

УДК 523.4

**О ПОГЛОЩЕНИИ МИКРОРАДИОВОЛН В АТМОСФЕРАХ
ПЛАНЕТ-ГИГАНТОВ, ИНДУЦИРОВАННОМ СОУДАРЕНИЯМИ
МОЛЕКУЛ ВОДОРОДА***

К. П. Гайкович

Рассмотрен вклад в поглощение радиоволн в диапазоне длин волн $\lambda = 0,1 \div 20$ см за счет соударений молекул водорода в атмосферах планет-гигантов. Полученные коэффициенты поглощения сопоставлены с коэффициентами поглощения, обусловленного наличием аммиака, и сделаны выводы относительно условий, при которых необходимо учитывать рассмотренный механизм.

В связи с развитием радиоастрономических исследований планет; широким возрос интерес к интерпретации радиоизлучения этих планет. Характер радиоизлучения дает, в частности, информацию о структуре и химическом составе планетных атмосфер.

Интерпретация радиоизлучения Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн обычно выполняется при рассмотрении поглощения радиоволн только в аммиаке. Поглощательными свойствами недипольных газов атмосферы (водорода, гелия) пренебрегают ввиду малости этого поглощения. Однако при больших давлениях на планетах-гигантах механизм поглощения, прямо связанный с частотой соударения молекул, может стать эффективным.

В данной работе рассмотрен механизм индуцированного поглощения в диапазоне длин волн $\lambda = 0,1 \div 20$ см, обусловленный столкновениями молекул водорода в атмосферах Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна, и результаты сопоставлены с расчетами коэффициента поглощения аммиака для атмосфер соответствующих планет по формулам работ [1,2].

1. Расчеты поглощательных свойств выполнялись для адиабатических моделей атмосфер планет:

$$P(h) = P_0 [T(h)/T_0]^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad T(h) = T_0 + \nabla_T h, \quad (1)$$

где P — давление, T — температура в градусах Кельвина, h — высота, отсчитываемая от уровня с давлением P_0 и температурой T_0 по направлению к центру планеты, ∇_T — температурный градиент, γ — показатель адиабаты.

Использованные значения параметров в формулах (1) и относительные содержания основных атмосферных компонент были выбраны согласно [1-5] и приведены в табл. 1.

2. Поглощение, обусловленное соударениями между молекулами H_2 , связано с возникающим при этом индуцированным дипольным мо-

* Часть результатов данной работы была доложена на XII Всесоюзной конференции по распространению радиоволн (см. [13]).

ментом. Правила отбора позволяют каждой молекуле совершать квантовые переходы, для которых изменение вращательного квантового числа J составляет

$$\Delta J = 0, \pm 2. \quad (2)$$

Для таких переходов существуют неисчезающие матричные элементы индуцированного квадрупольным полем дипольного момента. Волновые числа, соответствующие этим переходам, будут:

$$K_{J,J+2} = 4B(J + 3/2). \quad (3)$$

Для молекулы водорода постоянная $B = 60,81 \text{ см}^{-1}$, т. е. частоты всех этих переходов, благодаря весьма большой вращательной постоянной, будут лежать значительно выше рассматриваемой области частот.

Таблица 1

Параметры Планеты	$P'_0, \text{ ат м}$	$T_0, \text{ К}$	$\nabla_T, \text{ К}$	r	$\text{NH}_3, \%$	$\text{H}_2, \%$
Юпитер	1—3	168	2,24	1,5	$0,5 \div 6,8 \cdot 10^{-2} [^3]$	80
Сатурн	1	100	0,9	1,47	$2 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{-3} [^{10}]$	80
Уран	0,26	52	1	1,57	$1 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} [^{10}]$	86
Нептун	0,23	48	1	1,3	$10 \div 4 \cdot 10^{-5} [^{10}]$	86

Переходы с $\Delta J = 0$ дадут спектр нерезонансного типа, в котором энергия поглощается без изменения вращательного состояния. Именно эти частоты дадут основной вклад в поглощение в сантиметровом и миллиметровом диапазонах волн. В общем виде мнимая часть диэлектрической проницаемости запишется [7]:

$$\varepsilon''_{\text{H}_2}(\omega) = \sum_J [I_{J,J} S_{J,J}(\omega) + I_{J,J+2} S_{J,J+2}(\omega)], \quad (4)$$

где I и S — соответственно интенсивность и фактор формы, ω — циклическая частота. В выражении (4) первое слагаемое вычислялось нами методами статистической механики, вкладом второго слагаемого пренебрегалось. Аналогичная схема вывода содержится в [7]. Из соотношения Крамерса — Кронига [8]

$$\int_0^\infty \varepsilon''(\omega) \frac{d\omega}{\omega} = (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty) \frac{\pi}{2}, \quad (5)$$

где ε и ε_∞ — значения диэлектрической постоянной при ω , стремящейся соответственно к нулю и бесконечности, имеем

$$\int_0^\infty S(\omega) \frac{d\omega}{\omega} = \frac{\pi}{2}, \quad \varepsilon_0 - \varepsilon_\infty = \sum_J [I_{J,J} + I_{J,J+2}]. \quad (6)$$

Известно (см., например, [8]), что

$$\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty = \frac{4\pi}{3kT} \int \langle \mu^2 \rangle dN, \quad (7)$$

где $\langle \mu^2 \rangle = 6\alpha^2 Q^2 r^{-8}$ — квадрат индуцированного дипольного момента, усредненный по всем ориентациям квадрупольного поля, dN —

$= 2\pi N_0^2 r^2 \exp[-E(r)/kT] dr$ — плотность пар молекул на расстоянии между r и $r+dr$ друг от друга, α — средняя поляризуемость, Q — квадрупольный момент молекулы, N_0 — число молекул в см^{-3} , $E(r) = 4\pi[(b_0/r)^{12} - (b_0/r)^6]$ — межмолекулярный потенциал. Имеет место также соотношение

$$I_{J,J} = \frac{J(J+1)f_J}{(2J-1)(2J+3)} (\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty), \quad (8)$$

где f_J — относительное число частиц во вращательном состоянии с квантовым числом J .

Форма линии $S(\omega)$ в данной работе находилась аналогично [7] путем усреднения квадрата модуля фурье-преобразования $|\mu(\omega)|^2$ от временного фактора индуцированного дипольного момента

$$\mu(t) = \frac{\cos(\omega_0 t + \Phi)}{|r(t)|^4} \quad (9)$$

по фазам Φ , сечениям соударений и функций распределения относительных скоростей соударяющихся молекул. Для переходов с $\Delta J = 0$ в полученном выражении следует положить $\omega_0 = 0$.

Согласно [6, 9] значения молекулярных параметров для H_2 были выбраны равными $\varepsilon = 5,106 \cdot 10^{-15}$ эрг, $b_0 = 2,928 \cdot 10^{-8}$ см, $\alpha = 0,79 \cdot 10^{-24}$ см^{-3} , $Q = 0,248 \cdot 10^{-16}$ см^{-2} .

Расчеты коэффициентов индуцированного поглощения были выполнены на ЭВМ БЭСМ-6.

3. На рис. 1 приводятся результаты расчетов коэффициентов поглощения $\gamma_{\text{H}_2} = 10^6 \lg 10 e(\omega/c) \varepsilon_{\text{H}_2}''$ (дБ/км). Оказалось, что при принятых в моделях содержаниях аммиака поглощение индуцированным механизмом может вносить заметный вклад на волнах короче 1 см.

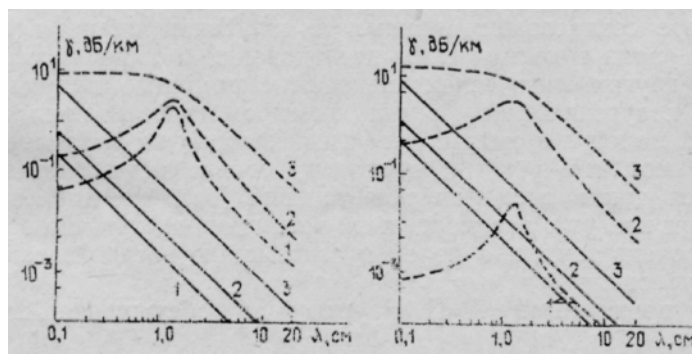


Рис. 1. Коэффициенты молекулярного поглощения радиоволн в атмосферах Сатурна (слева) и Урана (справа). Сплошными линиями представлено поглощение молекулярным водородом, пунктирными — поглощение NH_3 . Кривые 1, 2, 3 соответствуют уровням давления 3, 10 и 100 атм

соответственно.

Если, как это принято здесь, согласно радиоастрономическим оценкам [10], содержание NH_3 в атмосфере Нептуна ниже уровня насыщения и составляет 10^7 — 10^6 , то вклад индуцированного нерезонансного поглощения водорода оказывается существенным во всем рассмотрен-

ном диапазоне длин волн. Кроме того, необходимо отметить, что индуцированный механизм определяет поглощение на высотах, где давление меньше 3 атм, поскольку на этих высотах концентрация насыщения NH_3 еще слишком мала. Результаты, представленные на рис.1, уточняют результаты для Сатурна, полученные ранее в работе [13].

При лабораторных исследованиях [11] был оценен верхний предел эффективности индуцированного механизма. Наши расчеты дают значения приблизительно в 10 раз меньше величины этого предела. Оценки верхнего предела поглощения γ_{H_2} , полученные из рассмотрения интегрального радиоизлучения Урана для различных моделей в работе [12], оказываются на один-два порядка меньше, чем полученные в настоящей работе. Это объясняется отличием моделей температурной зависимости атмосферы Урана в данной работе и в [12]. Этот факт позволяет сделать вывод о предпочтительности использованной здесь более «теплой» модели атмосферы Урана по сравнению с моделью работы [12] ($T_0 = 55 \text{ K}$, $P_0 = 3 \text{ атм}$).

Приведенное рассмотрение хотя и выполнено в определенных предположениях (для прямолинейных траекторий соударяющихся молекул, без учета множественных соударений), позволяет уменьшить неопределенность в описании индуцированного поглощения, в частности устранить неопределенность в выборе ее температурной зависимости. Для того, чтобы сделать возможным использование полученных результатов в практических расчетах, на основе выполненных вычислений была получена приближенная формула для коэффициента индуцированного поглощения, который является, вообще говоря, сложной функцией частоты, температуры и давления. С точностью не хуже 15% коэффициент поглощения может быть получен в рассмотренном диапазоне длин волн и температур по формуле

$$\gamma = 3,3 \cdot 10^3 P^2 T^{-3,4} \lambda^{-1,96}, \quad (10)$$

где P — давление в атмосферах, λ — длина волны в сантиметрах.

Полученные результаты целесообразно использовать для интерпретации спектров радиоизлучения планет-гигантов.

По мере согласования данных об излучении планет в различных диапазонах волн и космических исследований можно надеяться и на получение других физических сведений с помощью индуцированного механизма излучения (поглощения) электромагнитных волн, например, о свойствах молекул в сжатых газах и некоторых их параметрах (квадрупольном моменте и т. п.), поскольку только на планетах-гигантах реализуются такие специфические условия (большие давления и масштабы), при которых рассмотренный механизм достаточно эффективен и которые очень трудно, а порой и невозможно воспроизвести в лабораторных условиях.

Автор признателен А. П. Наумову за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Кузьмин, А. П. Наумов, Т. В. Смирнова, *Астрономический вестник*, **6**, № 1, 13 (1972).
2. А. П. Наумов, *Изв. вузов — Радиофизика*, **17**, № 12, 1755 (1974).
3. А. Д. Кузьмин, Т. В. Смирнова, *Астрономический вестник*, **7**, № 3, 139 (1973).
4. R. E. Danielson, *Icarus*, **30**, № 3, 462 (1977).
5. L. Margtilis, H. O. Halvarson, J. Lewis and A. G. W. Cameron, *Icarus*, **30**, № 4, 793 (1977).
6. N. J. Harrick and N. F. Ramsey, *Phys. Rev.*, **88**, 228 (1952).
7. A. A. Maryott and G. Birnbaum, *J. Chem. Phys.*, **36**, № 8, 2026 (1962).
8. Г. Фрелих, *Теория диэлектриков*, перев. с англ., ИЛ, М., 1960.

9. Дж. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд, Молекулярная теория газов и жидкой. перев. с англ., ИЛ, М., 1961.
10. С. Б. Андриянычева, К. П. Гайкович, А. П. Наумов, Изв. вузов — Радиофизика, **22**, № 7, 888 (1979).
11. G. Birnbaum and L. L. Maryott, J. Chem. Phys., **36**, 2032 (1962).
12. Л. Д. Кузьмин, Л. Г. Соловьев, ДАН СССР, **201**, № 6, 1313 (1971).
13. К. П. Гайкович, М. Б. Зиничева, А. П. Наумов, XII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн, Тезисы докладов, Томск, июнь 1978, ч. 1, и: <д. Наука, М., 1978, стр. 246.

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
19 сентября 1978 г.

ABSORPTION OF RADIO MICROWAVES IN ATMOSPHERES OF GIANT
PLANETS BY INDUCED COLLISIONS OF HYDROGEN MOLECULAS

K. P. Gaikovich

A contribution is considered to the absorption of radio waves in the wave range $\lambda=4\div 20$ cm due to collisions of hydrogen molecules in atmospheres of giant planets. Absorption coefficients obtained are compared with coefficients of absorption in the presence of ammonia and conclusions are made relative to conditions when the mechanism considered is necessary to take into account.