

УДК 523.45/46—852

Особенности формирования многоярусной слоистообразной облачности в атмосферах Юпитера и Сатурна

А. А. Солодовник

Представлены результаты численных расчетов водно-аммиачной облачности для условий атмосфер Юпитера и Сатурна. Рассчитаны 50 моделей на основе новейших наблюдательных данных об атмосферных параметрах этих планет. Выявлены характерные для каждой планеты особенности формирования и эволюции облачности.

PECULIARITIES OF FORMATION OF MULTILAYER CLOUDINESS IN THE ATMOSPHERES OF JUPITER AND SATURN, by Solodovnik A. A.— The numerical results for 50 models of NH_3 and H_2O cloudiness in the atmospheres of Jupiter and Saturn are given. Parameters of the models are based on the modern observational data. The conclusions are made about the characteristic features of clouds of these planets.

Важную роль в тепловом балансе атмосфер планет играют облака, существование которых непосредственно связано с физико-химической структурой атмосферы. При этом основные параметры, определяющие состояние атмосферы, практически не поддаются оценке дистанционными методами зондирования. Главным образом это касается динамических факторов, которые характеризуют турбулентное перемешивание, горизонтальный и вертикальный перенос атмосферных масс, направление и скорость теплообмена турбулентных молей с окружающей средой, характерный масштаб циркуляции и т. д.

Несмотря на то, что указанные характеристики оптически проявляют себя весьма неуверенно, при достаточно большом и систематическом наблюдательном материале появляется возможность опосредованной оценки этих параметров путем сравнения наблюдений с результатами решения обратных задач моделирования. Разумеется, общая постановка проблемы при таком подходе является некорректной, однако она позволяет оценить возможный, хотя и в достаточной мере условный интервал, в котором могут меняться основные параметры атмосферы. При отсутствии прямого зондирования этот путь представляется, по видимому, единственно возможным. Оценки параметров, полученные такими методами, не претендуют на окончательность, могут быть полезными при конструировании проникающих в атмосферу модулей, поскольку они позволяют оценить условия, с которыми может столкнуться атмосферный зонд.

Наконец, при интерпретации оптических наблюдений, основанной на решении уравнений переноса в рассеивающе-поглощающих средах, важным является выбор исходной модели атмосферы. При этом предпочтение следует отдавать моделям, в основу которых закладываются физико-химические параметры реальной или близкой к ней атмосферы.

В работах [2—4] нами описан метод расчета подобных моделей в приложении к атмосферам Юпитера и Сатурна.

Целью данной статьи является проведение сравнительного анализа особенностей формирования облачности этих планет.

Исходная система уравнений, как и в [4], имеет вид:

$$\frac{\partial \varphi_i}{\partial t} + \hat{L}_i \varphi_i = G_i, \quad (i = 1, 2, 3), \quad (1)$$

где оператор \hat{L}_i определяется выражением $\hat{L}_i = W \frac{\partial}{\partial z} - \frac{k}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \rho \frac{\partial}{\partial z}$, а

функциями φ_i обозначены: $\varphi_i = (\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) = (q_1(r, t), q_2(r, t), T(r, t))$ — удельная влажность, удельное содержание аммиачных паров и температура соответственно.

$$G_i = \left(q_1 + \delta_1, q_2 + \delta_2, \frac{L_1}{C_p} q_1 + \frac{L_2}{C_p} q_2 \right).$$

Здесь w — скорость вертикального подъема, k — коэффициент турбулентной диффузии, δ_1 и δ_2 — водность и аммиачность, L_1 и L_2 — скрытая теплота конденсации H_2O и NH_3 , C_p — удельная теплоемкость смеси атмосферных газов при постоянном давлении. Начальные и граничные условия приведены в работе [4].

Таблица 1. Интервалы варьирования исходных факторов

Планета	w , см/с	k , см ² /с	x_1	x_2	Уров- ни
Юпитер	10	10^6	10^{-6}	10^{-5}	0
	15	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	1
	20	10^6	10^{-5}	10^{-4}	2
	25	$5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	3
	30	10^7	10^{-4}	10^{-3}	4
Сатурн	20	$5 \cdot 10^5$	10^{-6}	10^{-5}	0
	25	10^6	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	1
	30	$5 \cdot 10^6$	10^{-5}	10^{-4}	2
	35	10^7	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-4}$	3
	40	$5 \cdot 10^7$	10^{-4}	10^{-3}	4

Основными варьируемыми параметрами выбраны скорость вертикального подъема w , коэффициент турбулентной диффузии k и содержание конденсирующихся атмосферных компонентов x_1 и x_2 , в качестве которых взяты водяной и аммиачный пары. Используемые в расчетах значения величин k , w , x_1 , x_2 для обеих планет приведены в табл. 1. Интервалы варьирования, указанные в табл. 1, выбраны на основании данных, полученных наземными средствами и КА [6—11], за исключением коэффициента турбулентной диффузии, значение которого мы ограничили величиной $k = 5 \cdot 10^7$, хотя, согласно некоторым исследованиям, величина k может достигать 10^9 см²/с и более. Такое ограничение основано, главным образом, на результатах предварительных расчетов, из которых следует, что при $k > 5 \cdot 10^7$ см²/с облачность не возникает в течение очень длительного промежутка времени (порядка 300 ч), существенно превосходящего время возникновения облачных деталей как на Юпитере, так и на Сатурне.

Для неварьируемых параметров выбраны значения, представленные в табл. 2. Здесь T_0 , P_0 и γ_a — температура, давление и адиабатический градиент температуры на начальном уровне. $T_{эф}$ — эффективная температура. Начальное распределение температуры и давления с высотой рассчитывалось по методу [7] с привлечением данных табл. 2. Всего рассчитано 50 моделей, по 25 для каждой планеты. Обработка и поиск зависимостей основных макрофизических параметров облачности проводились с использованием теории планирования [1].

Типичные профили облачности Юпитера и Сатурна, показывающие достаточно четкую стратификацию облачных слоев, в целом идентичную для обеих планет, приведены на рис. 1. Однако есть и разница. Так, облака Сатурна гораздо более стратифицированы по сравнению с Юпитером, что объясняется различиями в высотном распределении температуры и давления на этих планетах.

В свою очередь, на Юпитере (рис. 1 а) аммиачные облака представлены в виде двух слоев, тогда как на Сатурне при любых значениях исходных факторов возникают только однослойные аммиачные облака.

График зависимости величины максимальной водности облака от основных варьируемых параметров для Юпитера приведен на рис. 2 а. На рис. 2 б — аналогичный график для Сатурна.

Из сравнения рис. 2 а и 2 б видно, что зависимость водности δ_1 от ω , k , x_1 , x_2 в целом одинакова для обеих планет. При этом влияние

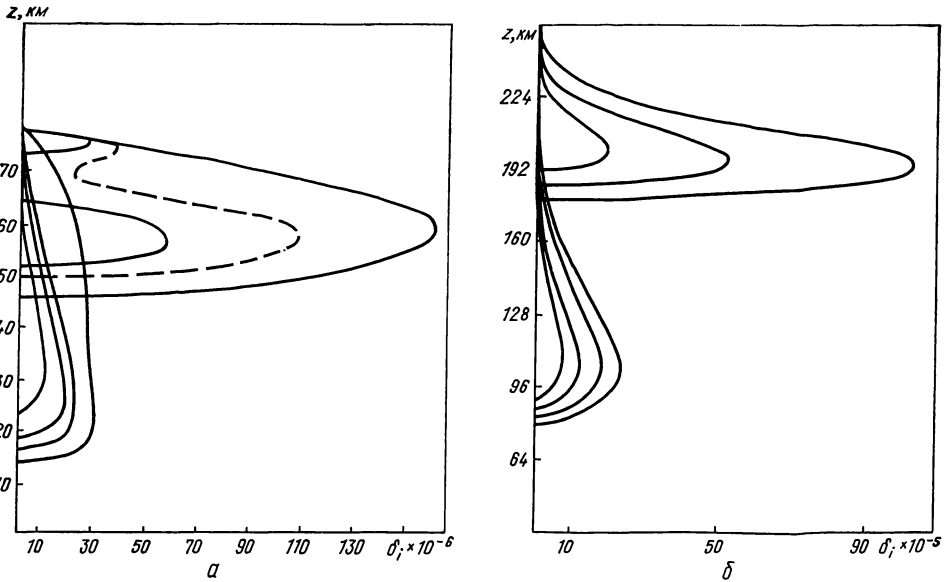


Рис. 1. Профили облачности для атмосфер Юпитера (а) и Сатурна (б). Верхний ярус кривых относится к аммиачным облакам, нижний — к водным

первых трех факторов на величину водности имеет вполне физическое обоснование, тогда как зависимость δ_1 от x_2 объясняется только временной привязкой. В самом деле, рост водности с увеличением содержания паров и скорости вертикального подъема обусловлен, с одной стороны, поступлением более значительных порций пара в зону конденсации, с другой — уменьшением температуры окружающей среды за счет вертикального подъема воздушных масс [5]. Что касается зависимости δ_1 от k , то она определяется тем, что в результате турбулентного перемешивания атмосфера в целом несколько разогревается, а это приводит к увеличению насыщающего давления паров, а следовательно, и к уменьшению водности.

Наконец, влияние содержания аммиака на водность облака чисто условно. Так, чем больше содержание NH_3 , тем быстрее возникает аммиачное облако. Поскольку все кривые относятся к 50-му часу развития облаков NH_3 , то к этому моменту водные облака будут находиться на более ранней стадии своего развития, а значит, и иметь

Таблица 2. Параметры моделей Юпитера и Сатурна

Планета	γ_a , К/км	C_p , Дж/ (г. град)	L_1 , Дж/г	L_2 , Дж/г	P_0 , бар	$T_{эф}$, К	T_0 , К	g , см/с ²
Юпитер	2.25	10.727	2475.49	1373.48	10	120	300	2450
Сатурн	0.82	11.677	2475.49	1373.48	10	90	300	960

меньшую водность. Таким образом, зависимость δ_1 от x_2 объясняется только временной привязкой.

Аналогичные кривые, характеризующие зависимость аммиачности от факторов w , k , x_1 и x_2 , приведены на рис. 3. Подобные графикам для

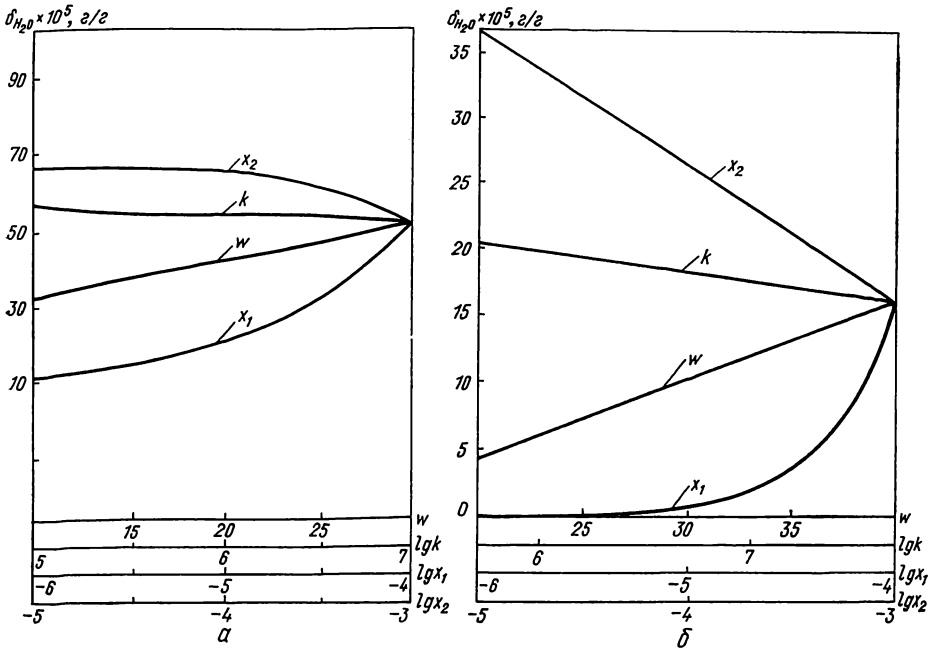


Рис. 2. Зависимость максимальной водности от w , k , x_1 , x_2 для Юпитера (а) и Сатурна (б). Кривые относятся к моменту времени, соответствующему 50-му часу развития аммиачного облака

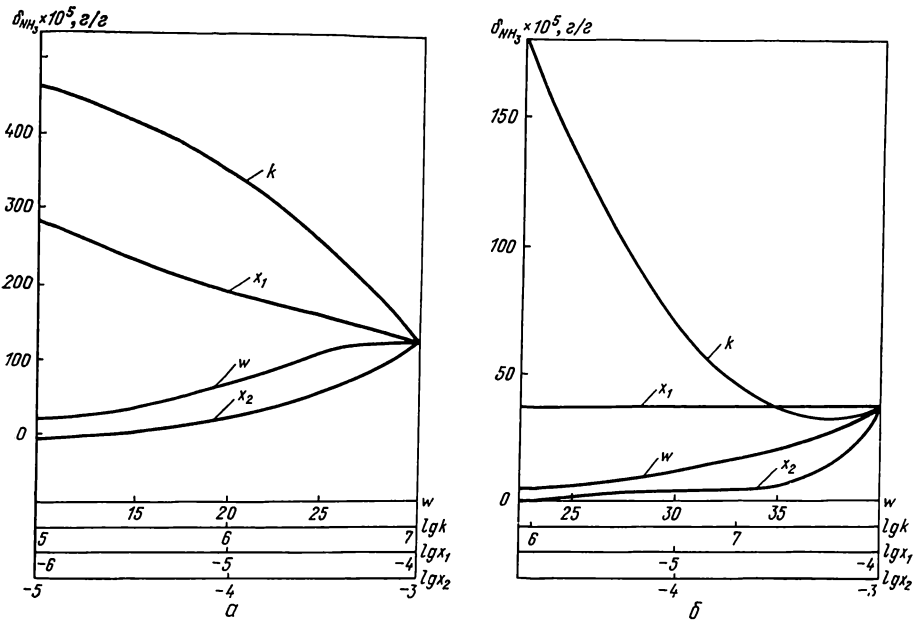


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для аммиачности

водности, они имеют и существенные отличия. Различаются и кривые для разных планет. Рассматривая например Юпитер, заметим, что если водность не зависит от содержания аммиака, то аммиачность резко уменьшается с ростом концентрации водяного пара (рис. 3а, кривая

x_1). Это может объясняться трансформацией температурного профиля, вызванной выделением скрытой теплоты конденсации водяных паров тем большим, чем выше их содержание. Следует отметить и более крутой ход зависимости δ_2 от k по сравнению с кривой водности $\delta_1(k)$ (рис. 2 а), обусловленный, как было указано выше, турбулентным разогревом атмосферы, распространяющимся сверху вниз [5]. Зависимость аммиачности от факторов ψ и x_2 определяется теми же причинами, что и для водности.

Что касается Сатурна, то здесь дело обстоит несколько иначе. Если для Юпитера (в силу взаимопроникновения водных и аммиачных облаков) влияние скрытой теплоты конденсации водяного пара на формирование аммиачного облака вполне обосновано, то для Сатурна из-за большей стратификации облаков это влияние должно быть гораздо меньшим или отсутствовать вообще. В самом деле, из рис. 3 б видно, что аммиачность верхнего облака не зависит от содержания водяного пара в атмосфере Сатурна (кривая x_1 параллельна оси абсцисс). В остальном же кривые на рис. 3 б идентичны изображенным на рис. 3 а.

В заключение отметим, что в целом облачные слои на Юпитере и Сатурне (при условии существования в качестве конденсирующихся компонентов водяного и аммиачного паров) должны обладать достаточно общими характерными чертами, хотя не исключены и различия, которые в ряде случаев могут являться характерными для данной планеты. К таким относятся, например, формирование двухслойного аммиачного облака на Юпитере или полная независимость облачных образований на Сатурне.

Разумеется, последнее не является окончательным, поскольку мы не учитывали здесь механизма растворения аммиака в водных каплях, что, вероятно, приведет к перераспределению уровней формирования облаков верхнего яруса, однако в частном случае рассмотренные особенности формирования водно-аммиачных облаков на Юпитере и Сатурне, по-видимому, могут иметь место.

1. *Ибрагимов К. Ю.* Математическое планирование численных расчетов переноса излучения в атмосферах планет.— *Астрон. журн.*, 60, № 5, 1983, с. 1016—1021.
2. *Ибрагимов К. Ю., Кириенко Г. А., Солодовник А. А.* Моделирование слоистообразной облачности в атмосфере Юпитера при наличии двух конденсатов.— *Алма-Ата, 1984.*—45 с.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 3814—84 Деп.
3. *Ибрагимов К. Ю., Кириенко Г. А., Солодовник А. А.* О формировании многоярусной слоистообразной облачности в атмосфере Сатурна.— *Алма-Ата, 1984.*—33 с.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 5914—84 Деп.
4. *Ибрагимов К. Ю., Солодовник А. А.* Моделирование двухфазных слоистообразных облаков при наличии двух конденсатов в атмосфере Юпитера.— *Письма в Астрон. журн.*, 1983, № 11, с. 686—690.
5. *Матвеев Л. Т.* Курс общей метеорологии: Физика атмосферы.— *Л.*: Гидрометеоздат, 1976.—876 с.
6. *Atreja S. K., Donahue T. M., Feston M. C.* Jupiter: structure and composition of the upper atmosphere.— *Astrophys. J.*, 1981, 247, N 1, p. 143—147.
7. *Cess R. O., Chen S. C.* The influence of ethane and acetylene upon the thermal structure of the Jovian atmosphere.— *Icarus*, 1975, 26, N 4, p. 444—450.
8. *Orton G. S., Ingersoll A. P., Froidevaux J. N. et al.* Scientific results from the Pioneer Saturn infrared radiometer.— *Adv. Space Res.*, 1981, 1, N 8, p. 179—182.
9. *Smith D. W., Greene T. F., Shorthile R. W.* The upper Jovian atmosphere aerosol content determined from a satellite eclipse observation.— *Icarus*, 1977, 30, N 4, p. 697—729.
10. *Stone P. H.* The meteorology of the Jovian atmosphere.— In: *Jupiter* / Ed. by T. Gehrels. Tucson (Ariz.): Univ. Arizona press, 1976, p. 586—618.
11. *Tyler G. L., Eshelman V. K., Anderson J. D. et al.* Radio science with Voyager 2 at Saturn atmosphere and ionosphere and the masses of Mimas, Tephys, and Japetus.— *Science*, 1982, 215, N 4532, p. 553—558.