

УДК 523.45

В. Д. ВДОВИЧЕНКО, Г. А. КИРИЕНКО

ВАРИАЦИИ АММИАЧНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В λ 10 300 А ПО ДИСКУ ЮПИТЕРА

Обсуждаются проблемы выделения полос поглощения аммиака в ближней ИК-области спектра на фоне сильных полос поглощения метана в атмосфере Юпитера. Приводятся особенности вариаций поглощения аммиаком вдоль экватора и центрального меридиана Юпитера.

Основными газовыми составляющими юпитерианской атмосферы являются водород и гелий. За ними следуют метан и аммиак. Относительное содержание этих газов в атмосфере Юпитера невелико: метана (CH_4) ~0,07% и аммиака (NH_3) ~0,01%. Однако они имеют умеренные и сильные полосы поглощения в видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра, которые используются не только для индикации, но в сочетании с определенными моделями атмосферы, и для оценки вариаций содержания этих газов в верхних слоях атмосферы планеты, доступных для наблюдения с помощью оптических телескопов. Оба газа играют важную роль в оптических и динамических внутриагмосферных процессах. Кроме того, непосредственно метан и аммиак под воздействием электрических разрядов и ультрафиолетового (УФ) облучения могут образовывать полимеры красных, коричневых и желтых цветов.

Благодаря своей способности конденсироваться в верхней атмосфере Юпитера аммиак играет огромную роль в динамическом и метеорологическом состоянии планеты. Кроме того, на уровне давления несколько баров он может раствориться в воде, затем прореагировать с H_2S , сформировав облако NH_4SH на уровне 2 бара, а в твердом виде образует облака на уровне 0,6 бара. В верхней тропосфере он фотодиссоциирует. В соответствии с этой моделью считается, что отношение смеси газообразного аммиака резко уменьшается с высотой, начиная с уровня чуть выше 0,6 бара, тогда как из данных Voyager/IRIS спектров и наземных наблюдений в сантиметровом диапазоне следует предположение о его постоянстве на уровнях ниже 2 бар. Однако по данным Galileo-зонда (с момента вхождения в атмосферу) содержание аммиака увеличивалось вплоть до 8 бар, после чего вглубь оно ос-

тавалось приблизительно постоянным. Отсюда следует вывод, что современные знания об аммиаке на Юпитере еще неполные.

Согласно изложенному, в атмосфере с такой мощной динамикой, каковой является юпитерианская, аммиак не может не испытывать и горизонтальных вариаций. Действительно, спектры Юпитера, полученные с высоким пространственным разрешением с помощью Voyager IRIS, позволили оценить содержание аммиака на уровне верхней облачной палубы (680 мб) с точностью до 6% и определить его среднезональные значения, которые приведены в работе [1]. Судя по этим данным, на интервале широт $60^\circ\text{N} - 60^\circ\text{S}$ содержания NH_3 меняются максимально в 4 раза.

Изменение содержания NH_3 влечет за собой и изменение содержания H_2O , и когда они оба возрастают, прозрачность облака, расположенного на уровне 2 бара, уменьшается [2]. Если допустить существование слоя NH_4SH , являющегося в верхней атмосфере «ловушкой» для NH_3 , то этот слой толще над зонами, чем над поясами, что приводит к дополнительной разнице температур в $3^\circ - 4^\circ$ и возникновению зональных движений ветра вблизи облачных палуб.

Нами на протяжении ряда лет на основе большого наблюдательного материала проводились детальные исследования поведения слабых, умеренных и сильных полос поглощения метана и аммиака в области спектра 5 000–11 000 А в атмосфере Юпитера. Этот материал позволил не только выявить глобальные закономерности в спектральном ходе альбедо планеты, но и уверенно оценить их широтные, долготные и временные вариации [3, 4]. Однако анализ вариаций аммиака по диску планеты всегда сопровождался трудностями, связанными с тем, что в спектрах Юпитера полосы поглощения аммиака накладываются на умеренные и сильные полосы погло-

щения метана. Тем не менее, учитывая способность аммиака конденсироваться в верхних слоях атмосферы Юпитера, следует ожидать, что поведение полос поглощения этого газа при движении по диску планеты будет существенно отличаться от такового для метана. В настоящее время мы располагаем лабораторными данными о коэффициентах поглощения аммиака, любезно предоставленными N. E. Bowles (частное сообщение), и это позволяет нам проанализировать результаты наших наблюдений именно в целях исследования аммиачного поглощения по диску Юпитера.

Исследование вариаций аммиачного поглощения по диску Юпитера проводилось в $\nu\mu\theta\beta\zeta\rho\nu\zeta\mu\omicron\zeta\tilde{\mu}\mu\theta\tilde{\nu}\chi\nu\zeta\iota\omicron\zeta\lambda\zeta\rho\epsilon\beta\lambda\ 10\ 300\ \text{A}$. Необходимо отметить, что эта полоса блендируется более сильной полосой поглощения метана (рис. 1), и для нее, кроме того, отсутствуют литературные данные о спектральных коэффициентах поглощения, требующиеся для модельных расчетов.

Для выделения полосы поглощения аммиака в «чистом виде» могут быть использованы две методики:

1. В рамках двухслойной модели можно подобрать такие параметры рассеивающе-поглощающей атмосферы, при которых модельный спектр метана довольно хорошо согласуется с наблюдаемым спектром Юпитера в широком диапазоне λ , за исключением отдельных узких деталей. Отношение спектров Юпитера к такого рода модельным спектрам позволяет выделить полосу поглощения NH_3 и исследовать ее поведение по диску планеты.

2. Опираясь на то, что спектры метанового поглощения на Юпитере и Сатурне и условия их формирования в атмосферах планет очень похожи (рис. 1) и что в спектрах Сатурна практиче-

ски полностью отсутствуют полосы поглощения газообразного NH_3 , можно отнести спектры Юпитера к спектру Сатурна и выявить на Юпитере полосы поглощения NH_3 на фоне почти полностью скомпенсированного поглощения CH_4 в $\lambda\ 10\ 300\ \text{A}$.

Однако, несмотря на кажущуюся простоту, при использовании обоих методов мы встретились с определенными трудностями. В первом случае это то, что в спектрах не только Юпитера, но и Сатурна обнаруживаются практически одинаковые отклонения от лабораторного спектра метана в длинноволновом крыле полосы поглощения $\text{CH}_4\ 8860\ \text{A}$ и в отдельных участках полосы $\text{CH}_4\ 9870\ \text{A}$ [3]. Возможно, это связано с тем, что в отличие от лабораторных спектры метана Юпитера и Сатурна формируются, во-первых, в рассеивающе-поглощающих атмосферах, во-вторых, на высотах с переменной плотностью, (перепад давления от 0 до 1 атм), и, в-третьих, в условиях низких температур (на уровне тропосферы 90–105 К у Юпитера и 80–90К у Сатурна). На фоне этих «тонких» спектральных особенностей нам не удалось данным методом выделить в «чистом» виде спектр аммиака в области 7 500–11 000 A.

Второй метод оказался более продуктивным. Ввиду схожести условий формирования отраженных спектров в атмосферах этих двух планет их отношение компенсирует одинаковые особенности каждой отдельной спектральной детали, оставляя в результате избытки в поглощении: один за счет аммиака со стороны Юпитера, другой – за счет метана со стороны Сатурна.

Избыток метана в спектре Сатурна мы довольно легко компенсировали, пересчитав его исходный спектр в рамках двухслойной модели атмосферы, понизив (на ~ 35%) содержание метана. В результате нам удалось:

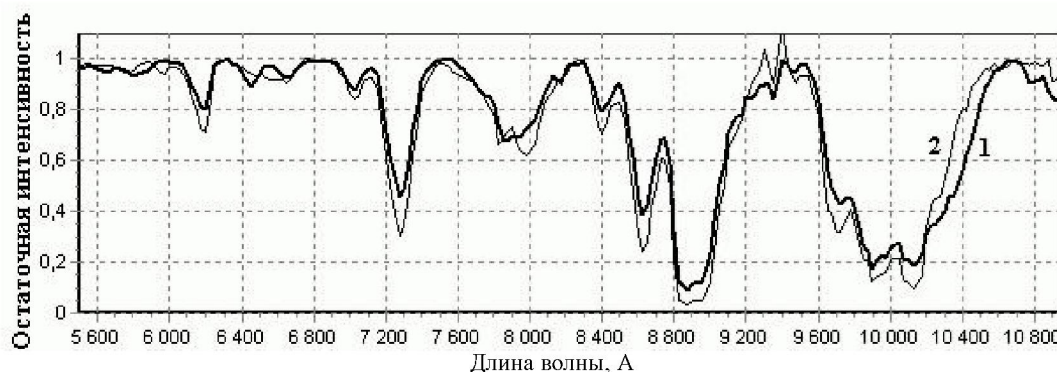


Рис. 1. Профили полос поглощения метана и аммиака: 1– для центра диска Юпитера; 2 – то же, для Сатурна

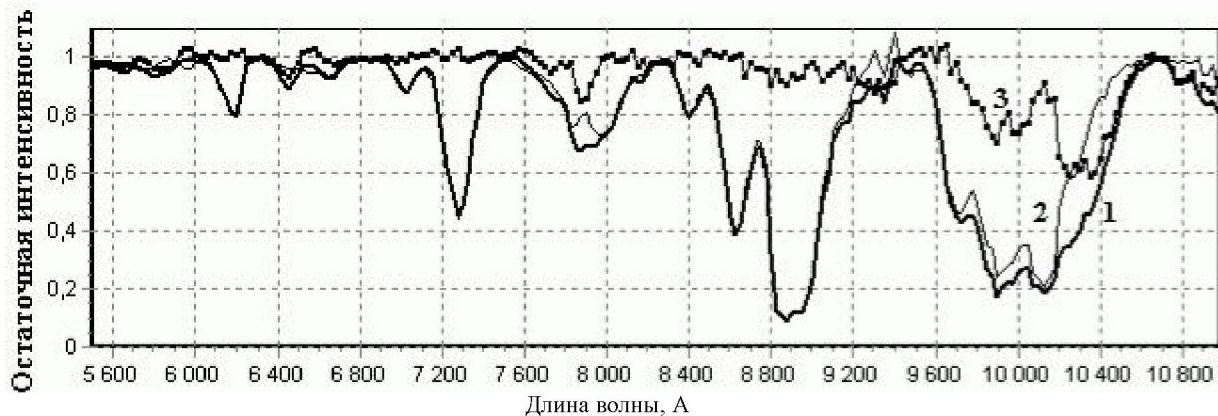


Рис. 2. Профили полос поглощения метана и аммиака: 1 – для центра диска Юпитера; 2 – тот же спектр для Сатурна, пересчитанный для пониженного содержания метана; 3 – отношение 1 к 2

в участках чисто метанового поглощения добиться полного (в пределах $\pm 3\%$) согласия «нового» профиля поглощения метана для Сатурна с таковым для Юпитера;

выделить полосы поглощения аммиака в области 7500 – 11 000 Å и оценить их интенсивность (рис. 2).

Для сравнения спектра аммиака, выделенного таким образом из спектра Юпитера, с лабораторным спектром мы воспользовались данными N. E. Bowles (частное сообщение). Как видим, сравнение показывает неплохое сходство в диапазоне длин волн 7500–10 000 Å, за исключением участка центра полосы в 10 300 Å, что, возможно, связано с различиями условий формирования полос поглощения в атмосферах планет и в лаборатории (рис. 3). По нашим оценкам, содержание аммиака в атмосфере Юпитера на уровне верхней границы облачного слоя в районе экватора (с учетом эффектов рассеяния и поглощения) составляет $7,5 \pm 0,4$ м-атм.

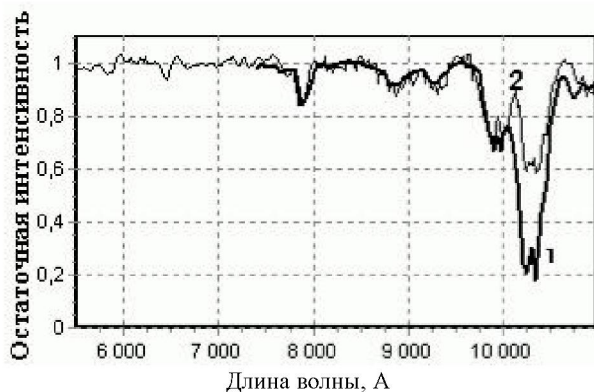


Рис. 3. Профили полос поглощения аммиака: 1 – по лабораторным данным; 2 – по отношению спектра Юпитера к спектру Сатурна

Для исследования хода поглощения аммиака по диску Юпитера мы использовали два спектральных участка – длинно- и коротковолновый в полосе поглощения метана 9870 Å:

λ 10300 Å – участок, несущий информацию о суммарном поглощении аммиака и метана;

λ 9600 Å – участок с таким же лабораторным коэффициентом поглощения метана, как и в 10 300 Å, но без заметного вклада со стороны аммиака.

Отношение фотометрических профилей диска Юпитера в указанных длинах волн должно полностью компенсировать поглощение со стороны метана и выделить «в чистом виде» ход поглощения аммиака по диску планеты.

Наши исследования показывают, что ход поглощения NH_3 вдоль облачных поясов и зон при переходе от центрального меридиана (ЦМ) к лимбу отличается от метанового, которое для полос поглощения CH_4 различной интенсивности остается практически постоянным.

В отличие от метанового поглощения NH_3 вдоль облачных поясов значительно уменьшается при приближении к лимбу (рис. 4). Этот факт указывает на слабую роль или полное отсутствие влияния газовой составляющей NH_3 в надоблачной атмосфере на формирование полос поглощения этим газом и свидетельствует в пользу модели рассеивающе-поглощающего облачного покрова.

Ход поглощения NH_3 в λ 10300 Å вдоль ЦМ в значительной степени повторяет ход поглощения CH_4 в глубоких полосах поглощения. Минимальное поглощение NH_3 наблюдается в основном в экваториальной и северно-тропической

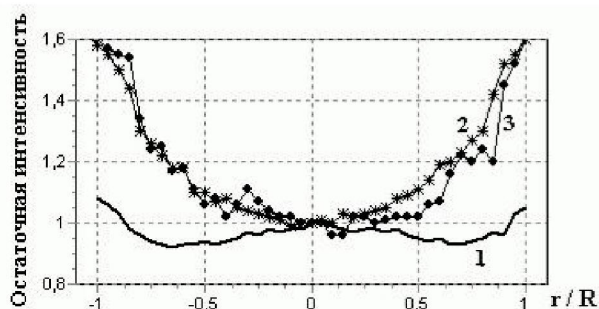


Рис.4. Вариации остаточной интенсивности вдоль экватора Юпитера: 1 – метана в λ 8860 Å; 2 и 3 – то же, аммиака 10 300 Å

областях. С ростом широты поглощение NH_3 плавно растет, достигая максимума на широтах $50\text{--}55^\circ$, и незначительно уменьшается на более высоких широтах (рис. 5). Причем и для полосы NH_3 в λ 10 300 Å, и для метана в 8860 Å наблюдается тенденция дополнительного небольшого увеличения поглощения при переходе от темных облачных поясов к светлым зонам.

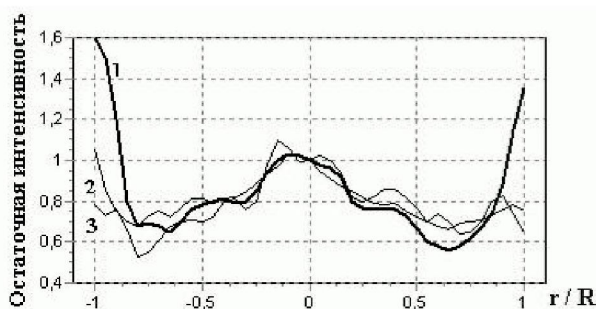


Рис.5. Вариации остаточной интенсивности вдоль центрального меридиана Юпитера: 1 – в центре полосы поглощения метана в λ 8860 Å; 2 и 3 – то же, аммиака 10 300 Å

Принципиальное различие в ходе поглощения метана и аммиака вдоль отдельных облачных поясов и их большое сходство для ЦМ дают основание сделать очень важный вывод: вариации меридионального поглощения как метана, так и аммиака определяются в основном различиями оптических характеристик верхнего облачного покрова (вероятность выживания кванта, вытянутость индикатрисы рассеяния, плотность аэрозоля) и в гораздо меньшей степени вариациями их верхней границы, т.е. вариациями толщины надоблачной атмосферы. В результате существующего теплового режима и мощного конвективного перемешивания в верхних слоях атмосферы этой гигантской планеты рассеивающий аэро-

золь распространяется настолько высоко, что роль чистой релеевской атмосферы в формировании отраженной радиации и полос поглощения аммиака и метана сводится к минимуму. Складывается впечатление, что для Юпитера при перемещении от экватора к полюсам характерным является постепенный рост плотности облачного или стратосферного аэрозоля. Отсутствие косинус-эффекта в приполярных областях как для метана, так и для аммиака, лишнее свидетельство о высоко расположенных аэрозольных слоях вблизи полюсов Юпитера. Что касается наших оценок параметров облачного покрова Юпитера на его верхней границе по вариациям интенсивности полос поглощения метана, то они приведены в работе [3].

Работа выполнена в рамках ПФИ, шифр Ф-0351.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gierash P. J., Conrath B. J., Magalhaes J. A. Zonal mean properties of Jupiter's upper troposphere from Voyager infrared observations // *Icarus*. 1986. V. 67, N 3. P. 456–483.
2. Lellouch E., Drossart P., and Encrenaz T. A new analysis of the Jovian 5 μm Voyager / IRIS spectra // *Icarus*. 1989. V. 77, N 2. P. 457–465.
3. Вдовиченко В. Д., Кириенко Г. А., Носова Т. П. Спектрофотометрия Юпитера в диапазоне 320 – 1100 нм: многолетние наблюдения вариаций по диску // *Астрономический вестник*. 2003. Т. 37, № 4. С. 310–324.
4. Teifel V. G., Vdovichenko V. D., Kirienko G. A., Kharitonova G. A., Sinyaeva N. V. and Karimov A. M. Spatially resolved variations in the methane and ammonia absorption in the atmosphere of Jupiter // *Astron. and Astrophys. Transactions*. 2005. V. 24, N. 4. P. 359–367.

Резюме

Юпитердің атмосферасындағы метанның күшті жұтылу жолағының аясында спектрдің жақын инфрақызыл аймағында аммиақтың жұтылу жолағының ажырау мәселелері талқыланады. Юпитердің экваторы мен центрлік меридианы бойымен аммиакпен жұтылу вариацияларының ерекшеліктері келтіріледі.

Summary

Problems of distinguishing ammonia absorption bands on the background of the strong methane absorption bands in the IR spectral region, in the Jovian atmosphere, are discussed. The features of the ammonia absorption variations along Jupiter's equator and central meridian are represented.

Астрофизический институт
им. В.Г.Фесенкова МОН РК,
г. Алматы

Поступила 12.04.2006 г.