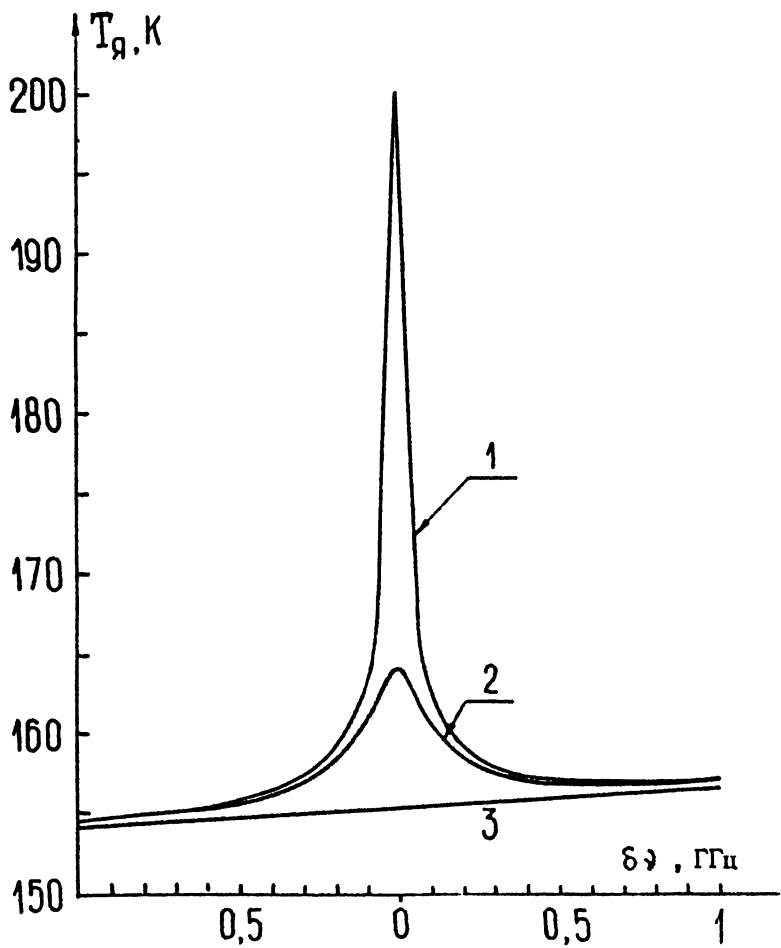


Рис. 3.

~ 150-200 МГц от резонансной частоты ν_0 , так как кривые 1 и 2 уже практически не отличаются между собой при такой отстройке. Контраст яркостных температур вполне обнаружим и составляет величину $\Delta T_{\text{о,о}} \approx 9\text{К}$. В то же время кривые 1,2 мало отличаются от фоновых значений $T_{\text{АЯ}}$ на частотах отстройки ~ 600 МГц от ν_0 . Полученные частотные интервалы характеризуют возможный частотный разнос каналов ДЗ озона в нижних слоях атмосферы.

Существенной особенностью радиоизлучения нижней атмосферы в линиях МГС является их значительное уширение (до нескольких ГГц), благодаря молекулярным соударениям при сравнительно больших давлениях и часто наблюдаемым перекрытиям спектральных линий поглощения. Подобное перекрытие имеет место в полосах поглощения NH_3 , SO_2 и некоторых других газов. Например, радиоизлучение тропосферного SO_2 в области полосы $\nu_0 \approx 131$ ГГц представляет собой спектральную особенность с шириной $\delta\nu \approx 8$ ГГц, в то время как в области одиночной линии озона $\nu_0 = 142,175$ ГГц $\delta\nu \approx 1$ ГГц. В таком широком диапазоне анализа интенсивность собственного радиоизлучения чистой атмосферы (фона) является уже нелинейной по частоте и требует корректного учета. Наиболее заметно эта нелинейность проявляется в областях линий и полос поглощения NH_3 - $\nu_0 \approx 24$ ГГц, CO - $\nu_0 \approx 115,3$ ГГц, SO_2 - $\nu_0 \approx 131$ ГГц.

3. МЕТОДИКА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ РЕЗОНАНСА СЕРНИСТОГО АНГИДРИДА

Отмеченная выше особенность в уширении полосы SO_2 $\nu_0 = 131$ ГГц имеет при радиометрическом приеме как положительную, так и отрицательную стороны. Отрицательная сторона - трудности в создании широкополосного ($\delta\nu \sim 8$ ГГц) СВЧ тракта радиометра при осуществлении спектрального анализа исследуемой линии поглощения. Положительная сторона - возможность реализации достаточно широкой полосы пропускания каждого отдельного спектрального канала $\Delta\nu_i < 1$ ГГц, что позволяет реализовать достаточно высокую чувствительность ($\delta T_{\text{Я}} \leq 0,1\text{К}$) в спектральных каналах.

Для определения интегрального содержания SO_2 на луче приема в принципе достаточно проведения измерений в 3-х

спектральных каналах, один из которых расположен в центре полосы поглощения, а два других (опорных) - на ее крыльях. Однако для рассматриваемой задачи это практически невозможно в силу сравнительно большой ширины полосы поглощения SO_2 , а также и нецелесообразно из-за необходимости корректного учета влияния фонового радионизлучения атмосферы (подробнее см. ниже). Компромиссным решением служит вариант, когда опорные каналы располагаются на расстоянии полуширины полосы поглощения SO_2 справа и слева от центра. Наличие двух опорных каналов необходимо для учета наклона спектра интенсивности фонового радионизлучения.

Фактически измеряемой величиной, на основании которой происходит интерпретация результатов ДЗ, является разность между яркостной температурой в центре полосы поглощения SO_2 $\nu_0 = 131$ ГГц и среднеарифметической яркостной температурой двух опорных каналов. Однако на современном техническом уровне реализовать полосу анализа 8 ГГц не представляется возможным. Преодолеть эти трудности можно с помощью процедуры свертки линии (полосы) [17]. Действительно, если выбрать частоту гетеродина радиометра равной центральной частоте полосы поглощения SO_2 $F_{\text{гет}} = \nu_0 = 131$ ГГц, то прямой и зеркальный каналы радиометра $F_{\text{гет}} + F_{\text{пч}}$ и $F_{\text{гет}} - F_{\text{пч}}$ ($F_{\text{пч}}$ - промежуточная частота (ПЧ) радиометра, на которой происходит спектральная фильтрация исследуемого сигнала) будут располагаться симметрично относительно центра полосы поглощения. В этом случае радиометр с шириной полосы приема $\Delta F_{\text{пч}} = 4$ ГГц анализирует уже удвоенную полосу частот 8 ГГц. Выбрав два спектральных канала на краях полосы пропускания по ПЧ $F_{\text{пч}}^1 = 0,6$ ГГц и $F_{\text{пч}}^2 = 4$ ГГц, мы будем иметь 4-е спектральных канала анализа по СВЧ входу радиометра (см. рис.4): два центральных $\nu_1 = 129,4$ ГГц (прямой), $\nu_1' = 131,6$ ГГц (зеркальный) и два опорных $\nu_2 = 127$ ГГц (прямой), $\nu_2' = 135$ ГГц (зеркальный).

Естественно, что после смесителя по ПЧ мощности сигналов в соответствующих прямых и зеркальных каналах складываются и становятся неразделимыми. Канал $F_{\text{пч}}^1$ измеряет среднюю яркостную температуру 2-х центральных каналов ν_1 и ν_1' , а опорный канал $F_{\text{пч}}^2$ - среднюю яркостную температуру опорных каналов ν_2 и ν_2' . Средняя же яркостная температура каналов ν_1 и ν_1' практически равна яркостной температуре в центре полосы $\nu_0 = 131$ ГГц (см. рис.4). Таким

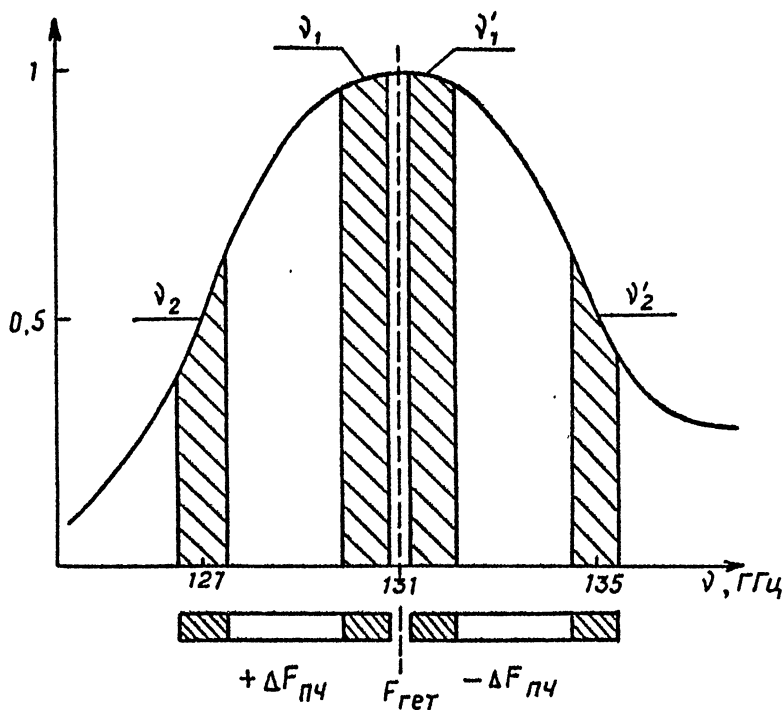


Рис.4. Схема приема атмосферного радиоизлучения в полосе SO_2 центрированной к частоте 131 ГГц (ν_1 и ν_2 - прямые каналы, ν'_1 и ν'_2 - зеркальные каналы приема). По оси ординат отложена нормированная интенсивность радиоизлучения в полосе.

образом, разность яркостных температур в каналах F^1 и F^2 и будет искомой измеряемой величиной. Все изложенное относится к случаю симметричной полосы поглощения, по крайней мере, в диапазоне ее ширины $2\Delta\nu$. Это условие с необходимой для практики точностью выполняется в полосе $SO_2 \nu_0 = 131$ ГГц.

Для интерпретации радиометрических измерений прежде всего необходимо выяснить, что представляет собой фоновое излучение атмосферы в диапазоне 125-137 ГГц. На рис.5 приведены характерные сезонные спектры яркостных температур чистой атмосферы в районе полосы поглощения $SO_2 = 131$ ГГц. Особенностью спектра радиоизлучения атмосферы в этом диапазоне является сильная нелинейная зависимость по частоте. Указанное обстоятельство приводит к тому, что даже для чистой атмосферы всегда существует разностный сигнал между центральным и опорным каналами $\Delta T_{АЯ}$:

$$\Delta T_{АЯ} = [T_{я}(\nu_2) + T_{я}(\nu_2') - T_{я}(\nu_0)]/2$$

Из рис.5 видно, что величина $[T_{я}(\nu_2) + T_{я}(\nu_2')]/2$ равна яркостной температуре в точке А. Величина сигнала $\Delta T_{АЯ}$ близка к величине искомого сигнала ΔT_{SO_2} от молекул SO_2 , но имеет другой знак. Казалось бы это делает невозможным выделение собственного сигнала ΔT_{SO_2} , так как вид спектра яркостной температуры атмосферы существенно зависит от количества влаги в атмосфере и ее температуры. Однако положительным фактором, позволяющим решить задачу по обнаружению излучения полосы SO_2 , является тот факт, что величина фоновой разности сигнала $\Delta T_{АЯ}$ практически не зависит от метеоусловий (рис.5). Ее среднегодовое значение составляет величину $\Delta T_{АЯ} = -2$ К и сезонные вариации не превышают 0,2 К. Таким образом, уровень сигнала $\Delta T_{АЯ} = -2$ К может служить нулевым уровнем, от которого производят отсчет измеряемой разности ΔT_{SO_2} .

На рис.5 (верхняя кривая) приведен спектр радиоизлучения атмосферы при наличии в приземном слое молекул SO_2 с концентрацией $f_{SO_2} = 1$ ПДК_p в слое толщиной 100 м. В этом случае измеряемая величина разности яркостной температуры в центральном и опорном каналах равняется $\Delta T_{SO_2} + \Delta T_{АЯ} = -0,8$ К, а искомое приращение яркостной температуры ΔT_{SO_2} от линии SO_2 будет:

$$\Delta T_{SO_2} = -0,8 \text{ К} - \Delta T_{АЯ} = -0,8 \text{ К} + 2 \text{ К} = 1,2 \text{ К}.$$

Эта величина в 1,2 раза превышает сезонные вариации фоновой

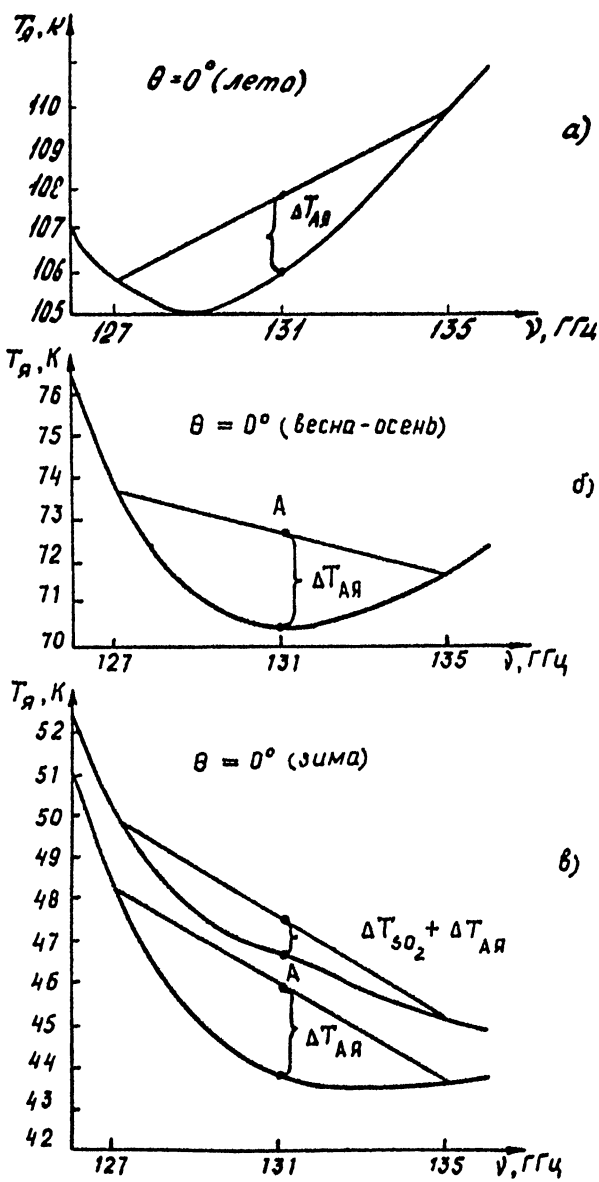


Рис. 5

разности $\Delta T_{\text{АЯ}}$. Точность задания нулевого уровня $\Delta T_{\text{АЯ}}$ может быть повышена, если на предварительном этапе определить вид спектра яркостной температуры чистой атмосферы. Для этого необходимо провести абсолютные измерения яркостной температуры в опорном канале, которые несут информацию об интегральном содержании парообразной воды и температуре воздуха.

Выше уже отмечалось, что оптимальный угол для наблюдения линии $\text{SO}_2 \nu_0 = 131 \text{ ГГц}$ близок к $\theta = 70^\circ$ для летних и зимних условий года. Значение фоновой разности для этого угла составляет $\Delta T_{\text{АЯ}} = 3,5 \text{ К}$ и сезонные вариации ее не превышают $\pm 0,3 \text{ К}$. Все изложенное выше относительно повышения точности определения фоновой разности $\Delta T_{\text{АЯ}}$ относится и к наблюдению при $\theta = 70^\circ$.

Спектральные радиометрические исследования фонового радионизлучения атмосферы в области резонанса поглощения $\text{SO}_2 \nu_0 = 131 \text{ ГГц}$ проводились летом - осенью 1993 г., в экологически чистых районах. Экспериментальные значения $\Delta T_{\text{АЯ}}$ оказались близкими к теоретическим, которые рассмотрены выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен анализ особенностей радионизлучения нижней атмосферы вблизи резонансов МГС и озона в ММ диапазоне волн. Задача радиометрической диагностики МГС представляет собой задачу по измерению слабых спектральных сигналов на уровне большого фона. Показана принципиальная возможность наземного радиометрического зондирования экологически приоритетных МГС. Изложена методика измерений радионизлучения вблизи резонансов МГС на примере ДЗ сернистого ангидрида. Полученные результаты могут быть использованы при разработке радиометрической аппаратуры ДЗ МГС и при физической интерпретации соответствующих радиометрических измерений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 94-02-05379-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. // Проблемы глобальной экологии. М.: Наука, 1992.
2. Косариков А.Н., Иванов А.В., Чурмеев А.С. и др. // Экологическая обстановка в Нижнем Новгороде. Физические и химические параметры. Н.Новгород: ГИПП "Нижполиграф", 1992.
3. Проект концепции Программы биосферных и экологических исследований АН СССР на период до 2015г. // Вестник АН СССР. 1988. N 11. С.5.
4. Перов С.П., Хргиан А.Х. Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеоиздат, 1980.
5. Waters J.W. // Proc. IEEE. 1992. V.80. N 11. P.1679.
6. Наумов А.П., Плечков В.М., Борин В.П. и др. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1980. Т.23. N5. С.632.
7. Маркина Н.Н. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т.29. N12. С.1499.
8. Naumov A.P., Troitsky A.V. // Proc. of specialist meeting on microwave radiometry and remote sensing applications. USA: Boulder, WPL. 1992. P.344.
9. Ефременко В.В., Маркина Н.Н. // Радиотехника и электроника. 1993. Т.38. N 10. С.1822.
10. Chedin A., Husson B., Scott N.A. et all. // The "GEISA" date bank 1984 version. 1986.
11. Наумов А.П. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1972. Т.15. N5. С.682.
12. Гречко Е.И., Ракитин В.С., Фоксева Е.В. и др. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т.29. N1. С.11.
13. Фомин Б.А., Романов С.В., Троценко А.Н. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т.29. N 1. С.67.
14. Назаров И.М., Николаев А.Н., Фридман Ш.Д. Основы дистанционных методов мониторинга природной среды. Л.: Гидрометеоиздат. 1983.
15. Зинченко И.И., Кисляков А.Г. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1974. Т.10. N 2. С. 1275.
16. Артемова Н.Е., Бондарев А.А., Карпов В.И. и др. // Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. - М.: Атомиздат. 1980.
17. Анискович В.М., Будилович Н.В., Нечаев В.Г. и др. // IY Всес. школа по распространению миллиметровых и субмиллиметровых волн в атмосфере. Н.Новгород: НИРФИ. 1991. С.198.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
1. Наиболее активные газовые компоненты нижней атмосферы для их радиометрического мониторинга	5
2. Исследование излучательных характеристик атмосферы в резонансных областях малых газовых составляющих	11
3. Методика радиометрических измерений атмосферного радиоизлучения в области резонанса сернистого ангидрида	19
Заключение	24
Литература	25