

УДК 621.371.246

КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ В СПИН-ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ЛИНИЯХ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРЕ В ГЕОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

B. B. Демин

Рассчитан коэффициент поглощения в трех микроволновых линиях кислорода на высотах 40—90 км. Исследовано влияние эффекта Зеемана в геомагнитном поле на контур поглощения в резонансе.

В последние годы проявляется заметный интерес к проблеме измерений тепловой эмиссии атмосферного молекулярного кислорода на миллиметровых волнах с целью определения температурного профиля земной атмосферы в глобальном масштабе.

В настоящей работе рассчитывался коэффициент поглощения в трех вращательных линиях кислорода с учетом зеемановского расщепления в геомагнитном поле. Расчеты проводились для шести фиксированных высот, начиная от 40 км и с интервалом 10 км.

Рассматривались линии с вращательными квантовыми числами K , равными 1, 5, 21, возникающие при переходах типа $J = K + J \rightarrow K - 1$, где J —квантовое число полного момента количества движения молекулы кислорода. Резонансные частоты этих линий, выраженные в Ггц, равны [1] $\nu_{1-} = 118,7505$; $\nu_{5-} = 60,3061$; $\nu_{21-} = 54,6728$. Коэффициент поглощения вблизи резонанса рассчитывался по известному выражению [1]

$$\gamma = 8,4013PT^{-3}\nu_{k-}^2\mu_{k-}^2 f(\nu, \nu_{k-}) \exp[-2,068K(K+1)/T] (\text{дБ} \cdot \text{км}^{-1}), \quad (1)$$

где $\mu_{k-}^2 = (K+1)(2K-1)/K$. Значения давлений P (мм рт. ст.) и температуры T ($^{\circ}$ К) брались для соответствующих высот из [2]. Так как расчеты проводились в области резонанса, то можно было пренебречь нерезонансным поглощением. В качестве формы линии при этом использовался профиль [3], учитывающий допплеровское уширение линии и уширение, обусловленное давлением:

$$f(\nu, \nu_{k-}) = \frac{1}{V\pi \Delta\nu_D'} \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp(-y^2) dy}{a^2 + (v-y)^2}, \quad (2)$$

$$a = \frac{\Delta\nu_c}{\Delta\nu_D'}, \quad y = \frac{\nu' - \nu_{k-}}{\Delta\nu_D'}, \quad v = \frac{\nu - \nu_{k-}}{\Delta\nu_D'}.$$

Полуширина линии, связанная с соударениями ($\Delta\nu_c$) и допплер-эффектом ($\Delta\nu_D'$), рассчитывалась по формулам [3]

$$\Delta\nu_c = 1,78 \cdot 10^{-3} P \left(\frac{T}{300} \right)^{-0,85} \Gamma_{2q}, \quad \Delta\nu_D' = \nu_{k-} \left(\frac{2kT}{m\epsilon^2} \right)^{0,5}. \quad (3)$$

В магнитном поле каждая линия расщепляется на $3(2J_{\min} + 1)$ компонент, где J_{\min} — наименьшее из двух значений J , соответствующих данному переходу. Частоты всех компонент даются выражениями [4]

$$\nu = \nu_{k-} + (g_{J_2} - g_{J_1}) M_J H \mu_0 / h \text{ для } \Delta M_J = 0, \quad (4)$$

$$\nu = \nu_{k-} + [(g_{J_2} - g_{J_1}) M_{J_2} \pm g_{J_1}] H \mu_0 / h \text{ для } \Delta M_J = \pm 1.$$

Здесь M_J — проекция полного углового момента молекулы на направление магнитного поля H , которая принимает значения $J, J-1, \dots, -J$. Молекулярный g_J -фактор равен

$$g_J = [J(J+1) + S(S+1) - K(K+1)]/J(J+1). \quad (5)$$

Квантовое число спина молекулы кислорода $S = 1$, а величина $\mu_0/h = 1,4 \text{ МГц} \cdot \text{эрст}^{-1}$. Относительные интенсивности компонент для переходов $\Delta M_J = 0, \Delta M_J = +1, \Delta M_J = -1$ равны соответственно

$$J_{\max}^2 - M_J^2, \quad (J_{\max} - M_{\max})(J_{\max} - M_{\max} + 1), \quad (6)$$

$$(J_{\max} + M_{\max})(J_{\max} + M_{\max} - 1).$$

Если электрический вектор СВЧ поля параллелен магнитному полю, то возбуждаются переходы с $\Delta M_J = 0$, называемые π -компонентами, а если поля перпендикулярны, то возбуждаются переходы с $\Delta M_J = \pm 1$ (σ -компоненты). Оба частных случая были рассмотрены в данной работе, и из них нетрудно получить более общий случай, когда наблюдаются и те и другие компоненты одновременно.

Полученные результаты представлены на рис. 1—3, где показан коэффициент поглощения в зависимости от расстройки $\delta\nu = \nu - \nu_{k-}$. На рис. 1, показывающем расщепление 1_- линии на различных высотах, пунктирными кривыми обозначены нерасщепленные линии ($H = 0$), а также единственная π -компонента линии. Сплошными кривыми показаны σ -компоненты. Из рис. 1 следует, что на высотах $\leq 50 \text{ км}$ эффектом Зеемана можно пренебречь. На рис. 2, 3 приведен вычисленный коэффициент поглощения в линиях 5_- и 21_- . Нерасщепленные линии здесь также показаны пунктирными кривыми. Сплошные кривые в области положительных расстроек соответствуют π -компонентам линий, а в области отрицательных расстроек — σ -компонентам. Как видно из рис. 2, в линии 5_- имеется весьма сложная структура, сильно зависящая от угла между высокочастотными и магнитными полями.

Отдельные компоненты различимы уже на высоте 60 км . В линии 21_- компоненты различимы выше 80 км . В соответствии с (4) и (6) относительная интенсивность σ -компонент увеличивается с удалением от резонанса, и суммарный контур поглощения в этих компонентах имеет довольно необычный вид.

Характерной чертой расщепления в линиях 5_- и 21_- является существенное отличие реальных контуров поглощения в геомагнитном поле от соответствующих контуров, рассчитанных без учета эффекта Зеемана, в полосе расстроек $|\delta\nu| \leq 3 \text{ МГц}$ для высот от 50 км и выше. На границах указанной полосы коэффициент поглощения в линии 21_- в π -компонентах и σ -компонентах соответственно в полтора и два раза превышает коэффициент поглощения в нерасщепленной линии γ_0 . За пределами указанной полосы расстроек коэффициент поглощения в расщепленной линии γ асимптотически приближается к γ_0 как

$$\frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0} \sim \frac{\Delta\nu_H}{\delta\nu}, \quad (7)$$

где $\Delta\nu_H$ — полоса частот, занимаемая зееман-компонентами ($2,0 \text{ МГц}$), $\delta\nu$ — расстройка. Из (4) следует, что полоса частот, занимаемая зееман-компонентами, не превосходит нескольких МГц для любой линии спин-вращательного спектра. Оценки показывают, что вклад зееман-компонент соседних линий в резонансное поглощение трех рассмотренных линий уже на высоте 40 км не превосходит нескольких процентов.

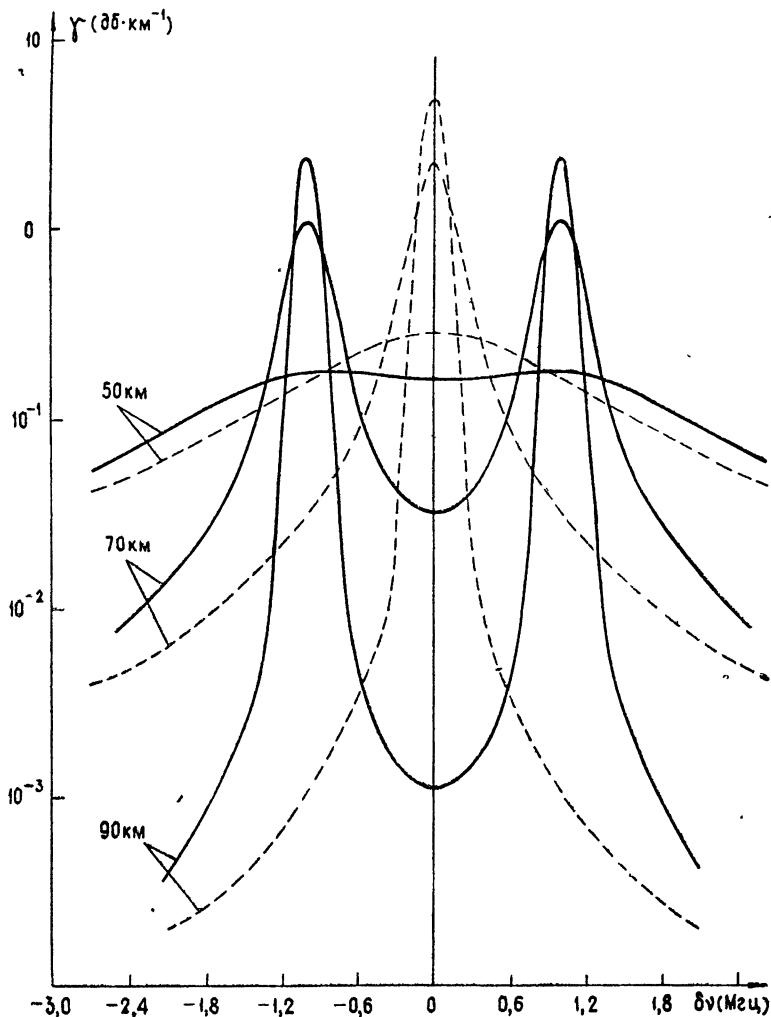


Рис. 1. Коэффициенты поглощения в 1-й линии

Расчеты, результаты которых представлены на рисунках, были выполнены для напряженности геомагнитного поля, равной $0,7 \text{ эрст}$, что соответствует геомагнитным полюсам. Результаты аналогичных расчетов, выполненных для поля $0,4 \text{ эрст}$ (геомагнитный экватор), качественно не отличаются от вышеприведенных. Количественное же различие сводится к тому, что во втором случае зееман-компоненты располагаются примерно вдвое теснее друг к другу, а структура, обусловленная ими, естественно, становится менее контрастной.

Автор весьма признателен А. С. Гурвичу за постоянное внимание к работе, Н. М. Сайтовой за помощь в расчетах на ЭВМ.

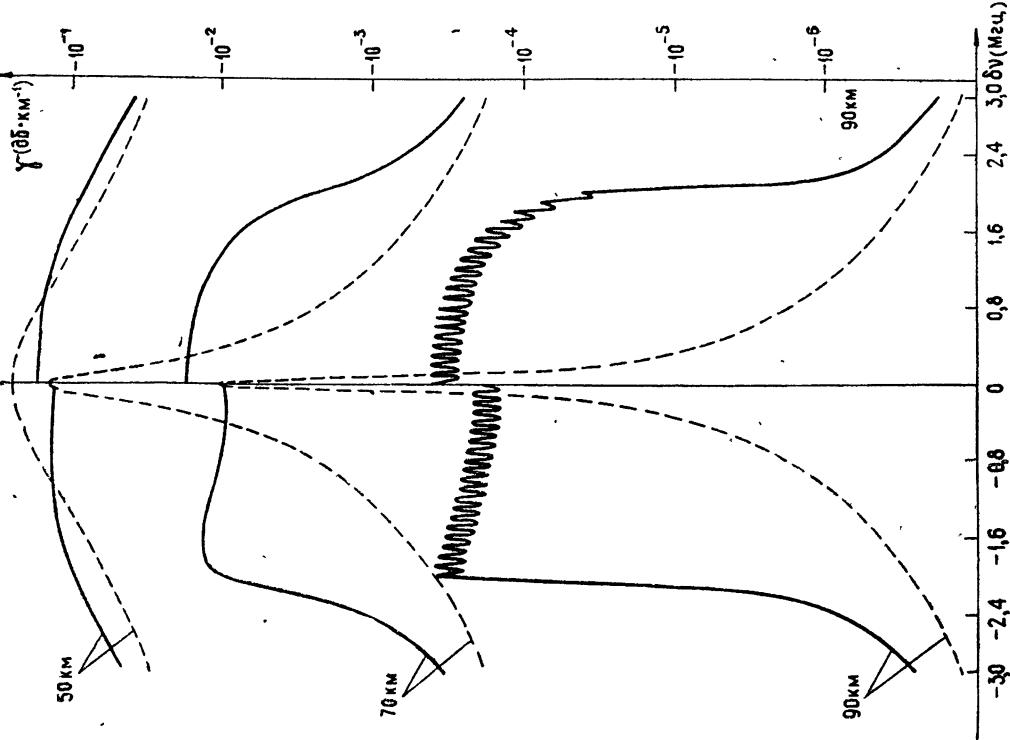


Рис. 3. Коэффициенты поглощения в 2-линии.

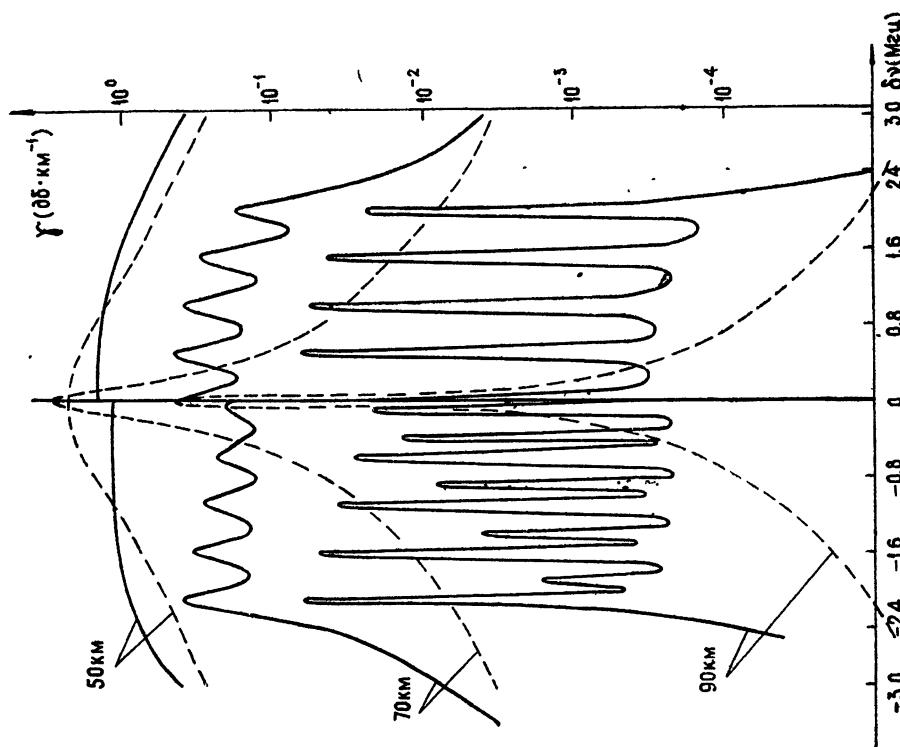


Рис. 2. Коэффициенты поглощения в 5-линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. L. Meeks, A. E. Lille y, J. Geophys. Res., 68, № 6, 1684 (1963).
2. U. S. Standard, Atmosphere, 1962, NASA, Government Printing Office, Washington, 1962.
3. С. С. Пеннеp, Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов, ИЛ, М., 1959.
4. Ч. Таунси А. Шавлов, Радиоспектроскопия, ИЛ, М., 1959.

Институт физики атмосферы
АН СССР

Поступила в редакцию
5 июля 1968 г.

THE ABSORPTION COEFFICIENT IN SPIN-ROTATIONAL OXYGEN LINES
IN THE ATMOSPHERE IN GEOMAGNETIC FIELD

V. V. Demin

The absorption coefficient in three microwave oxygen lines at the heights of 40—90 km is calculated. The influence of Zeeman effect in the geomagnetic field on the absorption-contour in resonance is investigated.