

УДК 537.52.77;502.614.7

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ

Ш. Д. Китай, А. П. Наумов, Н. Н. Ошарина

Приведены сведения о вращательных спектрах малых газовых составляющих, обладающих дипольными моментами. Установлен набор газовых компонент, которые могут быть диагностированы в нижней и средней атмосфере методами микроволновой радиометрии при наблюдениях с поверхности Земли и с борта ИСЗ, включая лимбовое зондирование.

Принципиальная возможность осуществления радиометрического мониторинга малых газовых составляющих (МГС) атмосферы основана на свойствах собственного (теплого) радиоизлучения, генерируемого атмосферными газами, которые имеют магнитные или электрические дипольные моменты. Эти газы имеют максимумы излучения (поглощения) на резонансных частотах молекул. Проводя измерения уровня теплового излучения атмосферы вблизи резонансов МГС, можно получить информацию о содержании загрязняющих газовых компонент. Частоты вращательных спектров молекул газов лежат в радиодиапазоне. По этой причине при радиометрическом мониторинге имеют дело с более простыми спектрами атмосферных газов, чем в ИК- и оптических областях, к которым относятся соответственно колебательные и электронные квантовые переходы. В табл. 1 приведен перечень ряда атмосферных газовых примесей, молекулы которых обладают дипольными моментами и в принципе могут быть обнаружены по их собственному тепловому радиоизлучению.

К особенностям вращательных спектров МГС относятся следующие: уширение линий и полос поглощения определяется бинарными молекулярными соударениями на высотах от поверхности Земли до  $\sim 60$  км, и эти соударения являются адиабатическими, т. е. сопровождаются разрешенными квантовыми переходами, в отличие от адиабатических соударений в ИК- и оптической областях спектра. Молекулярные соударения определяют и в целом форму спектральных линий, расположенных в микроволновом диапазоне. Известно, что формирование центральной части линии (малые частотные отстройки от резонанса  $\Delta\omega$ ) происходит за счет соударений далеко пролетающих молекул:  $\Delta\omega \sim r^{-m}$ , где  $r$  — прицельное расстояние соударений, которые достаточно хорошо описываются кинетической теорией. Как следствие, с помощью ударной теории, область применимости которой определяется соотношением  $\tau_c^{eff} \ll 1/\Delta\omega$ , вполне удовлетворительно описываются характерис-

тики поглощения и излучения микроволновой энергии в резонансных областях спектра. В использованном неравенстве  $\tau_c^{eff}$  — эффективная величина длительности молекулярных соударений, равная отношению времени соударения к количеству квантовых переходов за это время. Принципиальным условием

Таблица 1  
Дипольные моменты МГС и значения радиояркостных контрастов  $\Delta T_b$  в резонансных областях примесей для слоев загрязнения  $100 \div 200$  м ( $\Delta T_{b1}$ ) и  $0 \div 500$  м ( $\Delta T_{b2}$ )

Газ	$\mu_i$ , Д	$\nu$ , ГГц	$\Delta T_{b1}$ , К	$\Delta T_{b2}$ , К
CO	0,112	115,3	<0,1	<0,1
		230,5	<0,1	0,1
COS	0,709	146,0	0,6	2,8
		279,7	1,0	5,0
HNO <sub>3</sub>	2,0	143,7	2,4	11,6
		294,3	4,6	19,2
HCN	2,984	88,6	2,6	12,5
		265,9	10,3	38,7
HOCl	1,471	98,1	0,3	1,5
		291,3	0,6	2,6
H <sub>2</sub> CO	2,31	140,8	0,9	4,6
		291,4	3,2	14,1
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,573	91,4	0,6	3,0
		251,9	0,5	2,5
H <sub>2</sub> S	1,02	168,9	0,2	1,1
NH <sub>3</sub>	1,468	24,0	0,9	4,2
NO	0,16	150,5	<0,1	0,1
		250,5	<0,1	0,2
		277,9	0,1	0,4
NO <sub>2</sub>	0,29	98,0	<0,1	0,1
		156,2	<0,1	0,1
		277,9	0,1	0,4
N <sub>2</sub> O	0,166	150,7	<0,1	0,1
		276,3	0,1	0,3
SO <sub>2</sub>	1,634	130,9	1,1	5,5
		282,3	1,9	8,7
ClO	1,2974	130,0	0,9	4,5
		278,6	2,7	12,1

возможности радиометрического мониторинга МГС является то обстоятельство, что многие спектральные линии и полосы примесей приходится на окна прозрачности атмосферы. Это обеспечивает возможность выделения вклада МГС по их спектральным особенностям на фоне характеристик поглощения и излучения основных молекулярных компонент атмосферы (водяного пара и кислорода), а также надежность количественной интерпретации результатов соответствующих радиометрических измерений в резонансных областях примесей.

Отмеченные обстоятельства характеризуют положительные стороны радиометрического мониторинга МГС. Однако наряду с этим существуют и определенные трудности радиометрической индикации МГС. Эти трудности связаны, во-первых, с тем, что диагностика МГС по их радиоизлучению в микроволновом диапазоне представляет собой непростую задачу выделения слабых сигналов на уровне значительного фона радиоизлучения атмосферы. Во-вторых, в перекрывающихся полосах поглощения интенсивность собственного радиоизлучения чистой атмосферы (фона) является уже нелинейной функцией частоты и требует корректного учета. Далее, расчеты радиоизлучения атмосферы в перекрывающихся полосах МГС (вычисление ядер интегральных уравнений для решения обратных задач дистанционного зондирования) должны проводиться с учетом интерференции спектральных линий, однако количественная теория подобных эффектов развита еще недостаточно. И дело здесь не столько в принципиальной стороне соответствующих методов, сколько в отсутствии необходимых спектроскопических измерений. Наконец, существуют технические трудности в создании широкополосных ( $\delta\nu \sim 5 \div 10$  ГГц) СВЧ-трактов радиометров при проведении спектрального анализа исследуемых полос излучения. Некоторые из этих трудностей преодолеваются с помощью методик измерений, развитых для решения радиоастрономических задач (см., напр., [1]), другие требуют своего решения.

В работе рассмотрены возможности индикации МГС в нижних слоях атмосферы при дистанционном зондировании (ДЗ) с поверхности Земли и в средней атмосфере при ДЗ с борта ИСЗ в лимбовом варианте. Для анализа возможностей радиофизических аспектов диагностики МГС используются высотные распределения фоновых концентраций примесных компонент  $f_i$  (рис. 1), сведения об их предельно допустимых концентрациях (ПДК), количественные данные об имеющих место превышениях ПДК, параметры спектров поглощения в миллиметровом диапазоне волн МГС и основных газовых компонент атмосферы — водяного пара и кислорода, а также алгоритмы расчетов коэффициентов поглощения, оптических толщин и радиояркостных температур атмосферы при наблюдениях с различных платформ. В случаях загрязнения нижних слоев атмосферы указанные характеристики анализировались для тех примесей,

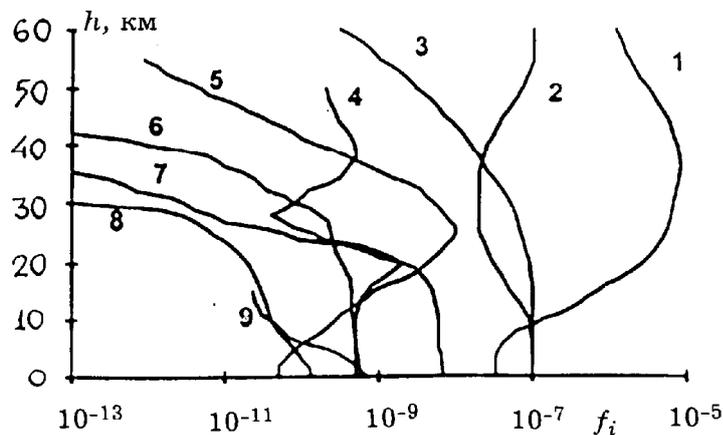


Рис. 1. Высотные распределения фоновых относительного содержания ряда МГС: 1 —  $O_3$ , 2 —  $CO$ , 3 —  $N_2O$ , 4 —  $ClO$ , 5 —  $HNO_3$ , 6 —  $COS$ , 7 —  $NH_3$ , 8 —  $SO_2$ , 9 —  $H_2CO$

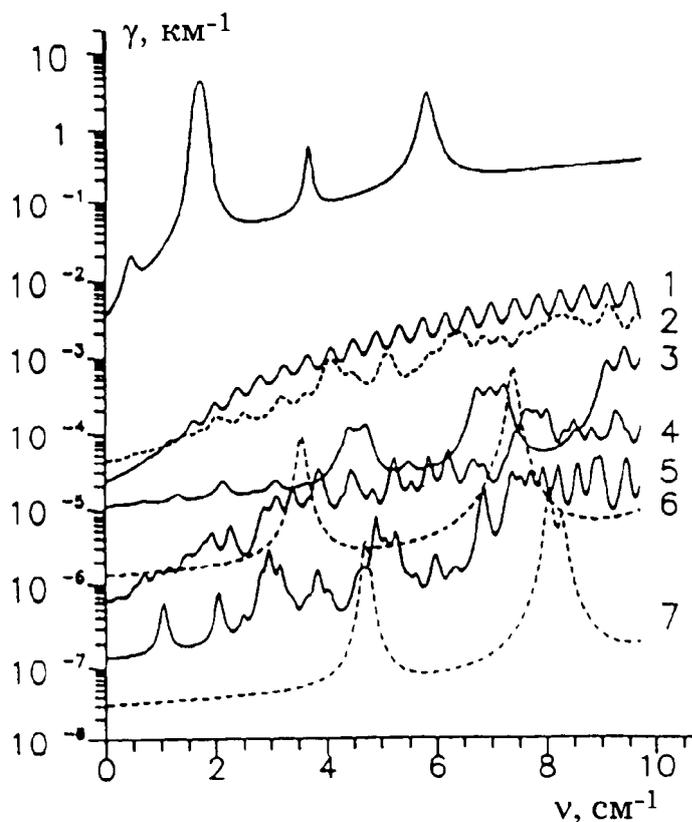


Рис. 2. Коэффициенты поглощения примесных компонент (1 —  $HNO_3$ , 2 —  $SO_2$ , 3 —  $H_2CO$ , 4 —  $O_3$ , 5 —  $NO_2$ , 6 —  $CO$ , 7 —  $NO$ ) при стандартных атмосферных условиях на уровне моря (давление  $P = 760$  мм рт. ст., температура  $T = 293$  К) и содержании, соответствующем ПДК. Верхняя кривая — суммарный коэффициент поглощения водяного пара и молекулярного кислорода

которые содержатся в табл. 1. Для исследования возможностей индикации фоновых концентраций примесей, кроме этих газов, рассматривался также озон. Исследования проводились на основе спектральных данных атласов GEISA [2] и HITRAN [3].

На рис. 2 приведены коэффициенты поглощения семи примесных компонент 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  $f$ , равных ПДК, а также значения коэффициентов поглощения чистой атмосферы, обусловленные водяным паром и молекулярным кислородом. Из рис. 2 видно, что у поверхности Земли при фоновых и даже предельно допустимых концентрациях МГС поглощение примесными газами меньше, чем поглощение основными атмосферными газами. Расчеты показывают, что на некоторых высотах  $H_i$  (для каждой МГС — своих) вклады примесей в ряде резонансных областей и основных атмосферных газов сравниваются, а на больших высотах ( $h > H_i$ ) вклад МГС становится и преобладающим. Так, значения  $H_i$  в оптимальных резонансных областях равняются 13 км для  $O_3$ , лежат в пределах от 16 до 19 км для  $N_2O$ ,  $HNO_3$ ,  $ClO$ ,  $HOCl$  и возрастают до 24–32 км для  $CO$ ,  $H_2O_2$ ,  $NO$ .

Оптимизация условий дистанционного зондирования МГС включает в себя определение рабочих частот и углов зондирования, при которых контрасты радиоярких температур  $\Delta T_b = T_b - T_{ab}$  становятся измеримыми и принимают наибольшие значения. Здесь  $T_b$  — яркостная температура атмосферы при наличии исследуемой газовой компоненты,  $T_{ab}$  — яркостная температура атмосферы при отсутствии МГС (температура фона). В табл. 1 приведены значения  $\Delta T_{ab}$  для ДЗ в зенитном направлении при относительной концентрации МГС  $f = 10^{-5}$  в летних условиях. При других малых концентрациях  $f$  и слоях загрязнения  $\Delta h$  оценки контрастов  $\Delta T_b$  могут быть получены при помощи линейной интерполяции табличных значений. Слой перемешивания загрязняющих примесей обычно изменяется в пределах  $\sim 200 \div 500$  м.

Современные СВЧ-радиометры позволяют регистрировать слабые сигналы на атмосферном фоне с радиояркими контрастами  $\sim 0,1$  К [1]. Приведенные результаты показывают возможности радиометрического метода для дистанционной индикации загрязнения аммиаком, сернистым ангидридом и сероводородом районов промышленных площадок и рабочих зон. В выбросах концентрация загрязняющих веществ может превышать ПДК в зависимости от высоты труб в  $10^3 \div 10^6$  раз и более. Радиояркие контрасты  $\Delta T_b$  при естественных фоновых концентрациях  $f_i$  МГС невелики:  $\Delta T_b \leq 0,1 - 0,3$  К, однако они возрастают при оптимальных углах ДЗ в несколько раз (особенно зимой) и, разумеется, увеличиваются при повышенных содержаниях МГС. Для озона контрасты  $\Delta T_b$  при фоновых средних концентрациях достигают  $\sim 10$  К, что широко используется в настоящее время в радиометрическом мониторинге  $O_3$ .

Результаты ДЗ аммиака в полосе  $\nu \sim 25$  ГГц и сернистого ангидрида ( $\nu \sim 131$  ГГц) в природных условиях в промышленных выбросах приведены в работах [4, 5]. Микроволновые измерения ( $\nu \sim 115$  и 230 ГГц) содержания окиси углерода в мезосфере были начаты в работе [6].

Расчетные величины приращения радиоярких температур  $\Delta T_b$  для случая зондирования с ИСЗ в надир (над гладкой водной поверхностью), как правило, также не превышают долей градуса ( $\sim 0,1 - 0,3$  К) для наиболее активных МГС ( $ClO$ ,  $N_2O$ ,  $HNO_3$ ,  $HOCl$ ) при их фоновых содержаниях. Исключение тоже составляет озон, для которого  $\Delta T_b \approx 4 \div 7$  К на частотах 195,43; 237,14 и 286,16 ГГц.

Таблица 2

Резонансные частоты  $\nu_{ij}$ , контрасты радиоярких температур  $\Delta T_b$  на прицельных высотах 20 и 30 км, высотные интервалы  $\Delta H$  зондирования МГС в лимбовом варианте для фоновых содержаний примесей

Газ	$\nu_{ij}$ , ГГц	$\Delta T_b$ ( $h_n = 20$ км), К	$\Delta T_b$ ( $h_n = 30$ км), К	$\Delta H$ , км
CO	230,69751	4,0	8,5	15 ÷ 42
HNO <sub>3</sub>	294,49719	17,4	5,0	15 ÷ 50
	256,83537	17,7	4,9	
HOCl	291,49083	9,8	2,5	15 ÷ 55
	195,63672	4,4	1,4	
N <sub>2</sub> O	276,51882	15,8	4,7	15 ÷ 40
	175,97736	3,6	2,4	
ClO	278,82293	4,2	1,8	15 ÷ 35
	204,48744	2,7	1,6	
O <sub>3</sub>	286,356	76,1	66,2	15 ÷ 75
	142,275	65,2	38,9	

Весьма перспективных результатов по контролю за содержанием МГС можно ожидать при лимбовом ДЗ атмосферы. Особенности этого спутникового метода ДЗ атмосферы подробно рассмотрены в работе [7]. В настоящей работе при численном моделировании космического эксперимента установлен набор газовых компонент (табл. 2), фоновые содержания которых обнаружимы в лимбовом варианте зондирования. В табл. 2 приведены результаты для полосы приема  $\delta\nu = 10$  МГц. Указанная величина  $\delta\nu$  составляет  $\sim 10\%$  от полуширины спектральных линий МГС на высоте  $h_1 = 20$  км и  $\sim 50\%$  на высоте  $h_2 = 30$  км. При этом значения радиоярких температур без учета МГС равняются  $\sim 8-15$  К для прицельного расстояния  $h_n = h_1$  и составляют доли градуса для  $h_n = h_2$ . В табл. 2 приведены максимальные и минимальные центральные частоты каналов зондирования в миллиметровом диапазоне волн, на которых выполняется условие  $\Delta T_b(h_n) \geq 1$  К. При улучшении спектрального разрешения до  $\delta\nu = 2$  МГц соответствующие приращения радиоярких температур для  $h_n = 30$  км увеличиваются в 1,2–2,4 ра-

за. Для окиси хлора такое приращение не превышает, однако, 0,2 К.

Другие газовые компоненты могут быть диагностированы при содержаниях, превышающих фоновые концентрации  $f_i$ . Так, приращения  $\Delta T_b$  ( $h_n = 20$  км) для окислов азота NO, NO<sub>2</sub> составляют  $\sim 2-3$  К на резонансных частотах диапазона  $250 \div 293$  ГГц при  $f \approx (20-25)f_i$  и  $\delta\nu = 10$  МГц. Соответствующие значения  $\Delta T_b$  для карбонила сульфида равняются  $\sim 3$  К в области  $280 \div 292$  ГГц при  $f \approx 2f_i$  и для сернистого ангидрида  $\sim 5,5$  К на частотах  $251 \div 284$  ГГц при  $f = 10f_i$ .

Следует отметить, что измеренные в работе [8] приращения радиоярких температур при спутниковом лимбовом зондировании окиси хлора на частоте 204,387 ГГц для прицельных высот  $h_n \approx 20 \div 30$  км оказались весьма близкими к нашим теоретическим результатам, полученным с учетом реализованных в эксперименте спектральных характеристик и чувствительности радиометров.

Результаты, приведенные в работе, свидетельст-

вуют о перспективности радиометрического мониторинга МГС в микроволновом диапазоне и целесообразности дальнейших исследований.

#### Литература

1. Маркина Н.Н., Наумов А.П., Троицкий А.В. // Радиотехн. и электроника. 1995. **40**, № 12. С. 1843.
2. Chedin A., Husson N., Scott N.A. et al. The «GEISA» Data Bank 1984 Version. Paris, France, 1986.
3. Rothman L.S., Gamache R.R., Goldman A. et al. // Appl. Opt. 1987. **26**, No. 19. P. 4058.
4. Струков И.А., Троицкий А.В. // Изв. вузов, Радиофизика. 1997. **40**, № 6. С. 702.
5. Наумов А.П., Плечков В.М., Борин В.П. и др. // Изв. вузов, Радиофизика. 1980. **23**, № 5. С. 632.
6. Kunzi K.F., Carlson E.R. // J. Geophys. Res. 1982. **87**, No. C9. P. 7235.
7. Гайкович К.П., Кутай Ш.Д., Наумов А.П. // Исследование Земли из космоса. 1991. № 3. С. 73.
8. Waters J.W. // Proc. IEEE. 1992. **80**, No. 11. P. 1679.