

Научно-исследовательский радиофизический институт  
Министерства образования Российской Федерации

---

П р е п р и н т N 452

**КВЧ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА  
АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ**

А.П. Наумов  
Н.Н. Ошарина  
А.В. Троицкий

Нижний Новгород 1999

Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В.  
КВЧ ТЕХНОЛОГИИ ПАССИВНОГО МОНИТОРИНГА  
АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ//  
Препринт N 452–Нижний Новгород: НИРФИ. 1999. 40 с.

УДК 537. 52. 77 : 502. 614. 7.

В статье развиваются теоретические представления о крайне высокочастотных (КВЧ) технологиях мониторинга природно-техногенной сферы в части диагностики загрязнения атмосферы примесными газами и пылью антропогенного происхождения. При этом рассматриваются пассивные технологии, когда источником информации является собственное (тепловое) радиоизлучение атмосферных ингредиентов и, таким образом, данные методы сами по себе являются экологически чистыми методами. На основе анализа параметров загрязнения, которые могут реализоваться в земной атмосфере, включая чрезвычайные ситуации, и условий переноса излучения в среде сформулированы рекомендации для создания радиометрической системы дистанционного определения концентрации ряда примесных ингредиентов в промышленных зонах.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы, в связи с возрастанием влияния антропогенных факторов на окружающую среду, стало уделяться повышенное внимание экологической обстановке в различных регионах страны. Известно, что предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих газообразных окислов и пыли в атмосфере промышленных регионов превышаются порой в десятки и сотни раз. Утечки газопроводов, взрывные работы, природные катастрофы также сопровождаются выбросами в атмосферу значительного количества вредных ингредиентов. Перечисленные обстоятельства свидетельствуют о необходимости проведения широкого фронта работ по контролю (мониторингу) за чистотой атмосферы. Ситуация, однако, осложняется отсутствием аппаратуры и методик, позволяющих оперативно и надежно определять пространственное и временное распределение загрязняющих компонент атмосферы. Имеющиеся стандартизированные индикаторы, как правило, регистрируют только локальное содержание атмосферных ингредиентов в месте расположения приборов. Между тем для эффективного контроля за чистотой атмосферы нужно знать вертикальные и горизонтальные размеры зон загрязнения, пространственное распределение содержания ингредиентов в них и т.д. Эффективное решение подобных проблем может быть достигнуто путем разработки и практического использования дистанционных методов индикации примесных компонент атмосферы. Ана-

логичные исследования содержания газовых компонент проводятся в России и за рубежом по тепловому излучению атмосферы в ИК диапазоне [1], а также методами лазерного зондирования [2].

Разработка дистанционных радиофизических методов экологического мониторинга атмосферы по особенностям характеристик ее собственного радиоизлучения в резонансных областях примесных газов микроволнового диапазона, а также в относительных окнах прозрачности, где существенный вклад в радиоизлучение дают аэрозоли и пылевые частицы, открывает новые возможности решения проблемы в связи с высокой чувствительностью радиометров к малым относительным содержаниям примесных компонент, и с возможностью использования радиометров при различных погодных условиях, включая облачные ситуации [3-6].

В статье речь идет о системах и методах радиометрического контроля в диапазоне миллиметровых радиоволн, на который приходится, с одной стороны, большое количество спектральных линий примесных газов, а с другой — в нем расположены достаточно глубокие окна прозрачности, удобные для дистанционного зондирования твердых частиц. В соответствии с Международным регламентом связи [7] миллиметровый диапазон радиоволн называется также диапазоном крайне высоких частот (КВЧ). Эта терминология и используется в данной статье. Важным достоинством радиометрических методов является то, что они основаны на приеме собственного теплового излучения изучаемых объектов (в дан-

ном случае —атмосферы) и не связаны с каким-либо дополнительным излучением, т.е. эти методы сами по себе являются экологически чистыми методами. Радиометрические системы и методы часто называют также радиотеплолокационными.

## 1. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ С АТМОСФЕРНЫМИ ПРИМЕСЯМИ

Атмосферные примеси антропогенного происхождения содержат либо повышенные количества вредных газовых ингредиентов, либо повышенную концентрацию пылевых частиц. Вблизи промышленных предприятий могут также одновременно реализовываться оба типа атмосферного загрязнения. Механизмы взаимодействия КВЧ излучения с этими примесями существенно различаются. Так, взаимодействие КВЧ излучения с молекулами примесных газов имеет квантовую природу и описывается методами квантовой механики, а взаимодействие с пылевыми частицами описывается с помощью электродинамических подходов. Кратко рассмотрим особенности указанных взаимодействий.

На КВЧ диапазон приходятся вращательные спектры молекул, структура которых является более простой по сравнению со структурой колебательных и электронных спектров, расположенных соответственно в инфракрасном и оптическом диапазонах волн. Взаимодействие молекул с

электромагнитным полем в первом приближении описывается гамильтонианом

$$H_{OF} = -\mu F, \quad (1)$$

где  $\mu$  — оператор электрического (или магнитного) дипольного момента,  $F$  — оператор электрического (или магнитного) поля. Из соотношения (1) следует, что в этом приближении поглощают и излучают электромагнитную энергию только молекулы, обладающие электрическими или магнитными дипольными моментами. Перечень наиболее распространенных атмосферных газовых примесей, молекулы которых обладают дипольными моментами, вместе с их численными значениями  $\mu_j$  приведен в таблице 1.

Таблица 1

Дипольные моменты (в единицах Дебая) молекул водяного пара и ряда малых газовых составляющих атмосферы, включая фреоны (по литературным данным)

Газ	H <sub>2</sub> CO	HNO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub> CCl	OH	SO <sub>2</sub>
$\mu_j, Д$	2,31	2,0	1,8546	1,755	1,667	1,634
Газ	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	HOCl	NH <sub>3</sub>	ClO	H <sub>2</sub> S	COS
$\mu_j, Д$	1,573	1,471	1,468	1,2974	1,02	0,709
Газ	O <sub>3</sub>	CFCl <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	NO	CO
$\mu_j, Д$	0,5337	0,46	0,29	0,166	0,16	0,112

Физические факторы, влияющие на формирование линий и полос микроволнового излучения газовых примесей в земной атмосфере, приведены в [8]. В цитированной работе изложены и принципиальные условия радиометрического мониторинга малых газовых составляющих (МГС), основанные на специфике их спектров, к которой относятся расположение вращательных резонансных частот по диапазону, разница в условиях формирования центральной и периферийной частей линии, количественные значения уширения линий и полос МГС на различных высотах в атмосфере и т. п.

Несмотря на отмеченную выше относительную простоту вращательных спектров, следует подчеркнуть, что и вращательным полосам присущи некоторые характеристики, которые усложняют интерпретацию соответствующих результатов. К таким характеристикам относится наличие все же перекрывающихся полос поглощения (излучения) и тонкой структуры у некоторых газовых компонент, а также сравнительно небольшая интенсивность многих полос. Последнее обстоятельство затрудняет диагностику МГС по их радиоизлучению в КВЧ диапазоне, поскольку диагностика сводится к непростой задаче выделения слабых сигналов на уровне значительного фона радиоизлучения, обусловленного излучением основных молекулярных компонент атмосферы (водяного пара и кислорода).

Изложенное иллюстрируется результатами, приведенными на рис. 1, на котором изображена спектральная зависимость коэффициентов поглощения семи примесных компо-

нент в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн при стандартных атмосферных условиях на уровне моря (давление  $P=760$  мм.рт.ст., температура  $T=293$  К, абсолютная влажность  $\rho=7,5$  г/м<sup>3</sup>) и при концентрациях, равных предельно допустимой концентрации (ПДК) для каждой примеси, а также значения коэффициентов поглощения чистой атмосферы, обусловленные водяным паром и молекулярным кислородом.

Из рис.1 видно, что у поверхности Земли при фоновых и даже предельно допустимых концентрациях МГС поглощение примесными газами меньше, чем поглощение основными атмосферными газами. Однако при увеличении высоты вклады примесей в ряде резонансных областей и основных атмосферных газов сравниваются и начиная с некоторых высот вклад МГС становится преобладающим.

Ослабление КВЧ излучения пылевыми частицами происходит вследствие рассеяния энергии, а также поглощения электромагнитной энергии и превращения ее в тепло. Электродинамическая сторона этих явлений достаточно хорошо известна (см., например, [9]). В общем виде задача об ослаблении электромагнитной энергии однородными сферическими частицами была решена Ми [10]. Из решения векторного волнового уравнения для атмосферы, в которой содержатся диэлектрические сферы (т.е. с учетом условий для составляющих электрического и магнитного поля на границах сфер), получается следующее выражение для эффективной площади шара  $Q$ , которая характеризуется отношением



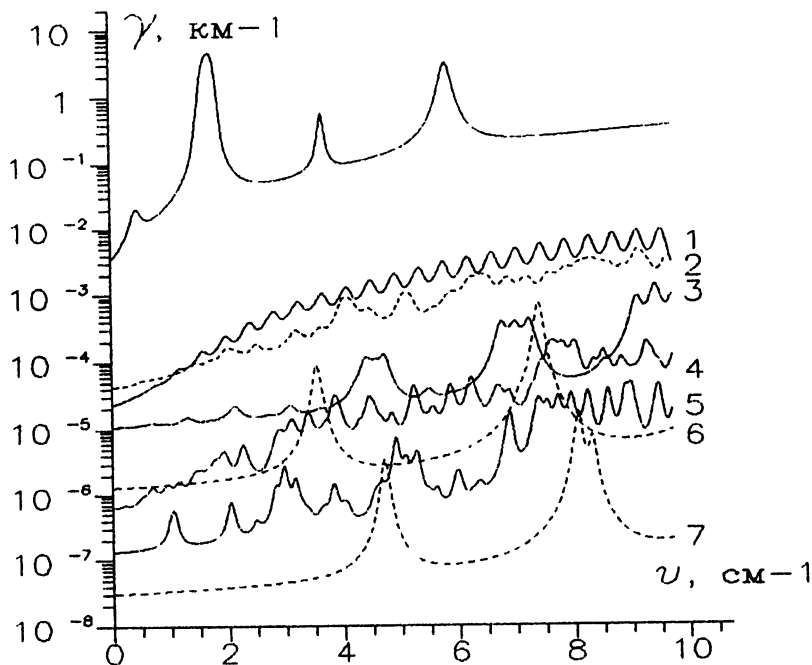


Рис.1. Коэффициенты поглощения примесных компонент (1— $\text{HNO}_3$ , 2— $\text{SO}_2$ , 3— $\text{H}_2\text{CO}$ , 4— $\text{O}_3$ , 5— $\text{NO}_2$ , 6— $\text{CO}$ , 7— $\text{NO}$ ) при стандартных атмосферных условиях на уровне моря (давление  $P = 760$  мм. рт. ст., температура  $T = 293$  К) и содержания, соответствующем ПДК. Верхняя кривая — суммарный коэффициент поглощения водяного пара и молекулярного кислорода.

полной мощности, теряемой возбуждающей волной на рассеяние и диэлектрические потери, к вектору Умова-Пойтинга падающей волны [9]:

$$Q = \frac{\lambda^2}{2\pi} \operatorname{Re} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1)(a_m + b_m). \quad (2)$$

Коэффициент ослабления пылевых частиц выражается через  $Q$  с помощью соотношения

$$\gamma_{\Pi}(\lambda) = \int_0^{\infty} n(a) Q(a, \lambda) da, \quad (3)$$

где  $\lambda$ —длина волны,  $n(a)da$  —количество частиц пыли в единице объема, обладающих радиусами в интервале  $(a, a+da)$ . Аналогичные выражения для эффективной площади и коэффициента рассеяния (в приближении однократного рассеяния) имеют вид

$$Q_p = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1) \{ |a_m|^2 + |b_m|^2 \}, \quad (4)$$

$$\gamma_p = \int_0^{\infty} n(a) Q_p(a, \lambda) da.$$

Физический смысл коэффициентов  $a_m, b_m$  заключается в том, что  $b_m$  можно считать амплитудами колебаний электрических диполей ( $m=1$ ), квадрупольей ( $m=2$ ) и других мультиполей высших порядков, так же, как  $a_m$  относятся к колебаниям магнитных диполей, квадрупольей и т.д., наводимых в диэлектрических сферах возбуждающей волной [9, 11]. Величины  $a_m, b_m$  выражаются через функции Бесселя и Ханкеля с комплексными аргументами. Выражения (2) и (3) существенно упрощаются для случая малых частиц ( $2\pi a / \lambda \ll 1$ ) [11]. В этом приближении рассеяние носит рэлеевский характер и ослабление почти полностью определяется поглощением.

Впоследствии теория Ми была обобщена на случай двухслойных сферических частиц (задача "Шар в оболочке") [12] и даже для многослойных сфер [13]. В последние годы расчеты ослабления КВЧ излучения содержащимися в атмосфере частицами развиваются в направлении разработки новых методов для частиц произвольной формы (например, на основе аппроксимационного метода взаимодействующих диполей [14, 15]). Продукты горения (дым, сажа, пепел и другие аэрозольные частицы) представляют собой совокупность кластеров, каждый из которых образован шарообразными частицами сажи, слипшимися друг с другом. С точки зрения геометрии кластеры дыма представляют собой фрактальные структуры. Усредненные по ансамблю кластеров с характерным радиусом интегральные сечения поглощения и рассеяния имеют вид, аналогичный тому, который следует и из тео-

рии Ми с добавлением в качестве множителя фактора усиления рассеяния, который в приближении малых кластеров равен числу шариков сажи в кластере.

В [16] были получены количественные результаты для коэффициентов ослабления радиоволн двухслойными сферическими частицами (в рамках теории [12]) с песчаными и суглинистыми ядрами в диапазоне длин волн  $\lambda \approx 0,1 - 10$  см для различных типов распределений частиц по размерам. Параметром задачи в [16] являлась относительная доля  $v$  обводненности частиц. На рис. 2 приведены значения удельных коэффициентов ослабления радиоволн в песчаных пылевых образованиях для двух значений  $v$  и четырех типов распределений частиц по размерам при температуре окружающей среды  $T = 300$  К.

Кривые 1 соответствуют сухим песчаным частицам ( $v=0$ ), при этом сплошная кривая описывает удельный коэффициент ослабления, т.е. коэффициент ослабления, отнесенный к значению плотности пылевых образований  $\rho_{\text{П}} = 1 \text{ г/м}^3$ , для случая экспоненциального распределения частиц по размерам ; пунктирная кривая получена для нормального распределения, штрих-пунктирная кривая — для логарифмически нормального и треугольники для экспериментального распределения частиц по размерам. Кривые 2 описывают соответствующие коэффициенты ослабления для аналогичных распределений частиц по размерам при относительной доле обводненности частиц  $\sim 20\%$  ( $v \approx 0,2$ ).

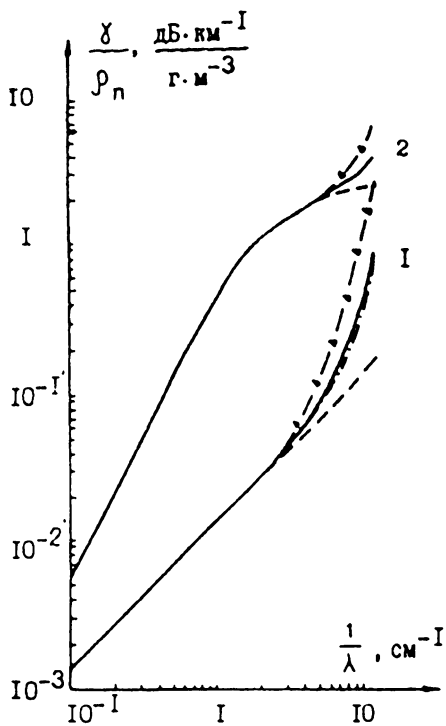


Рис. 2.

Из рис. 2 видно, что отличительной чертой спектральной зависимости коэффициента ослабления пылевых образований от соответствующих зависимостей молекулярного коэффициента поглощения является ее нерезонансный характер с возрастанием отношения  $\gamma/\rho_{\Pi}$  при укорочении длины волны. На разнице в спектральных зависимостях коэффициентов ослабления, а следовательно, и интегральных характеристик теплового излучения атмосферы, обусловленных газообразными примесями и пылевыми образованиями, основана возможность разделения вклада этих компонент и диагностика содержания каждой из них.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением интегральных характеристик излучения и инструментальных возможностей индикации загрязнения для ряда газовых примесей.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Суть радиотеплолокационного мониторинга состава атмосферы состоит в следующем. Атмосфера, как и всякое нагретое тело, излучает в различных диапазонах волн, включая и радиодиапазон. Вклад в излучение атмосферы вносят и перечисленные выше газы.

Эти газы имеют максимумы излучения на строго определенных (резонансных) частотах молекул. Проводя изме-

рения собственного излучения атмосферы на ряде частот вблизи соответствующих резонансов, можно получать информацию о качественном составе атмосферы. Для измерений используются приемники (радиометры), которые измеряют интенсивность теплового излучения атмосферы. Наличие максимума интенсивности на определенной частоте свидетельствует о присутствии соответствующей газовой компоненты, а по величине максимума можно судить о количественном содержании газа в атмосфере.

Для каждой примесной газовой компоненты установлены ПДК, длительные превышения которых могут вызвать нежелательные экологические и медико-биологические последствия. Уровню ПДК каждой компоненты соответствуют определенные значения интенсивности излучения. Превышение этой интенсивности свидетельствует о превышении ПДК, позволяет оценить степень риска возникновения чрезвычайных ситуаций и является сигналом для принятия специальных мер. Таким образом, целью определения концентрации примесей является сопоставление реализующихся в данный момент содержаний с ПДК на разных высотах.

К настоящему времени определены экологически приоритетные для радиометрического мониторинга малые газовые составляющие (МГС) нижних слоев атмосферы [5]. Разработана методика радиометрической диагностики загрязняющих примесей на примере дистанционного зондирования сернистого ангидрида [18]. Проведены радиометрические

измерения содержания аммиака [19] и сернистого ангидрида [18] в производственных выбросах.

Однако наряду с перечисленными газовыми компонентами существенное значение для мониторинга состояния природной среды имеет информация о содержании в атмосфере и многих других загрязняющих компонент (см. выше). Следует отметить, что мониторинг каждой МГС атмосферы имеет свою методическую специфику и особенности инструментальной реализации. Это связано с физическими особенностями спектров излучения МГС, с различной степенью обеспеченности элементной базы в КВЧ диапазоне и техническими возможностями реализации соответствующих схем приема, регистрации и анализа сигналов.

В последнее время были выполнены оценки ряда параметров радиометрической системы экологического мониторинга МГС, которая может быть разработана на основе пассивных КВЧ технологий. К числу таких параметров относятся оптимальные резонансные частоты и углы зондирования, а также нижние пределы загрязнения, физически доступные для измерений с помощью исследуемых методов. В таблице 2 содержится перечень исследованных газовых примесей, оптимальные частоты дистанционного зондирования (ДЗ) и минимально обнаружимые относительные концентрации МГС  $f_{i1}$ ,  $f_{i2}$  в летних условиях. В зимний период года условия диагностики загрязняющих примесей улучшаются.

Величины концентраций определены из условия равенства контрастов (в линии МГС и на склонах линии, где



вклад МГС в радиоизлучение атмосферы уже мал) яркостных температур 0,1 К при наблюдении в зенитном направлении. Подобные контрасты измеримы в настоящее время с помощью специальных радиометрических методик (см., например, [5]).

Считалось, что газовые примеси с концентрациями  $f_{i1}, f_{i2}$  равномерно перемешаны в слоях соответственно 100–200 м и 0–500 м. Для сравнения укажем, что ПДК разовые для  $\text{NH}_3$  составляют  $2,8 \cdot 10^{-7}$ , для  $\text{SO}_2$  –  $1,9 \cdot 10^{-7}$ , для  $\text{HNO}_3$  –  $1,5 \cdot 10^{-7}$ .

Таким образом, для ряда газовых примесей чувствительность радиометрического метода сопоставимы с ПДК разовым. Некоторые же газы могут быть диагностированы только при содержаниях, превышающих ПДК на 2 порядка. Создание радиометрической системы экологического мониторинга прежде всего оправдано для диагностики содержаний МГС, сопоставимых с ПДК. Во втором случае речь может идти о контроле за содержанием антропогенных газов непосредственно в производственных выбросах.

Таблица 2

Г а з	Резонансные частоты, ГГц	$f_{i1}$	$f_{i2}$
СЮ	130,0	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	278,6	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$8,3 \cdot 10^{-8}$

CO	115,3	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$
	230,5	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-6}$
N <sub>2</sub> O	150,7	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$
	276,3	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$
NO	150,4	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
	250,6	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$
NO <sub>2</sub>	98,0	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
	156,2	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$
	277,5	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-6}$
COS	146,0	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$
	279,7	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$
H <sub>2</sub> CO	140,8	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$
	291,4	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$
HNO <sub>3</sub>	143,7	$4,2 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$
	294,3	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	91,4	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
	251,9	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$
SO <sub>2</sub>	131,0	$9,1 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$
	282,3	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
HOCl	98,1	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$
	291,3	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$
HCN	88,6	$3,8 \cdot 10^{-7}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
	265,9	$9,7 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
NH <sub>3</sub>	24,0	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$
H <sub>2</sub> S	168,7	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$9,1 \cdot 10^{-7}$

### 3. КОНТРАСТЫ ЯРКОСТНЫХ ТЕМПЕРАТУР АТМОСФЕРЫ В РЕЗОНАНСНЫХ ОБЛАСТЯХ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Одной из важнейших характеристик возможностей радиометрического мониторинга МГС является спектральный контраст яркостных температур в резонансных областях примесей :

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

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

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

и  $\gamma_A = \gamma_{\text{ф}} + \gamma_i$ . В (6)  $T(l)$  – распределение температуры по лучу антенны. Фоновое значение яркостной температуры  $T_{\text{АЯ}}$  получается из (6) при значении коэффициента поглощения  $i$ - й газовой компоненты  $\gamma_i = 0$ , 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  $\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{O}_2} + \gamma_{\text{ВП}}$ , где  $\gamma_{\text{O}_2}$  и  $\gamma_{\text{ВП}}$  –соответственно коэффициенты молекулярного поглощения кислорода и водяного пара.

На рис. 3-8 приведены контрасты  $\Delta T_i$  для резонансных областей, расположенных вблизи оптимальных частот ДЗ (см. табл. 2) для окислов азота ( $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ), серы ( $SO_2$ ), углерода ( $CO$ ) и для сероводорода ( $H_2S$ ). Выбранные для подробного анализа газовые компоненты принадлежат к числу наиболее распространенных загрязняющих примесей, которые составляют значительное содержание выбросов ТЭЦ и выбросов промышленного производства. Молекулы перечисленных газов представляют собой различные типы молекул: линейные ( $N_2O$ ,  $NO$ ,  $CO$ ), т.е. являющиеся симметричными волчками с одним нулевым моментом инерции, и асимметричные волчки ( $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2S$ ). Поэтому анализ возможностей построения радиометрической системы КВЧ мониторинга указанных газовых примесей, с одной стороны, охватывает наиболее характерные типы загрязняющих компонент, а, с другой стороны, — дает достаточно полное представление об особенностях рассматриваемой технологии.

Величины  $\Delta T_i$ , приведенные на рис. 3-8, получены для толщины загрязняющего слоя  $\Delta h \approx 100$  м, расположенного на высотах от 100 до 200 м. Контрасты для окислов азота и углерода вычислены при их относительной концентрации  $f_i = 10^{-3}$ . Контрасты для сернистого ангидрида и сероводорода получены соответственно для  $f_i = 10^{-5}$  и  $10^{-4}$ . Спектральные зависимости контрастов для некоторых МГС имеют достаточно простой вид ( $N_2O$ ,  $H_2S$ ), для других компонент эти зависимости усложнены тонкой структурой (например,  $\Lambda$  — удвоением в линии 250,6 ГГц спектра  $NO$ ) либо перекрытием

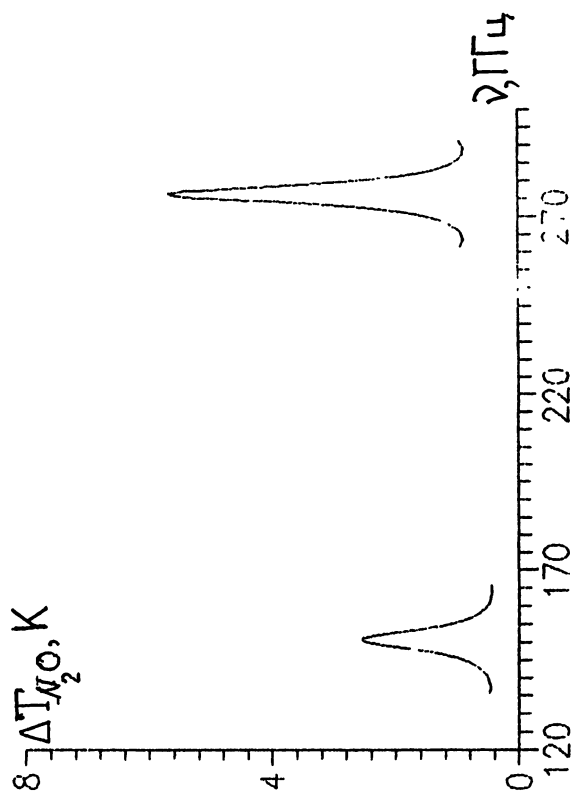


Рис.3. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{N_2O}$  для концентрации закиси азота  $f_{N_2O} = 10^{-3}$  в слое 100–200 м при наблюдениях в зенит вблизи резонансных частот 150,7 ГГц и 276,3 ГГц.

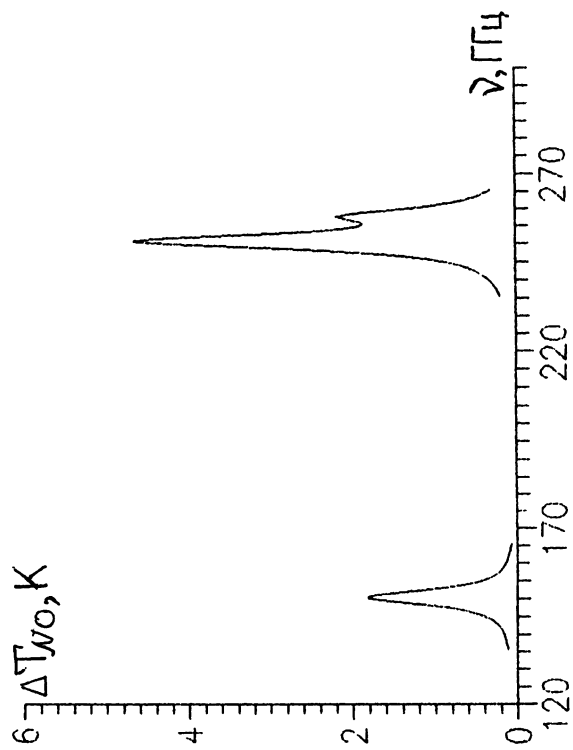


Рис.4. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{NO}$  для концентрации окиси азота  $f_{NO} = 10^{-3}$  в слое 100-200 м при наблюдениях в зенит вблизи резонансных частот 150,4 ГГц и 250,6 ГГц.

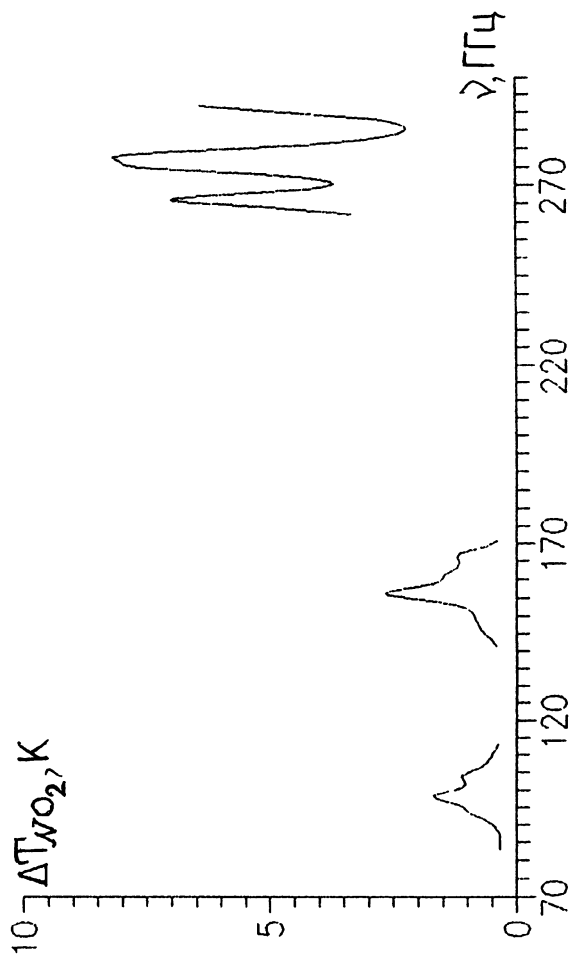


Рис.5. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{\text{NO}_2}$  для концентрации двуокиси азота  $f_{\text{NO}_2} = 10^{-3}$  в слое 100-200 м при наблюдениях в зенит вблизи резонансных частот 98 ГГц, 156,2 ГГц и 277,9 ГГц.

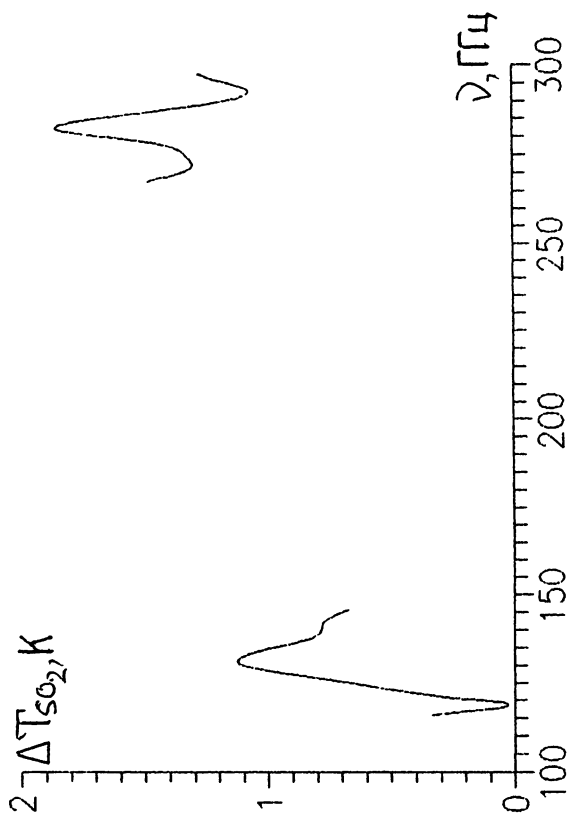


Рис.6. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{SO_2}$  для концентрации сернистого ангидрида  $f_{SO_2} = 10^{-5}$  в слое 100-200 м при наблюдениях в зенит вблизи резонансных частот 131 ГГц и 282,3 ГГц.



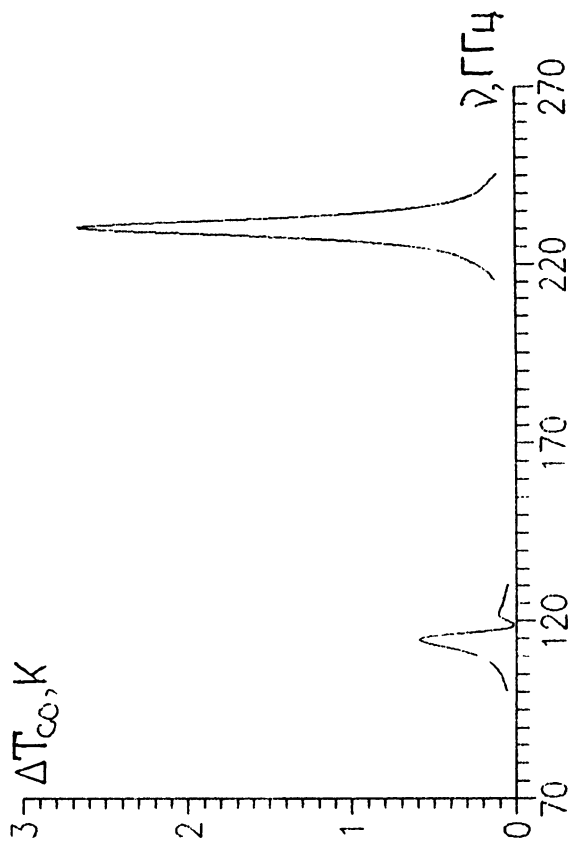


Рис.7. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{CO_2}$  для концентрации окиси углерода  $f_{CO} = 10^{-3}$  в слое 100-200 м при наблюдениях в зенит вблизи резонансных частот 115,3 ГГц и 230,5 ГГц.

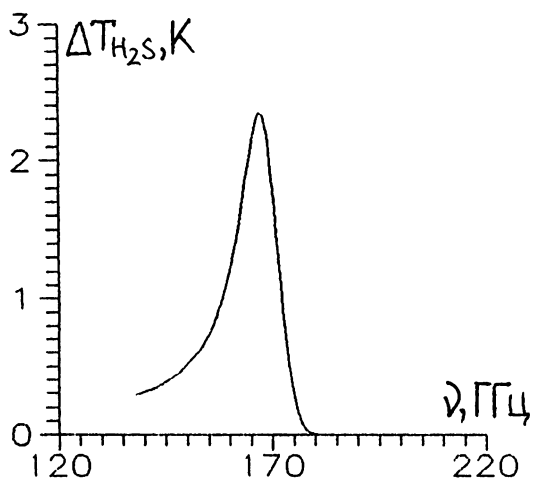


Рис.8. Спектральный контраст яркостной температуры  $\Delta T_{H_2S}$  для концентрации сероводорода  $f_{H_2S} = 10^{-4}$  в слое 100-200 м при наблюдении в зенит вблизи резонансной частоты 168,7 ГГц.

спектральных линий и полос ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ). Появление спектральной особенности в линии 115,3 ГГц CO и резкое уменьшение контраста на частотах  $\nu \leq 171$  ГГц в линии  $\text{H}_2\text{S}$  обусловлено влиянием основных газовых компонент атмосферы – в первом случае влиянием молекулярного кислорода (синглетная линия 118,75 ГГц) и во втором случае влиянием водяного пара (линия 183,31 ГГц). Максимумы контрастов реализуются, как правило, вблизи резонансных частот МГС, однако влияние поглощающих свойств основных компонент атмосферы может приводить к частотному сдвигу расположения максимумов до  $\sim 1$  ГГц, что имеет место в указанных выше спектральных областях для CO и  $\text{H}_2\text{S}$ . Результаты, полученные в данном разделе, использовались ниже при разработке методических аспектов радиометрических измерений содержания МГС в нижней атмосфере.

#### 4. МЕТОДИКА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ СОДЕРЖАНИЯ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Для решения задачи дистанционного зондирования нижней атмосферы во вращательных линиях поглощения МГС требуются радиометрические спектрометры, реализующие полосу анализа и спектральное разрешение, соответствующие форме исследуемой линии. Существенной особенностью радиоизлучения нижней атмосферы в линиях МГС является их значительное уширение (до нескольких ГГц) бла-

годаря молекулярным соударениям при сравнительно больших давлениях и часто имеющих место перекрытиях спектральных линий поглощения (в частности, для молекул  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{SO}_2$ ) и образование полос поглощения. Например, радиоизлучение тропосферного  $\text{SO}_2$  в области полосы поглощения  $\nu_0 \approx 131$  ГГц представляет особенность с шириной  $\Delta\nu \approx 8 \div 9$  ГГц, а для молекулы  $\text{NO}_2$  вблизи частот  $\nu_0 \approx 156,2$  Гц и  $\nu_0 = 277,5$  ГГц с шириной  $\Delta\nu \approx 9 \div 10$  ГГц, в то время, как в области одиночных линий поглощения  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  эта ширина составляет величину  $\Delta\nu \approx 5$  ГГц.

Сильные различия в формах линий излучения МГС в нижней атмосфере (см. рис. 3-8) требуют построения достаточно гибких схем и алгоритмов работы спектральных радиометров. Отмеченные выше особенности в уширении полос излучения МГС имеют при спектральном радиометрическом анализе как положительную, так и отрицательную сторону. Отрицательная сторона – трудность в создании широкополосного ( $\Delta\nu \sim 10$  ГГц) СВЧ тракта радиометра при проведении спектрального анализа исследуемой линии (полосы). Положительная сторона – возможность реализации достаточно широкой полосы пропускания каждого отдельного спектрального канала  $\delta\nu \leq 0,5$  ГГц, что позволяет реализовать достаточно высокую чувствительность  $\delta T_{\text{я}} \approx 0,1$  К и устранить сложную техническую процедуру – стабилизацию частоты гетеродина при преобразовании входного СВЧ сигнала в сигнал промежуточной частоты  $F_{\text{ПЧ}}$ , на которой и происходит спектральный анализ линии. Необходимая отно-

сительная стабильность частоты гетеродина радиометра при этом составляет величину  $\sim 5 \cdot 10^{-4} \div 10^{-3}$ , что обычно реализуется как в полупроводниковых гетеродинах Ганна, так и в лампах обратной волны.

Для определения интегрального содержания МГС в нижней атмосфере в принципе достаточно проведения измерений в трех спектральных каналах, один из которых расположен в центре полосы (линии) излучения, а два других (опорных) – на ее крыльях. Наличие двух опорных каналов необходимо для учета наклона спектра интенсивности фонового радиоизлучения чистой атмосферы. Фактически измеряемой величиной является разность яркостных температур в центре полосы и среднеарифметической яркостной температуры в двух опорных каналах. Однако на практике, в силу большой ширины спектральной линии, реализовать такую полосу анализа практически невозможно как по СВЧ тракту, так и по промежуточной частоте (ПЧ), где и осуществляется сам спектральный анализ сигнала. Эти трудности преодолеваются процедурой свертки линии поглощения МГС. Частота гетеродина радиометра  $F_{\text{Гет}}$  выбирается равной центральной частоте  $\nu_0$  полосы излучения  $F_{\text{Гет}} = \nu_0$ . В этом случае прямой и зеркальный каналы радиометра  $F_{\text{Гет}} + F_{\text{ПЧ}}$  и  $F_{\text{Гет}} - F_{\text{ПЧ}}$  будут располагаться симметрично справа и слева относительно центра  $\nu_0$  линии излучения и радиометр с шириной полосы приема  $\Delta F_{\text{ПЧ}} = 5$  ГГц анализирует уже удвоенную полосу частот  $\Delta F = 10$  ГГц. Выбрав два спектральных канала на краях полосы приема по ПЧ  $\delta F_1 = (0 \div 0,5)$  ГГц и

$\delta F_2 = (4,5 \div 5)$  ГГц, имеем четыре спектральных канала по СВЧ входу радиометра (см. рис. 9) : два центральных  $\delta v_1 = (v_0 \pm 0,25)$  ГГц – прямой и зеркальный, и два опорных  $\delta v_2 = (v_0 \pm 4,75)$  ГГц – также прямой и зеркальный. Естественно, что после смесителя по промежуточной частоте мощности сигналов в соответствующих прямых и зеркальных каналах складываются и становятся неразделимыми. Канал  $\delta v_1$  измеряет среднюю яркостную температуру двух центральных каналов, которая, в силу малой отстройки каналов от  $v_0$  и большой ширины линии, равна яркостной температуре в центре линий поглощения МГС. Канал  $\delta v_2$  измеряет среднюю яркостную температуру опорных каналов. Разность же этих температур и есть искомая измеряемая величина. Симметричность линии излучения МГС с необходимой для практики точностью обычно выполняется. Калибровка принимаемого сигнала осуществляется по контрасту радиоизлучения от ясной атмосферы и черного тела в дальней зоне антенны, которое находится при температуре окружающего воздуха  $T_0$ . Эта схема измерений была реализована нами на практике и использовалась для обнаружения радиолинии двуокиси серы  $SO_2$   $\nu \approx 131$  ГГц в нижней атмосфере [18]. Такая схема построения спектральной аппаратуры и методики измерений приемлема и для измерений в других полосах излучения МГС, ширины которых близки к ширине полосы  $SO_2$   $\nu_0 \approx 131$  ГГц или меньше. Естественно, что СВЧ тракт от антенны до смесителя должен быть индивидуально сконструирован и настроен на соответствующую линию излучения.

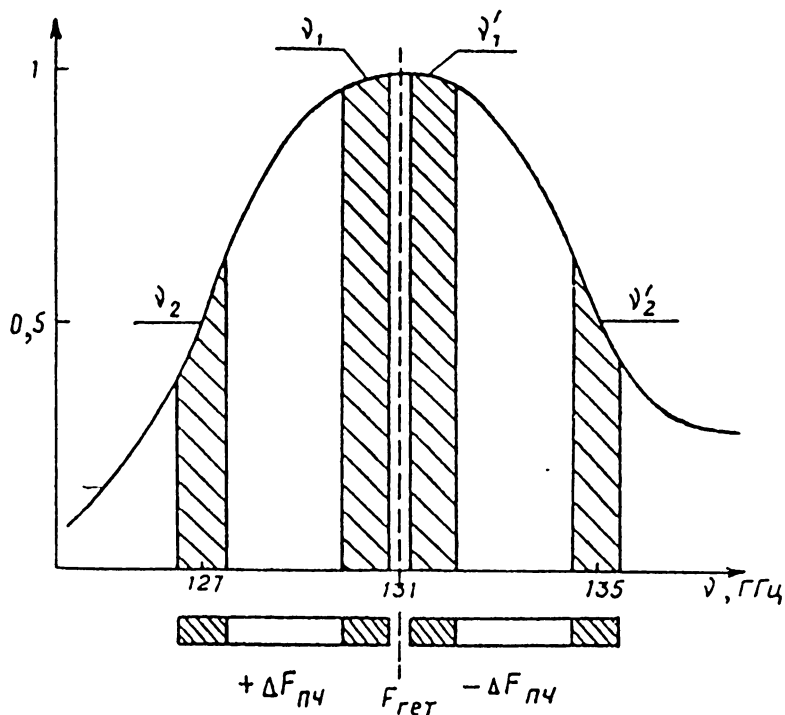


Рис. 9. Схема приема атмосферного радиоизлучения в полосе  $\text{SO}_2$  centered к частоте 131 ГГц ( $\nu_1$  и  $\nu_2$  — прямые каналы,  $\nu_1'$  и  $\nu_2'$  — зеркальные каналы приема). По оси ординат отложена нормированная интенсивность радиоизлучения в полосе.

Для изолированных линий излучения МГС, таких как CO, NO и N<sub>2</sub>O, ширины которых  $\Delta\nu \approx 5$  ГГц, полоса спектрального анализа будет охватывать практически всю линию. Опорные каналы будут располагаться уже не на уровне половинной интенсивности линии, а практически на ее краях. Это примерно в два раза увеличивает измеряемый информативный сигнал, т.е. в два раза увеличивает порог обнаружения содержания МГС в нижней атмосфере.

## 5. РЕКОМЕНДАЦИИ К ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КВЧ МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Из рис. 3-8 видно, что контрасты яркостных температур в полосах шести газовых компонент, которые были выбраны для анализа, изменяются от  $\sim 0,6$  К до  $\sim 8$  К. Однако указанные величины  $\Delta T_{яi}$  соответствуют различным относительным концентрациям газовых примесей в нижней атмосфере: от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$ . Измеренные контрасты  $\sim 0,1$  К реализуются для концентраций  $f_i$ , наиболее близких к ПДК рабочей зоны ( $f_i^{ПДК}$ ) или несколько превышают ПДК рабочей зоны для следующих газовых примесей в нижеуказанных спектральных областях (см. табл. 3).

Следует отметить, что аналогичный анализ затрудняется для некоторых примесей из-за отсутствия в литературе единого мнения о значениях ПДК. Это замечание относится,



Таблица 3.

Г а з	Частота $\nu$ , ГГц	$f_i / f_i^{\text{ПДК}}$
SO <sub>2</sub>	131,0	0,25
	282,3	0,15
NO <sub>2</sub>	156,2	11,0
	277,5	0,4
H <sub>2</sub> S	168,0	0,7
CO	230,5	2,0

в частности, к закиси и окиси азота (N<sub>2</sub>O, NO), поэтому сведения об указанных примесях не приведены в таблице 3.

Для некоторых из указанных компонент лучшая чувствительность радиометрических систем к содержанию МГС может реализоваться на более высоких частотах : например, для SO<sub>2</sub> на частоте 282,3 ГГц, для NO<sub>2</sub> на частоте 277,5 ГГц. Однако увеличение рабочей частоты функционирования каналов связано с трудностями инструментальной реализации из-за меньшей обеспеченности элементной базы, а также с большим влиянием аэрозолей и пылевого загрязнения на работу соответствующих каналов.

На основании оценок, результаты которых приведены в таблице 3, и данных, изложенных в разделах 3, 4, можно сформулировать следующие рекомендации к инструментальной реализации радиометрической системы КВЧ мониторинга газового загрязнения атмосферы. На данном этапе можно рекомендовать создание 4-х канальной системы для

мониторинга сернистого ангидрида, двуокиси азота, сероводорода и окиси углерода :

Г а з	Рабочая частота, ГГц
SO <sub>2</sub>	131
NO <sub>2</sub>	156,2
H <sub>2</sub> S	168
CO	230,5

Заметим, что каждый канал анализа газовой компоненты содержит 4 рабочих канала (см. раздел 4). На данном этапе не исключается, однако, что для анализа содержания двуокиси азота может быть целесообразно использовать все-таки более высокочастотный канал  $\nu = 277,5$  ГГц, так как изложенные выше технические трудности реализации такого канала вполне могут быть скомпенсированы более высокой чувствительностью к содержанию NO<sub>2</sub>. Для решения рассматриваемых задач вполне допустимы полосы приема сигналов в сотни мегагерц ( $\leq 500$  МГц), а флуктуационная чувствительность радиометров должна составлять 0,1 К при времени интегрирования сигнала  $\tau = 1$  с.

Радиометрическая информация, поступающая по спектральным каналам, регистрируется и обрабатывается автоматизированной системой на базе ПК. Динамический диапазон измеряемых температур радиометра  $0 \div 300$  К преобразуется в выходной сигнал  $0 \div 10$  в и отцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП) в коды. Разряд-

ность АЦП определяется точностью измерений, которая для рассматриваемой задачи составляет величину  $\leq 0,1$  К. Это требует применения 14- и разрядного АЦП. Слабая изменчивость входного информативного сигнала позволяет вести последовательный анализ со значительным (несколько секунд) усреднением. В силу этого требования к быстродействию практически отсутствует. Достаточно проводить опрос каналов со скоростью  $1 \div 4$  с.

Для определения характеристик диффузии, которая определяет рассеяние загрязняющих примесей, важно также знание термического режима атмосферы. Известно [20], что наличие приподнятых инверсий значительно ослабляет турбулентный обмен и это обстоятельство приводит к резкому увеличению интенсивности загрязнения приземного слоя промышленными выбросами, определяет закономерности распространения примесей и особенности их пространственно-временного распределения. Поэтому рекомендации к системе экологического КВЧ мониторинга МГС могут быть дополнены целесообразностью включения в радиометрическую систему еще одного канала для дистанционного определения высотного распределения температуры в приземном слое атмосферы. Решение этой задачи достигается дистанционным зондированием атмосферы в центре спин-вращательной полосы излучения молекулярного кислорода, центрированной к частоте 60 ГГц. Подобный канал уже разработан и его функциональные особенности, технологии ДЗ и восстановления профилей температуры изложены в [21]. Созданный в

[18] радиометр ДЗ содержания  $\text{SO}_2$  в полосе 131 ГГц также может являться составной частью рассматриваемой радиометрической системы экологического КВЧ мониторинга.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе рассмотрения физических механизмов формирования и переноса радиоизлучения в нижних слоях атмосферы и анализа элементной базы в миллиметровом (КВЧ) диапазоне волн сделаны выводы о возможности разработки и создания наземной радиометрической системы мониторинга загрязнения атмосферы.

В данной работе :

- определен ряд оптимальных параметров спектральной радиоаппаратуры мониторинга МГС ;
- получены количественные сведения о минимально обнаружимых содержаниях загрязняющих газовых примесей в нижней атмосфере методами наземной радиометрии ;
- показано, что разрабатываемые методики мониторинга не имеют ограничений по верхнему порогу концентрации МГС в условиях земной атмосферы ;
- сформулированы рекомендации к инструментальной реализации радиометрической системы КВЧ мониторинга загрязнения атмосферы.

Данная работа выполнена при частичной поддержке гранта Минобразования РФ по фундаментальным исследованиям в области приборостроения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Виролайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М. Погрешности одновременного определения содержания ряда атмосферных газов по наземным измерениям теплового ИК излучения. // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35. N 2. С. 215-221.

2. Самохвалов И.В., Копытин Ю.Д., Ипполитов И.И. и др. Лазерное зондирование тропосферы и подстилающей поверхности.–Новосибирск: Наука, 1987.–262 с.

3. Gaikovich K.P., Markina N.N., Naumov A.P., Plechkov V.M., Sumin M.I. Investigation of remote sensing possibilities of the lower atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use.// Intern. J. Remote Sensing. 1983. V. 4. N 2. P. 419-431.

4. Naumov A.P., Troitskij A.V. Ground radiometry of the troposphere for problems of ecology and meteorology. // Proc. of Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing Applications. USA: Boulder. 1992. P. 344-346.

5. Маркина Н.Н., Наумов А.П., Троицкий А.В. Методология радиометрического зондирования малых газовых составляющих и озона в нижних слоях атмосферы. // Радиотехника и электроника. 1995. Т. 40. N 12. С. 1843-1849.

6. Наумов А.П., Ошарина Н.Н. Физические аспекты радиометрического мониторинга загрязненности воздуха. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т. 40. N 6. С. 722-731.

7. Физический энциклопедический словарь.- М.: Советская энциклопедия, 1983, с. 608.
8. Китай Ш.Д., Наумов А.П., Ошарина Н.Н. Физические основы радиометрического мониторинга малых газовых составляющих атмосферы.// Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1998. N 4. С. 62-65.
9. Kerr D.E. Propagation of short radio waves.- New York: M.I.T., Radiation Laboratory Series. 1951. V. 13 (русский перевод:"Распространение ультракоротких радиоволн" под редакцией Б.А. Шиллерова.-М.: Советское радио. 1954).
10. Mie G. Beitrage zur optic truber medien speziel kolloidaler metallosungen. // Annal. Physik. 1908. V. 25. N 4. P. 377-445.
11. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами.-М.: ИИЛ. 1961, 536 с.
12. Aden A.L., Kerker M. Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres.// J. Appl. Phys. 1951. V. 22. N 10. P. 1242-1246.
13. Wu Z.S., Wang Y.P. Electromagnetic scattering for multilayered sphere: recursive algorithms. // Radio Sci. 1991. V. 26. N 6. P. 1393-1401.
14. Parsell E.M., Pennypacker C.R. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains.// Astrophys. Journ. 1973. V. 186. N 2(I). P. 705-714.
15. Ошарин А.М. Рассеяние миллиметровых радиоволн кристаллами сухого снега. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1994. Т. 37. N 11. С. 1428-1438.

16. Виняйкин Е.Н., Зиничева М.Б., Наумов А.П. Ослабление и изменение фазы миллиметровых и сантиметровых радиоволн в среде, состоящей из сухих и обводненных пылевых частиц. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1994. Т. 37. N 11. С. 1412-1427.

17. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. –М.: ИИЛ, 1959, 756 с.

18. Струков И.А., Троицкий А.В. Обнаружение радиолинии лвуокиси серы  $\nu \approx 131$  ГГц в нижней тропосфере. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1997. Т. 40. N 6. С. 704-712.

19. Наумов А.П., Плечков В.М., Борин В.П. и др. О возможностях индикации радиофизическим методом аммиачного загрязнения атмосферы.// Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1980. Т. 23. N 5. С. 632-635.

20. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. –Л.: Гидрометеодат. 1975, 448 с.

21. Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В. Наземное термическое зондирование атмосферы в микроволновом диапазоне. // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1999. Т. 42. N 1. С. 45-59.

# СО Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
В в е д е н и е . . . . .	3
1. Физические механизмы взаимодействия КВЧ излучения с атмосферными примесями. . . . .	5
2. Теоретическое обоснование радиометрического мониторинга антропогенного загрязнения атмосферы . . . . .	14
3. Контрасты яркостных температур атмосферы в резонансных областях малых газовых составляющих . . . . .	19
4. Методика радиометрических измерений содержания малых газовых составляющих в нижней атмосфере . . . . .	27
5. Рекомендации к инструментальной реализации радиометрической системы КВЧ мониторинга загрязнения атмосферы. . . . .	32
З а к л ю ч е н и е . . . . .	36
Л и т е р а т у р а . . . . .	37