

К. П. ГАЙКОВИЧ, Ш. Д. КИТАЙ, А. П. НАУМОВ

**ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ВЫСОТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ОЗОНА
И ДРУГИХ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ
ПО ЛИМБОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ СО СПУТНИКОВ
В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ**

Выполнен анализ характеристик радиоизлучения атмосферы и ее малых газовых компонент при лимбовом зондировании с ИСЗ вблизи резонансных частот, приходящихся на миллиметровый диапазон волн. Решены обратные задачи лимбового зондирования высотных распределений озона и окиси углерода. Показано, что при измерениях с погрешностью 0,5 К точность восстановления составляет 2-5%. Сформулированы требования к основным параметрам бортовой приемной аппаратуры.

Введение. В последние годы большое внимание уделяется проблемам мониторинга высотных распределений малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, включая озон, в связи с возрастанием влияния антропогенных факторов на окружающую среду. Перспективы дистанционного зондирования (ДЗ) примесных компонент атмосферы (O_3 , CO , N_2O , NO_2) на наклонных трассах с ИСЗ в оптическом и субмиллиметровом диапазонах (длины волн 0,25—1 мкм; 0,29, 0,5, 0,87, 1,2 мм) рассматривались в работах [1, 2]. Восстановление вертикального распределения озона до высот ~ 30 км из фотографических наблюдений Солнца с орбитальной станции «Салют-7» осуществлено в [3]. В серии работ [4—6] приведены результаты измерений стратосферного излучения в области $\sim 0,1$ —1,4 мм с разрешением ~ 100 МГц, выполненных с баллонов на высоте 38,2 км на трассах, близких к горизонтальным. В указанных работах идентифицированы спектральные линии большого количества МГС (H_2O , O_3 , HF , HCl , HCN , HNO , N_2O , NO , NO_2 , CO и т. д.).

Весьма перспективными методами ДЗ примесных компонент являются лимбовые наблюдения с ИСЗ в радиодиапазоне, которые обеспечивают высокое разрешение по вертикали (~ 1 —2 км), большой диапазон ДЗ по высоте (~ 20 —80 км), индикацию сравнительно малых относительных содержаний исследуемых примесей ($\sim 10^{-9}$ — 10^{-7}). Преимущества соответствующих измерений в радиодиапазоне — пренебрежимо малое влияние аэрозолей и выполнимость условия локального термодинамического равновесия во всем информативном интервале высот.

Требования к разрешающей способности и чувствительности радиометрической аппаратуры для решения атмосферных задач лимбового зондирования в хаотических областях субмиллиметрового диапазона сформулированы в [7]. Обзор результатов лимбового зондирования с борта самолета и с баллонов в миллиметровом диапазоне волн содержится в монографии [8]. В работах [9, 10] экспериментально получены радиохарактеристики излучения лимба в линии H_2O ($\lambda, \sim 1,64$ мм; угол наклона

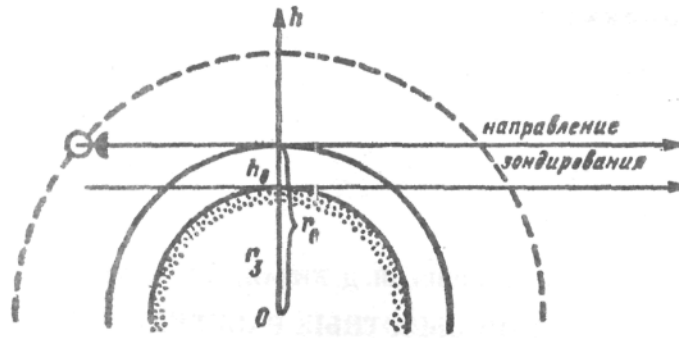


Рис. 1. Геометрия лимбового зондирования атмосферы: r_3 — радиус Земли, h_0 — прицельная высота, $r_0 = r_3 + h_0$

трассы $\sim 20^\circ$) и в линиях ClO , H_2O_2 , O_3 (вблизи $\lambda \sim 1,5$ мм; углы $\sim 1,5$ — $4,5^\circ$ ниже горизонта). В [10] методом наименьших квадратов восстановлены профили озона на высотах ~ 15 — 40 км.

Постановка обратной задачи лимбового зондирования. Методика обращения. Из геометрии лимбового зондирования (рис. 1) следует исходное уравнение, связывающее радиояркую температуру T_π атмосферы с прицельным расстоянием r_0 и удельным содержанием исследуемой ком-

$$T_\pi(r_0) = \int_{r_0}^{\infty} T(r) \gamma(r) e^{-\int_r^{\infty} \gamma(r') \frac{dr'}{\sqrt{1-(r_0/r')^2}}} \left[1 + e^{-2 \int_{r_0}^r \gamma(r') \frac{dr'}{\sqrt{1-(r_0/r')^2}}} \right] \frac{dr}{\sqrt{1-(r_0/r)^2}} \quad (1)$$

Уравнение (1) представляет собой нелинейное уравнение Вольтерра 1-го рода; $T(r)$ — профиль температуры, γ — коэффициент поглощения.

Лимбовые измерения целесообразно осуществлять на резонансных частотах исследуемых газов, на которых метод обладает повышенной чувствительностью к малым содержаниям газовых примесей [11]. В достаточно протяженном слое атмосферы, где ширины спектральных линий определяются молекулярными соударениями, коэффициенты поглощения МГС пропорциональны относительным концентрациям компонент [12]¹:

$$\gamma = uF(P, T). \quad (2)$$

Приведем соотношения между ширинами линий, обусловленными эффектом Доплера ($\Delta\nu_D$) и молекулярными соударениями ($\Delta\nu_c$) для озона в окиси углерода на высотах $h \cong 60$ — 80 км:

h, км	$\left(\frac{\Delta\nu_D}{\Delta\nu_c}\right)_{\text{O}_2}$	$\left(\frac{\Delta\nu_D}{\Delta\nu_c}\right)_{\text{CO}}$
0	0,12	0,17
70	0,41	0,52
80	1,8	2,1

При оценках величин $\Delta\nu_c$ использовались данные [13-17], а оценки доплеровских ширин выполнялись по формуле (13.2) монографии [18]. Видно, что молекулярные соударения определяют уширение спектральных

¹В соотношении (2) пренебрегается самоуширением спектральных линий, влияющие которого на поглощение примесными газами и на радиоизлучение атмосферы в их резонансных областях меньше погрешностей радиометрических измерений.

Квантовомеханические характеристики исследованных газовых компонент

Газ	Тип молекулы	Дипольный момент, D	Исследованные квантовые переходы	Резонансные частоты, ГГц
CO	Линейная	0,112	j=1→0	115,2712
N ₂ O	»	0,166	i=2→1	230,5379
			j=10→9	251,2113
O ₃	Асимметричный волчок	0,53373	i=11→10	276,3275
			i=12→11	301,4423
			18 _{2,16} →17 _{3,15}	37,8324
			12 _{1,11} →11 _{2,10}	76,5337
			4 _{1,3} →4 _{0,4}	101,7367
CH ₃ CCl ₃	Симметричный волчок	1,755	10 _{1,9} →10 _{0,10}	142,1751
			j=8→7	37,9556
CFCl ₃	То же	0,46	i=4→3	19,7251
			i=5→4	24,6572
			i=6→5	29,5889
			i=7→6	34,5204

линий O₃ и CO на высотах $h \leq 65$ км. Уширение линий на высотах $h \approx 65-85$ км, обусловленное совместным воздействием соударений и эффекта Доплера, учитывалось в данной работе по методике [19].

В соответствии с изложенным соотношение (1) принимает вид

$$T_{\pi}(r_0) = \int_{r_0}^{\infty} u(r) K(r, r_0, u) dr. \quad (3)$$

Нелинейное интегральное уравнение (3) уже нельзя решить путем функциональных преобразований аналогично [12]. Поэтому для решения (3) в работе использовался итерационный метод, основанный на принципе сжатых отображений [20], для которого на i -м шаге решалась линейная задача

$$T_{\pi}(r_0) - T_{\pi_{i-1}}(r_0) = \int_{r_0}^{\infty} (u_i - u_{i-1}) K(r, r_0, u_{i-1}) dr, \quad (4)$$

где начальное приближение u_0 — произвольная функция. Уравнение (4) решается аналогично [12] путем обратного преобразования Абеля. Процесс решения завершается при выполнении условия $T_{\pi} - T_{\pi i} < \delta T_{\pi}$, где δT_{π} — погрешность радиометрических измерений яркостей температуры T_{π} .

Принцип сжатых отображений предполагает, что вполне непрерывный оператор (3) отображает замкнутое выпуклое множество банахова пространства на свою часть [20]. Для весьма сложного ядра (3), имеющего слабую особенность, трудно теоретически обосновать выполнение сформулированного условия, поэтому обоснованность (4) установлена в работе для конкретных случаев путем численных экспериментов на широком наборе профилей $u(z)$, перекрывающем класс профилей, реализующихся в атмосфере.

Рассматриваемый метод целесообразно использовать для ДЗ газовых компонент, обладающих достаточно сильными и информативными (опти-

ческие толщины $\tau = 2 \int_{r_0}^{\infty} \gamma(r) \frac{dr}{\sqrt{1 - (r_0/r)^2}} < 1$) линиями поглощения. Значе-

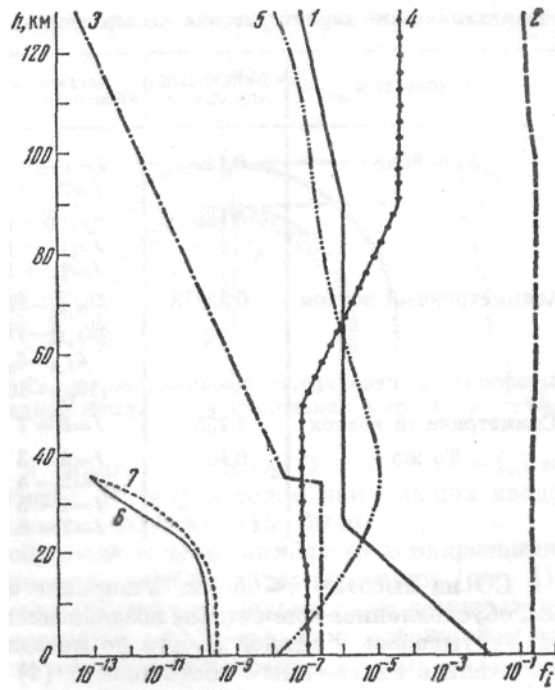


Рис. 2

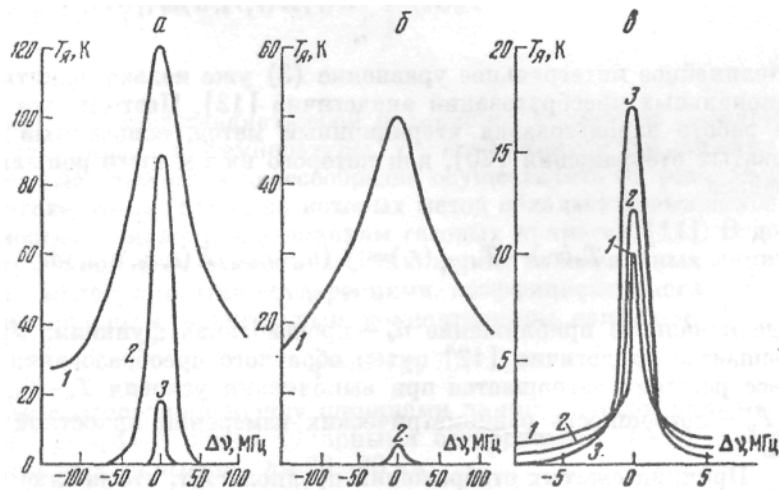


Рис. 3

Рис. 2. Относительные содержания газовых компонент атмосферы:

1 - H_2O , 2 - O_2 , 3 - N_2O , 4 - CO , 5 - O_3 , 6 - $CFC1_3$, 7 - CH_3CCl_3

Рис. 3. Значения радиояростных температур атмосферы в зависимости от расстройки частоты $\Delta\nu = \nu - \nu_0$ вблизи резонансов: а - озона $4_{1,3} \rightarrow 4_{0,4}$ ($\nu_0 = 101,7367$ ГГц); б - закиси азота $J=10 \rightarrow 9$ ($\nu_0 = 251,2113$ ГГц); в - окиси углерода $J=1 \rightarrow 0$ ($\nu_0 = 115,2712$ ГГц) при лимбовых измерениях с прицельными высотами $h_0 = 20$ (1), 40 (2), 60 км (3)

ния оптических толщин по лучу зрения определяются как параметрами спектральных линий, так и концентрацией газов. Поэтому математической постановке обратных задач предшествует выбор газовых компонент и оптимальных спектральных областей ДЗ. Ниже рассмотрены задачи по определению содержания газов, обладающих наибольшей концентрацией (O_3 , CO , N_2O), а также наиболее распространенных галогеноуглеводородов — $CFCl_3$ (фреон-11) и CH_3CCl_3 (метилхлороформ). Параметры наиболее интенсивных линий этих компонент представлены в таблице, а модели высотных профилей их относительного содержания (по числу частиц), согласно литературным данным,— на рис. 2. В работе рассматривались и некоторые другие высотные распределения МГС². Коэффициенты поглощения CO , N_2O и O_3 вычислялись по формулам, приведенным в [22, 23]. Расчетные формулы для коэффициентов поглощения CH_3CCl_3 , $CFC1_3$ были получены в работе из общих соотношений [18] с учетом структуры рассматриваемых молекул для формы спектральной линии из решения кинетического уравнения.

Спектры яркостных температур атмосферы вблизи характерных длинноволновых резонансов O_3 , CO , N_2O для различных прицельных высот лимбового зондирования приведены на рис. 3. Эти спектры соответствуют модельным распределениям рис. 2 и отражают особенности их высотного хода. Так, содержание CO в рассмотренном интервале высот не убывает и, соответственно, спектральные контрасты $T_{\text{я}}$ даже на прицельных высотах $h_0 \geq 60$ км еще весьма велики. В то же время контрасты яркостных температур в линии закиси азота, концентрация которой резко убывает с высотой, уже при $h_0 \sim 40$ км не превышают единиц градусов. Минимально обнаружимые содержания перечисленных компонент, которые определяются из условия измеримости спектральных контрастов яркостных температур, близки к значениям, указанным во введении.

Расчеты показали, что при существующем среднем уровне концентрации галогеноуглеводородов излучение в их миллиметровых линиях является слишком слабым и не может быть зарегистрировано, по крайней мере, на данном этапе. Однако их дистанционная индикация может быть осуществлена в случае выбросов, в которых концентрация фреонов возрастает более чем на 3—4 порядка.

Следует отметить, что сведения о вариациях примесных компонент в стратосфере и в мезосфере являются в настоящее время далеко не полными. Несколько более подробные сведения имеются лишь о среднеквадратичных отклонениях содержания озона на высотах $h < 74$ км [21]. Из уравнения (3) видно, что в первом приближении вариации яркостных температур атмосферы $\delta T_{\text{я}}(r_0)$ в резонансных областях наблюдаемых линий непосредственно определяются вариациями удельного содержания исследуемой компоненты МГС $\delta u_i(r_0)$ и практически не зависят от вариаций других газовых составляющих. Оценки показали, что при изменениях содержания озона в пределах среднеквадратичных вариаций [25] вариации яркостных температур в случае лимбового зондирования составляют ~ 10 К на прицельных высотах $h_0 \sim 20$ —45 км и уменьшаются до ~ 7 —2 К на высотах $A_0 \sim 50$ —70 км. Условие $\delta T_{\text{я}}(r_0) > \delta T_{\text{г}}$ определяет чувствительность рассматриваемого метода ДЗ.

Результаты восстановления высотных профилей O_3 и CO . Численные эксперименты по восстановлению вертикальных распределений газовых компонент из лимбовых измерений с ИСЗ $T_{\text{я}}(r_0)$ в резонансных областях линий, спектральные контрасты для которых представлены на рис. 3, выполнялись по замкнутой схеме: для заданных профилей рассчитывались

² Распределения $f_{O_3}(h)$, $u_{O_3}(h)$, представленные на рис. 2, 4, весьма близки к высотному распределению озона по модели [21].

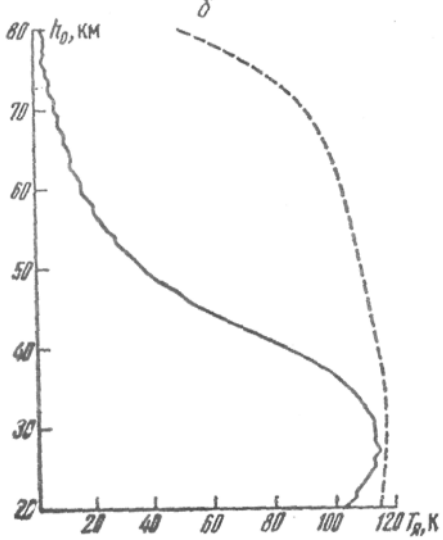
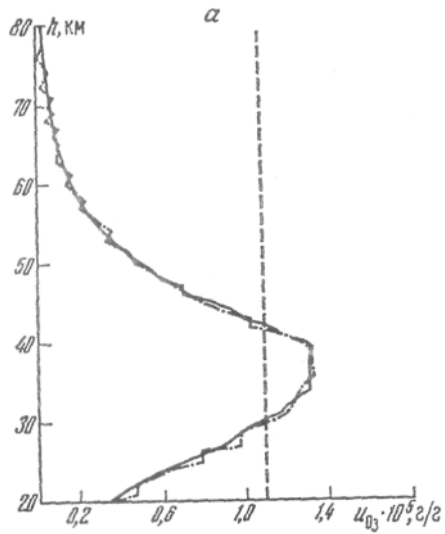


Рис. 4

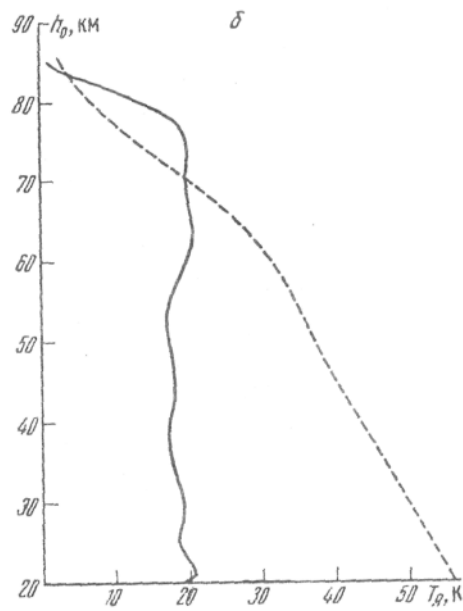
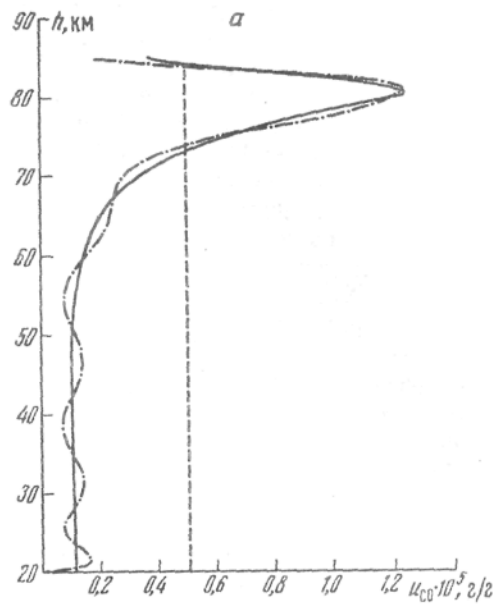


Рис. 5

Рис. 4. Численный эксперимент по восстановлению профиля O_3 (а, сплошная кривая) по измерениям $T_{я}$ в зависимости от прицельной высоты h_0 (б, сплошная кривая) при $\delta T_p = 0,5$ К. Пунктир на рис. а - начальное приближение, которому соответствует распределение $T_{я}$, представленное пунктиром на рис. б, Штрих-пунктир на рис. а - восстановленный профиль O_3 .

Рис. 5. Численный эксперимент по восстановлению профиля CO . Обозначения см. на рис. 4.

соответствующие зависимости $T_{\text{я}}(r_0)$; с помощью датчика случайных чисел на них набрасывалась погрешность с заданной дисперсией $\delta T_{\text{р}}$; смоделированные таким образом данные измерений использовались далее для восстановления профиля газовых компонент на основе алгоритма (4). Точность решения обратной задачи оценивалась путем сопоставления восстановленных профилей с исходными при различном уровне погрешности $\delta T_{\text{р}}$. На рис. 4 приведены примеры восстановления высотных профилей O_3 и CO .

На основе численных экспериментов установлено:

1. Итерационный процесс (4) сходится к точному решению с ошибкой, пропорциональной относительной погрешности измерений $\delta T_{\text{р}}/T_{\text{я}}$ при любом выборе начального приближения $u_0(r)$, в том числе и $u_0(r)=\text{const}$ (см. рис. 4). При $\delta T_{\text{р}} \sim 0,5$ К число итераций составляет 3—10.

2. Точность восстановления при $\delta T_{\text{р}} = 0,5$ К составляет 2—5% и падает лишь на высотах, где величина $T_{\text{я}}$ уменьшается до уровня, сравнимого с погрешностью радиометрических измерений.

3. При ДЗ закиси азота радиояркая температура резко убывает с ростом h из-за быстрого убывания относительного содержания N_2O , поэтому интервал восстановления ограничен высотой $h \sim 40$ км.

Озоновый слой имеет четко выраженный максимум, и восстановление O_3 возможно до высот ~ 70 —80 км.

Удельное содержание CO является значительным в широком высотном интервале, и яркостная температура начинает убывать лишь при $h > 70$ км, где уширение линии в значительной степени определяется эффектом Доплера. Вследствие этого падение абсолютного содержания CO (пропорциональное давлению) уже не компенсируется ростом интенсивности линии, как на более низких высотах, где уширение определяется соударениями и форм-фактор линии в резонансе обратно пропорционален давлению. Таким образом, для CO значения $T_{\text{я}}$ убывают до уровня $\delta T_{\text{р}}$ на высотах ~ 90 км.

4. Рассмотренная в общем виде задача, как и задача, сведенная к уравнению Абеля в [12], является слабо некорректной: регуляризация достигается путем сглаживания полиномами распределений $T_{\text{я}}(r_0)$ с точностью до $\delta T_{\text{р}}$. Более строгий подход возможен на основе методов [24].

Высотное разрешение ДЛ лимбового зондирования связано с размером апертуры D , обеспечивающей необходимую ширину диаграммы направленности радиометрических измерений, с высотой орбиты спутника H , радиусом Земли r_3 и длиной волны λ ДЗ выражением:

$$\Delta h \simeq \frac{\lambda}{D} \sqrt{(r_3 + H)^2 - (r_3 + h_0)^2}, \quad (3)$$

которое следует из основных соотношений для параметров антенн и геометрии зондирования. При $H \approx 350$ км, $\lambda = 3$ мм высотное разрешение ~ 1 —3 км достигается при апертуре ~ 6 —2 м.

Спектральное разрешение радиометрической аппаратуры лимбового зондирования $\delta \nu \sim 0,1(\Delta \nu)_{\text{min}}$, где $(\Delta \nu)_{\text{min}}$ — полуширина исследуемой линии на максимальной высоте ДЗ, должно составлять, как следует из определения информативного интервала высот ДЗ в данной работе, ~ 15 —20 кГц. Близкое спектральное разрешение в миллиметровом диапазоне волн уже достигнуто на современном этапе (см. [25]).

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования радиометрических методов для дистанционного глобального контроля содержания озона и других МГС атмосферы с ИСЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев Ю. М., Розанов В. В. О возможностях определения профилей СО и N₂O по измерениям на наклонных трассах в микроволновом диапазоне волн // *Метеорология и гидрология*. 1979. № 12. С. 40—48.
2. Тимофеев Ю. М., Розанов В. В., Поберовский А. В., Поляков А. В. Многоспектральный метод определения вертикальных профилей содержания Оз, NO₂ и аэрозольного ослабления радиации в атмосфере // *Метеорология и гидрология*. 1986. № 8. С. 66-73.
3. Гречко Г. М., Гурвич А. С., Еланский Н. Ф. и др. Фотографические наблюдения вертикального распределения озона в стратосфере с орбитальной станции «Салют-7» // *Докл. АН СССР*. 1988. Т. 301. № 2. С. 306-309.
4. Carli B. The high resolution submillimetre spectrum of the stratosphere // *Quant. Spectrosc. Radial. Transfer*. 1984. V. 32. № 5/6. P. 397-405.
5. Baldecchi M. G., Carli B., Mencaraglia F. et al. Atlas of stratospheric submillimeter lines: 1. The 7-20 cm⁻¹ interval // *Geoph. Res.* 1984. V. 89. № D7. P. 11689-11704.
6. Baldecchi M. G., Carli B., Mencaraglia F. et al. Atlas of stratospheric submillimeter lines: 2. The 20- to 40-cm⁻¹ interval // *Geoph. Res.* 1988. V. 93. № D5. P. 5303-5318.
7. Кропоткина Е. П., Соломонов С. В. Спектры субмиллиметрового излучения атмосферы Земли: Препринт № 37. М.: ФИАН СССР, 1986. 46 с.
8. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. V. III. Dedham: Artech., 1986. P. 1379-1389.
9. Waters J. W., Gustinic J. J., Swanson P. N., Kerr A. R. Measurements of upper atmospheric H₂O emission at 183 GHz // *Atmospheric water vapor*. N. Y.: Acad. Press 1980 P. 229—239
10. Waters J. W., Hardy J. C., Iarnot R. F., Pickett H. M. Chlorine Monoxide Radical, Ozone and Hydrogen Peroxide: Stratospheric Measurements by Microwave Limb Sounding // *Science*. 1981. V. 214. № 4516. P. 61-64.
11. Гайкович К. П., Кутай Ш. Д., Наумов А. П. Об определении высотных распределений озона и других малых газовых составляющих атмосферы по лимбовым измерениям со спутников в СВЧ-диапазоне // Всесоюз. конф. по атмосферному озону: Тез. докл. Долгопрудный: ЦАО, 1988. С. 64.
12. Гайкович К. П., Кутай Ш. Д. О возможности определения влагосодержания верхних слоев атмосферы радиометрическим методом // *Исслед. Земли из космоса*. 1982. № 5. С. 54-58.
13. Monnanteuil N., Colmont J. M. Self-broadening in the millimeter-wave spectrum of ozone // *Quant. Spectr. Radial. Transfer*. 1983. V. 29. № 2. P. 131-136.
14. Colmont J. M., Monnanteuil N. Measurements of N₂-, O₂- and Air-broadened line-widths of ozone in the millimeter region: temperature dependence of the line-widths // *Molec. Spectroscopy*. 1984. V. 104. № 1. P. 122-128.
15. Gamache R. R. Temperature dependence of N₂-broadened halfwidths of ozone // *Molec. Spectroscopy*. 1985. V. 114. № 1. P. 31-41.
16. Colmont J. M., Monnanteuil N. Self, Nitrogen and Oxygen broadening of the 115-GHz line of carbon monoxide // *Quant. Spectr. Radial. Transfer*. 1986. V. 35. № 2. P. 81-85.
17. U. S. Standard Atmosphere Supplement. 1966.
18. Таунс Ч., Шавлов А. *Радиоспектроскопия*. М.: Изд-во иностр. лит. 1959. 756 с.
19. Longbothum R. L. A study of water vapor measurement in the stratosphere and mesosphere using microwave techniques. Pennsylvania State Univ., 1976. 496 p.
20. Краснов М. Л. *Интегральные уравнения*. М.: Наука, 1975. 304 с.
21. Kruger A. J., Mmzher R. A. A mid-latitude ozone model for the 1976 U. S. Standard Atmosphere // *J. Geoph. Res.* 1976. V. 81. № 24. P. 4477-4481.
22. Наумов А. П. О поглощении радиоволн в земной атмосфере примесными газами // *Изв. вузов. Радиофизика*. 1972. Т. 15. № 5. С. 682-694.
23. Куликов Ю. Ю., Маркина Н. Н., Наумов А. П. и др. Восстановление высотного распределения озона из наземных измерений интегрального поглощения в миллиметровом диапазоне волн // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1988. Т. 24 № 12. С. 1282-1292.
24. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. *Методы решения некорректных задач*. М.: Наука, 1979. 288 с.
25. Kunzi K. F., Carlson E. R. Atmospheric CO volume mixing ratio profiles determined from ground-based measurements of the $\nu=1-0$ and $\nu=2-1$ emission lines // *Geoph. Res.* 1982. V. 87. № C9. P. 7235-7241.

Горьковский научно-исследовательский
радиофизический институт

Материал поступил в редакцию
31.03.89

K. P. GAIKOVICH, Sh. D. KITAI, A. P. NAUMOV

**DETERMINATION OF HEIGHT DISTRIBUTIONS OF OZONE AND OTHER
MINOR ATMOSPHERIC COMPONENTS FROM SATELLITE LIMB
MEASUREMENTS IN THE MICROWAVE RANGE**

Research Institute of Radio Physics, Gor'kii

Radio emission characteristics of the atmosphere and its minor gaseous components are analyzed which were measured aboard the satellite using the limb sounding near resonance mm-frequencies. Inverse problems are solved for the limb sounding of ozone and carbon oxide height distributions. It is shown that within the 0.5 K measurement error the retrieval accuracy is 2 to 5 percent. Requirements to the main parameters of the on-board receiving system are given.