

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
И ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

УДК 551.521.32:546.224-81

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ
ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСОВ СЕРНИСТОГО АНГИДРИДА**

Н. Н. Маркина

В последние годы существенно возрос интерес к исследованиям содержания малых газовых примесей в атмосферах Земли и планет [1-4]. В земной атмосфере эти исследования тесно связаны с проблемами охраны окружающей среды от загрязнения. Задачи мониторинга газовых примесей решаются контактными и дистанционными методами. Среди последних успешно используются термическое зондирование атмосферы в ИК диапазоне [2] и лазерные методы [3]. Интерес представляет использование в аналогичных целях и теплового радиоизлучения атмосферы, поскольку применимость радиотеплокационных методов характеризуется достаточно широкими погодными условиями. В [3] в качестве примера рассмотрена возможность индикации повышенных содержаний аммиака вблизи промышленных предприятий по уярчению радиоизлучения атмосферы в области инверсионного резонанса NH_3 , центрированного к длине волны $\lambda = 1,25$ см.

Одним из наиболее распространенных загрязняющих веществ промышленного происхождения является двуокись серы (сернистый ангидрид), достаточное количество которой в атмосфере приводит к образованию и выпадению кислотных дождей, сопровождающихся негативными экологическими эффектами и неблагоприятными последствиями [7]. Исследования поглощающих свойств сернистого газа SO_2 и его влияния на характеристики радиоизлучения первоначально осуществлялись для атмосферы Венеры [8]. Теоретические исследования возможностей дистанционной индикации SO_2 по особенностям радиоизлучения земной атмосферы на резонансной частоте 53,53 ГГц (переход $2_{-2} \rightarrow 2_0$), расположенной на склоне спин-вращательной полосы поглощения O_2 , и результаты лабораторной проверки сделанных выводов изложены в [9]. Более полный расчет спектра поглощения SO_2 в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн с формой линии по Ван Флеку — Вайскоффу выполнен в [10]. В указанной работе проанализированы радиохарактеристики компонент, которые служат основой и катализаторами образования атмосферных кислот. При этом получено, что содержания сернистого ангидрида $f_{\text{SO}_2} \geq 6 \cdot 10^{-9}$ при его постоянстве во всей толще тропосферы могут быть обнаружены с помощью радиометрических измерений атмосферного излучения в зенит на частоте $\nu \sim 163$ ГГц при чувствительности приемной аппаратуры $\sim 0,02$ К.

В данной работе стояла другая задача. Она заключалась в теоретическом изучении возможностей индикации промышленного загрязнения земной атмосферы сернистым ангидридом и в установлении оптимальных (по спектру и углам) условий зондирования SO_2 . В задачах такого типа пространство загрязнения обычно моделируется в виде слоя конечной толщины Δh и протяженности l [1].

Формула для коэффициента поглощения радиоволн сернистым ангидридом с формой линии, полученной из решения кинетического уравнения, имеет вид

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{SO}_2} \left(\frac{\text{Hn}}{\text{км}} \right) &= 1,36 \cdot 10^6 \frac{P}{T} f_{\text{SO}_2} \frac{1}{\lambda^2} \frac{F_\nu(T)}{G(T)} \sum_{ij} \beta_{ij} \frac{1}{\lambda_{ij}} \times \\ &\times \left| e^{-2\pi\hbar c\nu_{ij}/kT} - e^{-2\pi\hbar c\nu_j/kT} \right| \frac{(\Delta\nu/c)_{ij}}{[(1/\lambda_{ij})^2 - (1/\lambda)^2]^2 + 4(\Delta\nu/c)_j^2 (1/\lambda)^2} \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) использованы стандартные обозначения квантовомеханических величин и универсальных постоянных [11]; атмосферное давление P выражено в мм рт. ст., T — абсолютная температура, f_{SO_2} — относительное объемное содержание молекул SO_2 , вращательная функция распределения $G(T) = 5,335 \cdot 10^8 \sigma^{-1} T^{3/2} (ABC)^{-1/2}$, A, B, C — вращательные константы в МГц, параметр симметрии $\sigma = 2$ для SO_2 . Основной вклад в функцию распределения F_ν по колебательным состояниям вносит частота колебаний $\omega_2 = 519 \text{ см}^{-1}$ (ω_1 и $\omega_3 > 1000 \text{ см}^{-1}$): при температуре $T = 288 \text{ К}$ $F_\nu = 0,921$.

Результаты расчетов γ_{SO_2} по формуле (1) для летних и зимних условий года в центральной части ЕТ СССР приведены на рис. 1. В расчетах использовались па-

параметры спектральных линий SO_2 по данным работы [12] с учетом энергетических состояний с квантовыми числами $J < 50$ и резонансными частотами $\nu_{ij} \approx 200$ ГГц. Сравнение расчетов γ_{SO_2} по разным формулам показывает, что превышение значений, полученных с формой линии по кинетическому уравнению, над величинами с формой линии Ван Флека — Вайскопфа уменьшается от $\sim 2,5$ раз в длинноволновой области спектра ($\nu \approx 1$ ГГц) до 1,3 раза при $\nu \sim 5$ ГГц и становится равным $\sim 1,1$ при $\nu \sim 7$ ГГц. Результаты вычислений γ_{SO_2} в области $\nu \geq 10$ ГГц с разными формами линий практически не различаются между собой из-за особенностей спектра SO_2 , связанных с большим количеством (около 200) близко расположенных спектральных линий.

Из рисунка видно, что существуют спектральные области, в которых поглощение сернистого ангидрида при содержаниях, близких к предельно допустимым концентрациям в рабочей зоне [13], сравнимо с поглощением основных компонент атмосферы (особенно в зимних условиях). Данные рисунка позволяют выбрать предпочтительные спектральные области для дистанционной индикации SO_2 в атмосфере: $82 \div 86$, $103 \div 106$, $125 \div 137$, $140 \div 145$, $158 \div 163$ ГГц.

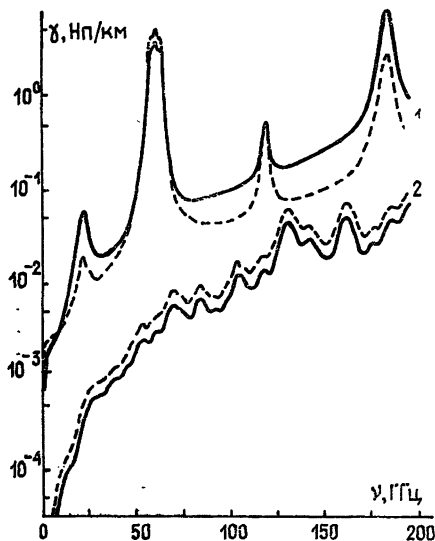


Рис. 1. Сравнение коэффициентов поглощения основных газовых компонент атмосферы H_2O , O_2 (кривые 1) и сернистого ангидрида при $f_{\text{SO}_2} = 10^{-5}$ (кривые 2) вблизи поверхности Земли. Сплошные кривые — лето, пунктир — зима.

Выполненные расчеты разности $\Delta T_{\text{я}}$ яркостных температур загрязненной и чистой атмосферы показали, что в указанных спектральных областях, кроме $\nu \sim 84$ ГГц, величины $\Delta T_{\text{я}}$ даже в летних условиях превышают 1 К. На рис. 2 представлены уярчения $\Delta T_{\text{я}}$ на частотах $\nu \approx 125 \div 170$ ГГц при зенитных углах $\theta = 0 \div 75^\circ$ при f_{SO_2} , равной ПДК рабочей зоны. Расчеты выполнены для протяженного горизонтального слоя загрязнения толщиной $\Delta h = 100$ м, расположенного выше 100 м. Видно, что в этом случае величины $\Delta T_{\text{я}}$ достигают значений $\sim 2,6 \div 2,8$ К в области $\nu \sim 131$ ГГц на углах $\theta \approx 60 \div 75^\circ$. Указанные уярчения вполне регистрируются современными радиометрами. В зимних условиях значения $\Delta T_{\text{я}}$ увеличиваются до $\sim 5,8 \div 6,6$ К, при этом оптимальные углы наблюдения возрастают до $\theta \approx 70 \div 80^\circ$ в соответствии с условием $\cos \theta_{\text{опт}} \approx \tau_{\text{ф}}$ [14], где $\tau_{\text{ф}}$ — оптическая толщина фона (ясной атмосферы).

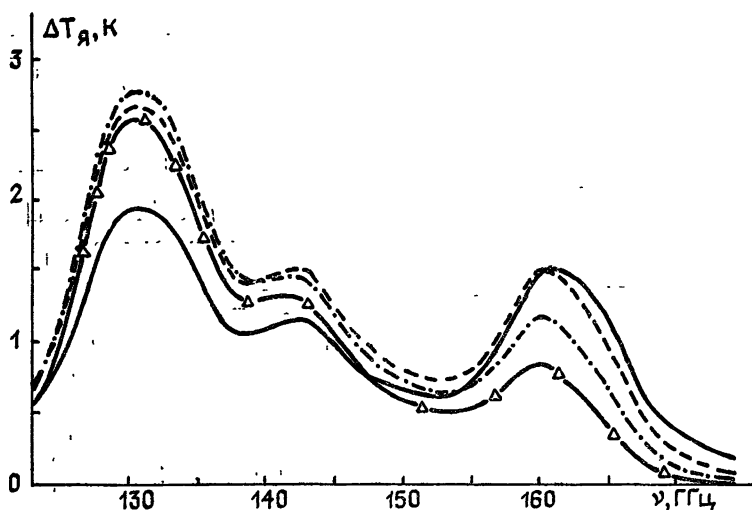


Рис. 2. Величины уярчения $\Delta T_{\text{я}}$ радиоизлучения земной атмосферы в области $\nu = 125 \div 170$ ГГц из-за присутствия сернистого ангидрида ($f_{\text{SO}_2} = 4 \cdot 10^{-6}$) в летних условиях в слое толщиной 100 м на высотах $h \geq 100$ м: сплошная кривая — $\theta = 0^\circ$, пунктир — $\theta = 60^\circ$, штрихпунктир — $\theta = 70^\circ$, треугольники — $\theta = 75^\circ$.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности эффективного использования радиометрического зондирования атмосферы вблизи резонансов SO_2 в выбранных спектральных областях и особенно при $\nu \sim 131$ ГГц для индикации повышенных содержаний сернистого ангидрида.

Автор признателен А. П. Наумову за постоянное внимание к настоящей работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Я. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоздат, 1975.
2. Кароль И. Л., Розанов В. В., Тимофеев Ю. М. Газовые примеси в атмосфере. — Л.: Гидрометеоздат, 1983.
3. Мухин Л. М., Гельман Б. Г., Ламонов Н. И., Мельников В. В., Ненароков Д. Ф., Охотников Б. П., Ротин В. А., Хохлов В. Н. — Космические исследования, 1983, 21, № 2, с. 225.
4. Lellouch E., Epcrenaz T., Combes M. — Astron. Astrophys., 1984, 140, № 2, p. 405.
5. Зуев В. Е. — Сб. пленарных докладов 1-й Всесоюзной конференции по анализу неорганических газов. — Л.: Гидрометеоздат, 1984, с. 77.
6. Наумов А. П., Плечков В. М., Борин В. П., Зиничева М. Б., Порфирьев В. А., Фокин В. Н. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 5, с. 632.
7. Израэль Ю. А., Назаров И. М., Прессман А. Я., Ровинский Ф. Я., Рябошапка А. Г., Филиппова Л. М. Кислотные дожди. — Л.: Гидрометеоздат, 1983.
8. Janssen M. A., Poynter R. L. — Icarus, 1981, 46, № 1, p. 51.
9. Hidaka T. — Proc. IEEE, 1977, 65, № 7, p. 1095.
10. Steffes P. G. — Intern. Geosci. and Remote Sens. Symp. (IGARSS'83), Digest.— New York: 1983, 2, p. 31.
11. Жевакин С. А., Наумов А. П. — Изв. вузов — Радиофизика, 1963, 6, № 4, с. 674.
12. Kolbe W. F., Leskovar B., Buscher H. — J. Mol. Spectr., 1976, 59, № 1, p. 86.
13. Артемова М. Е., Бондарев А. А., Карпов В. И. и др. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. — М.: Атомиздат, 1980.
14. Зинченко И. И., Кисляков А. Г. — Изв. АН СССР. Сер. Физика атмосферы и океана, 1974, 10, № 2, с. 1275.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
2 января 1986 г.

УДК 621.375.82

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО ОПОРНОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОБЪЕКТОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ ЧЕРЕЗ ТУРБУЛЕНТНУЮ АТМОСФЕРУ

Р. Р. Вильданов, В. Н. Курашов, А. Т. Мирзаев, А. Н. Якубов

Ограничения, возникающие при голографической регистрации излучения удаленных объектов в турбулентной атмосфере, в значительной мере устраняются при использовании интерферометрических методов формирования изображений [1]. Однако обычные схемы, основанные на этом принципе, пригодны лишь для пространственно-некогерентных объектов, что существенно снижает возможности интерферометрических методов в оптическом диапазоне из-за высокого уровня квантовых шумов и низкой чувствительности приемников. Значительное улучшение чувствительности достигается при активной лазерной подсветке изображаемых объектов, но в этом случае требование компенсации фазовых искажений приводит к уменьшению эффективного поля зрения до величины порядка радиуса корреляции турбулентности. В работе [2] было показано, что применение некогерентного опорного источника в сочетании с методом интерферометрии интенсивностей позволяет устранить эти ограничения, сохраняя практически все преимущества традиционной голографической схемы равных искажений объектной и опорной волн.

В настоящем сообщении приводятся результаты экспериментальных исследований изображающей системы такого типа, выполненных в реальных условиях на трассе длиной 1000 м в предгорьях Тянь-Шаня на высоте 1500 м над уровнем моря.

Функциональная схема измерений приведена на рис. 1. Излучение одномодового He-Ne лазера ($\lambda = 0,63$ мкм) расщеплялось на два пучка, первый из которых расширялся телескопической системой L_1, L_2 и использовался для освещения объекта S . Второй луч фокусировался линзой L_3 в плоскость объекта, создавая точечный опор-