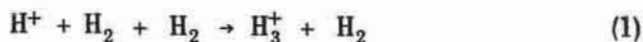


7. Модель ионосферы Юпитера

С. АТРЕЯ И Т. ДОНАХЬЮ*

Дан обзор основных концепций, используемых в настоящее время при построении моделей ионосферы Юпитера. Строится модель ионосферы на основе современных знаний о составе атмосферы, характерных химических и ион-молекулярных реакциях и соответствующих им константах скорости. Обсуждаются расхождения этой модели с профилем электронной концентрации, полученным из данных о радиозатмении "Пионера-10". Большая протяженность наблюдаемой верхней ионосферы может указывать на наличие горячей термосферы, своего рода короны. Некоторые особенности, наблюдаемые в профиле электронной концентрации, могут объясняться спорадическим слоем E , образованным сгущениями протонов и других ионов.

В прошлом было построено много моделей ионосферы Юпитера [2, 3, 7, 17, 20, 29, 34, 35, 37, 41, 46, 51]. Недавние пролеты КА "Пионер-10" и "Пионер-11" около Юпитера дали неоценимый вклад в наши знания о пространстве, окружающем Юпитер. Имея в виду природу результатов, полученных при первом прямом зондировании ионосферы Юпитера в эксперименте по радиозатмению "Пионера-10", и расхождение этих результатов с моделями, было бы неразумно уделять здесь много внимания обсуждению каждой из упомянутых выше моделей в отдельности. Мы отсылаем читателей к статьям Хантена [20], который дал обзор моделей ионосферы Юпитера по состоянию на 1969 г., Мак-Элроя [29] — на 1973 г. и работе Атрея и др. [3]. Работа Мак-Элроя существенна тем, что в ней было указано на значение диссоциативной ионизации H_2 — одного из процессов, которыми пренебрегалось раньше, в том числе в обзоре Хантена. В работе [3] Атрея и др. обращают внимание на реакцию тройных соударений



* The University of Michigan.

как на существенный сток ионизации на высотах ниже 220 км. В этой главе мы вначале опишем модель ионосферы Юпитера, основанную на последних данных о характерных химических реакциях и об их константах скорости, а также модель атмосферы, соответствующую общепринятому низкому значению температуры экзосферы, и затем обсудим, как следует изменить эту модель, чтобы удовлетворить данным наблюдений.

НЕЙТРАЛЬНАЯ АТМОСФЕРА

Верхняя атмосфера Юпитера состоит в основном из H_2 (67 км-амага), He (34 км-амага), CH_4 (45 м-амага), C_2H_2 ($2 \cdot 10^{-6}$ м-амага), C_2H_6 (10^{-4} м-амага). Обилие C_2H_2 и C_2H_6 определены ненадежно. Гелий в атмосфере Юпитера непосредственно был обнаружен лишь недавно Джаджем и Карлсоном [25] с помощью ультрафиолетового фотометра, установленного на борту "Пионера-10". Карлсон и Джадж [25] (см. наст. том, ст. 11) определили, что отношение смеси гелия в гомосфере равно $0,18^{+0,46}_{-0,12}$; Эллиот и др. [13] (см. наст. том, ст. 5) получили для этого отношения $0,19^{+0,35}_{-0,19}$ по наблюдению покрытия Юпитером β Скорпиона. Эти результаты не сильно отличаются от значения 0,11 для солнечного состава [21], хотя точность обоих измерений недостаточна для окончательных выводов. Интерпретация данных Муса и Ротмана [33] по альбедо Юпитера в линии $L\alpha$ дает для коэффициента турбулентной диффузии K в турбопаузе значение 10^6 см²/с [50] (см. наст. том, ст. 11). Стробл [43] из рассмотрений ультрафиолетового альбедо получил для нижней атмосферы значение $K = 2 \cdot 10^4$ см²/с. Эти значения K , однако, сомнительны [3], так как измеренная Мусом и Ротманом [33] высокая интенсивность линии $L\alpha$ (4,4 кРл) могла частично определяться излучением водородного тора вокруг Юпитера на орбите Ио [30]. Измерения Дженкинса и др. [23] с помощью Орбитальной астрономической обсерватории "Коперник" в действительности дали только 660 ± 350 Рл в линии $L\alpha$, которые могут быть приписаны собственно Юпитеру. Измерения Карлсона и Джаджа [8] с "Пионера-10" дают только 440 Рл в линии $L\alpha$, приходящих от самого диска Юпитера. На основе своих измерений излучения Юпитера в линии $L\alpha$ Карлсон и Джадж [8] нашли значение $K = 3 \cdot 10^8 \pm 1$ см²/с. Веверка и др. [48], исходя из своей интерпретации пиков на температурном профиле, полученном из данных о покрытии β Скорпиона, дают оценку $K \geq 7 \cdot 10^5$ см²/с. Все говорит, таким образом, за то, что коэффициент турбулентной диффузии больше 10^5 см²/с и может достигать 10^9 см²/с. В настоящее

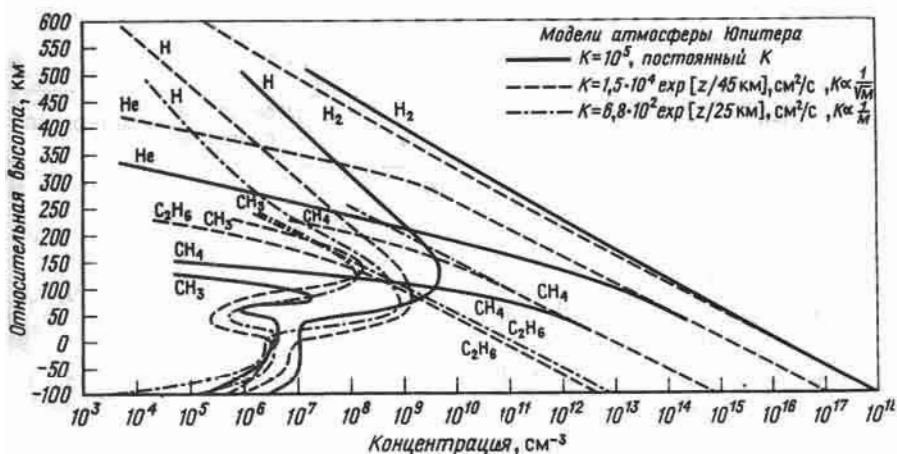


Рис. 1. Модели атмосферы Юпитера (концентрации углеводородов из [4] для $K = 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$, $K \propto M^{-1/2}$ и $K \propto M^{-1}$, где M — атмосферная концентрация. Температура термосферы предполагается постоянной, равной 150 К; для отношения смеси He/H_2 выбрано значение 0,1. Высота отсчитывается от уровня, на котором атмосферная концентрация составляет 10^{16} см^{-3} .

время температурный профиль верхней атмосферы определяется по данным о радиозатмении "Пионера", описанным в статье Клиоре и Войцешина (см. наст. том, ст. 3). Ввиду широкого диапазона возможных значений для отношения He/H_2 , для K и T мы выбираем модель нейтральной атмосферы Стробла [44], приемлемую, как и любая другая, для использования в наших расчетах, носящих иллюстративный характер. Эта модель, построенная для отношения $\text{He}/\text{H}_2 = 0,1$ и постоянной T_∞ , равной 150 К, показана на рис. 1. Расчеты проведены для различных значений K , причем включены только те углеводороды, которые, как сейчас полагают, существенны для ионосферы. В этой главе будет показано, как следует изменить эту модель атмосферы, чтобы объяснить измеренный профиль электронной концентрации.

ХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИОНОСФЕРА

В табл. 1 приведены реакции, характерные для ионосферы Юпитера, взятые из работы Атрея и Донахью [2]. Основным источником ионизации в этой модели является солнечное излучение в далекой ультрафиолетовой области спектра (EUV). (Мы отдаем себе отчет в потенциальной важности такого источника, как энергичные частицы

Таблица 1

Характерные реакции в ионосфере Юпитера

Номер реакц.	Реакция	Константа* скорости	Литература
Образование ионов			
p1	$H_2 + h\nu \rightarrow H_2^+ + e$		
p2	$\rightarrow H^+ + H + e$		
p3	$H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e$		
p4	$\rightarrow H^+ + H + 2e$		[29]
p5	$H + h\nu \rightarrow H^+ + e$		
p6	$H + e \rightarrow H^+ + 2e$		
p7	$He + h\nu \rightarrow He^+ + e$		
p8	$He + e \rightarrow He^+ + 2e$		
Перезарядка ионов			
e1	$H_2^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + H$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	[48]
e2	$H_2^+ + H \rightarrow H^+ + H_2$	$\sim 1,0 \cdot 10^{-10}$	[20]
e3	$He^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + He$	$\leq 20\%$	
e4	$\rightarrow HeH^+ + H$	$1,0 \cdot 10^{-13}$	[24]
e5	$\rightarrow H^+ + H + He$	$\geq 80\%$	
e6	$He^+ + CH_4 \rightarrow CH^+ + H_2 + H + He$	$2,4 \cdot 10^{-10}$	[22]
e7	$\rightarrow CH_2^+ + H_2 + He$	$9,3 \cdot 10^{-10}$	[22]
e8	$\rightarrow CH_3^+ + H_2 + He$	$6,0 \cdot 10^{-11}$	[22]
e9	$\rightarrow CH_4^+ + He$	$4,0 \cdot 10^{-11}$	[22]
e10	$H^+ + H_2 + H_2 \rightarrow H_3^+ + H_2$	$3,2 \cdot 10^{-29}$	[31]
e11	$H^+ + CH_4 \rightarrow CH_3^+ + H_2$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	[22]
e12	$\rightarrow CH_4^+ + H$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	[22]
e13	$HeH^+ + H_2 \rightarrow H_3^+ + He$	$1,85 \cdot 10^{-9}$	[48]
e14	$H_3^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + H_2$	$2,4 \cdot 10^{-9}$	[22]
e15	$CH^+ + H_2 \rightarrow CH_2^+ + H$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	[22]
e16	$CH_2^+ + H_2 \rightarrow CH_3^+ + H$	$7,2 \cdot 10^{-10}$	[22]
e17	$CH_3^+ + CH_4 \rightarrow C_2H_5^+ + H_2$	$8,9 \cdot 10^{-10}$	[22]
e18	$CH_4^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + CH_3$	$1,11 \cdot 10^{-9}$	[22]
e19	$CH_4^+ + H_2 \rightarrow CH_5^+ + H$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	[22]

* Константы скорости для реакций двойных соударений приведены в см³/с и для реакций тройных соударений в см⁶/с (согласно [2]).

Продолжение табл. 1

Исчезновение ионов (электрон-ионная рекомбинация)

r1	$\text{H}_3^+ + e \rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	[27]
r2	$\text{H}_2^+ + e \rightarrow \text{H} + \text{H}$	$< 1,0 \cdot 10^{-8}$	[20]
r3	$\text{HeH}^+ + e \rightarrow \text{He} + \text{H}$	$\sim 1,0 \cdot 10^{-8}$	[20]
r4	$\text{H}^+ + e \rightarrow \text{H} + h\nu$	$6,6 \cdot 10^{-12}$	[4]
r5	$\text{He}^+ + e \rightarrow \text{He} + h\nu$	$6,6 \cdot 10^{-12}$	[4]
r6	$\text{CH}_5^+ + e \rightarrow$	} нейтралы	[36]
r7	$\text{C}_2\text{H}_5^+ + e \rightarrow$		

магнитосферы, но пока не знаем, как моделировать такой источник.) Непрерывное поглощение излучения атомным водородом начинается с длин волн короче 911 \AA , молекулярным водородом – короче 912 \AA и гелием – короче 504 \AA . Соответствующие сечения фотопоглощения и фотоионизации взяты из работ Кука и Метцгера [10], Стюарта и Вебба [42], Сэмсона и Кэрнса [40] и Сэмсона [38]. Стробл (1974, частное сообщение) оценивает верхний предел для сечения фотоионизации метильного радикала CH_3 в $2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$; потенциал ионизации этого радикала равен $9,82 \pm 0,04 \text{ эВ}$ [12]. Важный процесс фотоионизации метильного радикала обсуждался недавно Атреей и Донахью [2], а также Прасадом и Таном [35]. Последние авторы допускают неприемлемо большие значения для сечения ионизации радикала CH_3 и для потока солнечного излучения в линии $L\alpha$ на Юпитере. Предполагается, что фотоионизация CH_3 обусловлена главным образом солнечной линией $L\alpha$. По предложению Стробла [44] Атрея и Донахью [2] исследовали фотолит метана в далекой УФ-области как дополнительный источник стратосферной ионизации. Они получили, что вклад ионизации CH_4 в суммарную электронную концентрацию менее 3%. (По меньшей мере 90% начальных положительных ионов, возникающих при фотоионизации CH_4 излучением с длинами волн короче 945 \AA , составляют CH_4^+ и CH_3^+ [36].) За малый вклад этого источника электронов ответственно сильное поглощение молекулярным водородом в соответствующем участке длин волн. Что касается скоростей образования ионов, то мы хотим подчеркнуть важность процесса диссоциативной фотоионизации H_2 как источника H^+ [29]. В этой главе мы объединяем последние данные Монахана и др. [32], Браунинга и Фрайера [6] и Сэмсона [39] для доли диссоциативной фотоионизации

H_2 в образовании протонов. Скорости образования ионов для модели, в которой K меняется обратно пропорционально корню квадратному из атмосферной концентрации ($K = 3 \cdot 10^7$ см²/с в турбопаузе), показаны на рис. 2. Для этих вычислений использовались солнечные ультрафиолетовые потоки по данным Хинтереггера [19], приведенные к расстоянию до Юпитера. В верхней ионосфере, где времена жизни основного иона (H^+) много больше юпитерианского дня, при построении средних суточных моделей потоки уменьшались наполовину. Зенитный угол Солнца принимался равным 60° . Интервал длин волн между 0 и 960 \AA разделялся на участки длиной 5 \AA , и сечения соответствующих реакций усреднялись по каждому участку. Из рис. 2 видно, что диссоциативная фотоионизация H_2 обеспечивает доминирующий источник юпитерианских протонов, в то время как образованием H^+ посредством прямой фотоионизации H можно пренебречь. Образование ионов на самых низких высотах обусловлено проникновением рентгеновского излучения с длинами волн короче 100 \AA . Следует, однако, отметить, что как солнечный ультрафиолетовый поток, так и соответствующие сечения в области жестких рентгеновских лучей определены крайне ненадежно. Поэтому современная картина

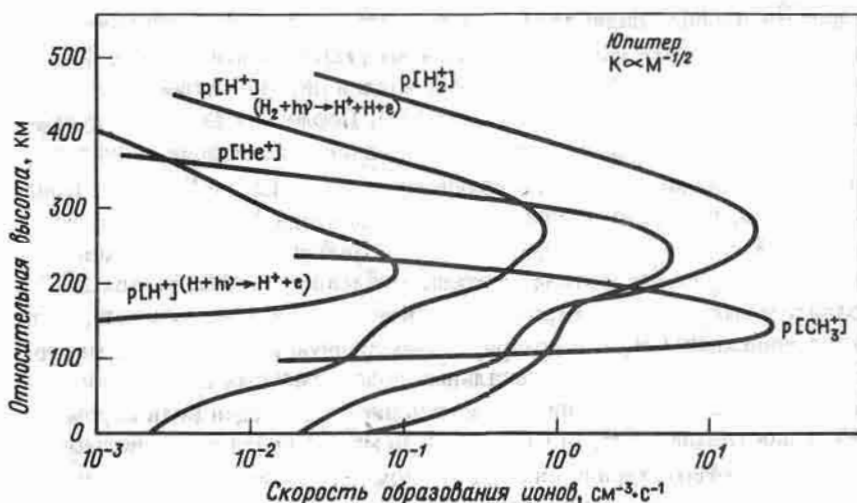


Рис. 2. Скорости образования ионов фотоионизацией $\rho(X^+)$ для модели с $K \propto M^{-1/2}$ ($K \approx 3 \cdot 10^7$ см²/с в турбопаузе). Диссоциативная фотоионизация H_2 является основным источником образования H^+ . Шкала высот та же, что на рис. 1.

образования ионов на самых низких высотах может быть изменена, когда станут доступны лучшие данные. Образование ионов H^+ посредством прямой фотоионизации H ниже 150 км пренебрежимо мало из-за поглощения H_2 в соответствующей области длин волн. Образование ионов CH_3^+ происходит в очень узкой области высот, так как излучение, ответственное за ионизацию CH_3 (в основном солнечная линия $L\alpha$), ниже турбопаузы сильно поглощается метаном. Нейтрализация ионов проходит через различные промежуточные реакции с другими атмосферными компонентами, а конечные механизмы электронно-ионной рекомбинации представлены в табл. 1. Ионы H_2^+ превращаются в H_3^+ (реакция $e1$) в нижней атмосфере, где велика концентрация H_2 , в то время как в верхней атмосфере они образуют H^+ (реакция $e2$) или диссоциативно рекомбинируют с электронами (реакция $r2$). Выше метановой турбопаузы ионы He^+ исчезают в основном в реакциях с H_2 ($e3 - e5$); в то же время основная часть ионов He^+ исчезает так же, как H^+ . Ниже метановой турбопаузы He^+ преимущественно взаимодействует с CH_4 с образованием различных углеводородных ионов (реакции $e6 - e9$). Протоны на высоте максимума электронной концентрации $[N_e]_{max}$ и выше устраняются радиативной рекомбинацией с электронами (реакция $r4$), на высотах между максимумом электронной концентрации и турбопаузой — реакцией тройных соударений (реакция $e10$) и ниже турбопаузы — метаном (реакции $e11$ и $e12$). Значение реакции тройных соударений ($e10$) как быстрого пути утечки юпитерианских протонов впервые было показано независимо Далгарно [11] и Донахью (см. [29]). Образующиеся в реакциях $e1$, $e10$, $e13$ ионы H_3^+ в области турбопаузы быстро взаимодействуют с CH_4 с образованием ионов CH_5^+ ; выше турбопаузы они нейтрализуются диссоциативной рекомбинацией с электронами (реакция $r1$). Образующиеся в химических реакциях различные углеводородные ионы в конечном счете объединяются в ионы с большим числом атомов CH_5^+ и $C_2H_5^+$, которые затем быстро нейтрализуются диссоциативной рекомбинацией с электронами (реакции $r6$ и $r7$). Значение метана как возможного пути утечки ионов H^+ на низких высотах впервые было показано Мак-Эдроом [29]. Позднее Атрея и Донахью [1] расширили этот путь утечки, включив в него ионы He^+ и H_3^+ . Когда стало доступно больше данных о константах скорости углеводородных реакций [22], роль углеводородов в нижней ионосфере Юпитера была обсуждена Прасадом и Таном [35] и Атреей и Донахью [2]. Распределение ионов было получено в предположении фотохимического равновесия путем численного решения связанных одномерных уравнений неразрывности. Результаты этих вычислений даны на рис. 3. Профиль электронной кон-

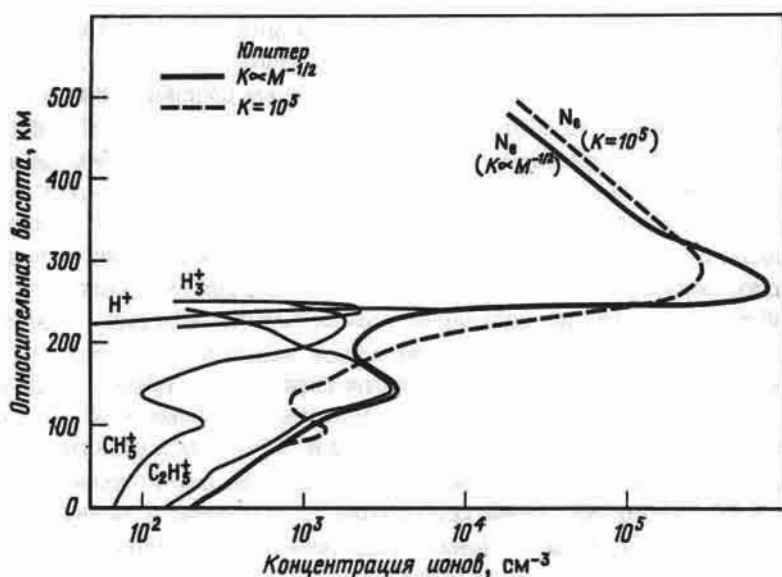


Рис. 3. Профили электронной концентрации в атмосфере Юпитера, рассчитанные для случаев $K = 10^5$ см²/с и $K \propto M^{-1/2}$. Вторичный пик в профиле N_e на низких высотах обусловлен ионами CH_5^+ . Распределение ионов показано только для модели с $K \propto M^{-1/2}$. Шкала высот та же, что на рис. 1.

центрации (N_e) дан для постоянного значения коэффициента турбулентной диффузии $K = 10^5$ см²/с и для K , изменяющегося с высотой. Максимум электронной концентрации в модели с большими значениями K почти в три раза выше, чем в модели с $K = 10^5$ см²/с. Это объясняется тем, что при больших K концентрация Ne не остается относительно высокой для существенно больших высот, и гелий становится важным источником юпитерианских протонов из-за реакций $e5$. Для понимания связи между K и гелиевым источником важно точное определение константы скорости $e5$ в сравнении с суммарной скоростью реакций $e3$, $e4$, $e5$. Профили распределения ионов на рис. 3 соответствуют модели, в которой K изменяется по описанному выше закону. H^+ — основной ион вплоть до высоты максимума электронной концентрации; H_3^+ доминирует в небольшой области ниже максимума электронной концентрации, и ниже этого перехода основными ионами являются CH_5^+ и C_2H_5^+ . Небольшое увеличение концентрации CH_5^+ между 140 и 220 км обусловлено окончательным превращением H_3^+ , H^+ и He^+ в CH_5^+ . Вторичный пик в электронной концентрации около ~ 150 км (в модели с изменяющимся K) обусловлен максимумом в образовании ионов CH_5^+ на этой высоте.

ВЫВОДЫ

Показанные на рис. 3 профили электронной концентрации по существу аналогичны модели Атрея и др. [3], построенной до пролета "Пионера-10"; добавлены только некоторые уточнения, обсужденные выше. Обращение данных по радиозатмению "Пионера-10" усложняется неоднозначностью пути прохождения сигналов в частотном диапазоне S [26]. Из предварительных анализов доплеровских данных [15] видно, что профиль электронной концентрации показывает гораздо больше деталей, чем профиль, который дает только что построенная модель. На рис. 4 сплошной линией показаны профили электронной концентрации, полученные из эксперимента по радиозатмению во время прохождения космического аппарата за Юпитер в конце дня 4 декабря 1973 г., когда зенитный угол Солнца $\xi = 81^\circ$. Высота отсчитывается от уровня, на котором преломляющая способность равна 10. Приведенная на рис. 3 модель ионосферы для переменного K до высоты пика $L5$ имеет некоторое сходство с данными измерений. Однако выше этого уровня электронная концентрация в модели спадает в пределах 300 км приблизительно до 10^3 см^{-3} , в то время как измеренная электронная концентрация остается весьма высокой еще примерно для 3000 км. Мы попытаемся объяснить это огромное расхождение для верхней ионосферы возможным существованием "горячей термосферы", т.е. в модели атмосферы те же плотности будут соответствовать значительно большим высотам. Источник такого термосферного нагрева, видимо, должен располагаться в нижней атмосфере в виде инерционных гравитационных волн. Френч и Гиращ [16] впервые обсудили такую возможность с целью объяснить необычный температурный профиль, полученный Веверкой и др. [48] из обращения данных по покрытию β Скорпиона. Френч и Гиращ [16] утверждают, что наблюдаемые колебания в температурном профиле обусловлены распространяющимися инерционными гравитационными волнами, а отсутствие всплесков (всплесков на кривой световой интенсивности) при концентрациях, меньших 10^{13} см^{-3} , говорит в пользу распространения энергии в направлении снизу вверх с затуханием волн выше уровня мезопаузы. По их расчетам соответствующий поток энергии должен быть около $3,4 \text{ эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, примерно на два порядка величины больше, чем солнечный ультрафиолетовый поток, поглощаемый выше мезопаузы Юпитера [45]. Мак-Элрой (1975, частное сообщение) расширил расчеты Стробла и Смита [45] с учетом диссипации и последующего поглощения энергии инерционных гравитационных волн в термосфере. Поглощаемая на уровне z термосферы энергия перете-

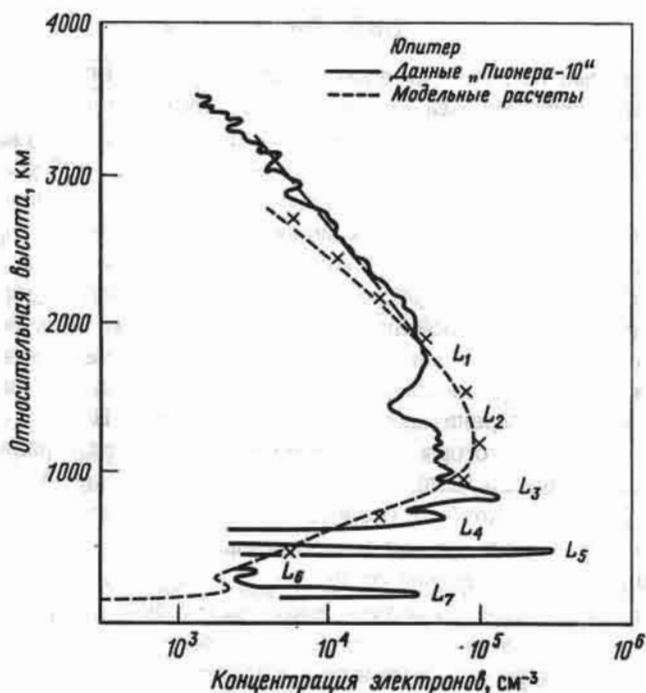


Рис. 4. Сравнение профиля электронной концентрации, полученного в эксперименте по радиозатмению "Пионера-10" с расчетами, основанными на модели горячей термосферы. Измеренный профиль соответствует прохождению космического аппарата за Юпитер в конце дня на 26° северной широты при зенитном угле Солнца $\xi = 81^\circ$. Кривая, обозначенная мелким пунктиром, относится в расчетах с $\xi = 81^\circ$, $T_e \approx T_i \approx T_n$ и с коэффициентом радиативной рекомбинации α_r (рекомбинация H^+ и He^+), пропорциональным $T_e^{-0,5}$. Для $\alpha_r \propto T_e^{-0,75}$ положение кривой определяется крестиками. Диффузионно-равновесное распределение показано крупным пунктиром для случая $\alpha_r \propto T_e^{-0,5}$. Высота отсчитывается от уровня, на котором преломляющая способность равна 10 (см. [15]).

кает вниз и излучается в районе мезоспаузы молекулами CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 и т.п. [45]. Разность температур ΔT между z_0 и z определяется следующим соотношением [45]:

$$\Delta T = T(z) - T_0 = \frac{\Delta z}{\kappa} \mathcal{F}(z), \quad (2)$$

где $\mathcal{F}(z)$ – поток энергии, связанный с инерционными гравитацион-

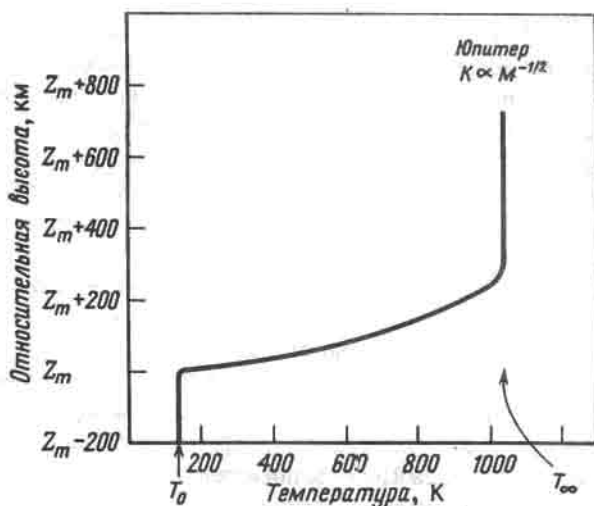


Рис. 5. Температурный профиль верхней атмосферы Юпитера, рассчитанный с учетом диссипации распространяющихся вверх инерционных гравитационных волн. Высота отсчитывается от уровня мезопаузы Z_m , соответствующего концентрации 10^{13} см^{-3} . Температура мезопаузы T_0 взята равной 150 К; температура экзосферы T_∞ оценена в $\sim 1050 \text{ К}$.

ными волнами, и κ — теплопроводность основного газа H_2 (согласно Строблу и Смиуту [45], около $68,6 T(z)$ эрг/(см · с · К²). Сравнивая полученный с помощью "Пионера-10" профиль электронной концентрации (показанный на рис. 4) и модель ионосферы на рис. 3, можно сделать вывод, что основная часть приносимой инерционными гравитационными волнами энергии рассеивается на высотах примерно до 250 км выше мезопаузы (т.е. $\Delta z = 250 \text{ км}$). По приведенным выше параметрам мы рассчитали температурный профиль верхней атмосферы Юпитера. Результаты наших расчетов изображены на рис. 5; по нашей оценке, температура экзосферы T_∞ должна быть примерно на 900 К выше температуры мезопаузы. По параметрам нижней границы мезопаузы ($T_0 = 150 \text{ К}$, $n(\text{H}_2) = 10^{13} \text{ см}^{-3}$) и вычисленной T_∞ мы получили профиль атмосферной концентрации (по существу H_2 , если речь идет о верхней ионосфере) над мезопаузой, включая термосферу. Затем способом, который был описан в этой статье, мы рассчитали профиль электронной концентрации для этой горячей модели термосферы. Согласно Генри и Мак-Элроу [18], мы предполагаем, что между электронами, ионами и нейтральными молекулами

поддерживается тепловое равновесие (т.е. $T_e \approx T_i \approx T_n$). Исчезновение протонов, являющихся основными ионами на высотах термосферы, определяется процессом радиативной рекомбинации с электронами. Предполагалось, что зависимость скорости радиативной рекомбинации α_r протонов от электронной температуры имеет вид $T_e^{-0,5}$ [4]. Мелким пунктиром на рис. 4 показан рассчитанный для этой горячей модели термосферы профиль электронной концентрации, если положить $\xi = 81^\circ$, $T_e \approx T_i \approx T_n$ и $\alpha_r \propto T_e^{-0,5}$. Если положить α_r пропорциональным $T_e^{-0,75}$ [5], получаем профиль, отмеченный на рис. 4 крестиками. Как и следовало ожидать, ниже термосферы модель рис. 4 не отличается существенно от модели, показанной на рис. 3. По нашим расчетам эффекты переноса становятся существенными выше ~ 1500 км (рис. 4), где постоянная времени диффузии меньше фотохимической постоянной времени. Диффузионно-равновесное распределение протонов выше 1500 км показано на рис. 4 крупным пунктиром. Если пренебречь изображенными на рис. 4 разнообразными слоями $L1 - L7$, которые должны быть в профиле N_e по данным радиозатмения, то наблюдается достаточно хорошее согласие (непрерывно в пределах двух раз для всех высот) между измерениями и моделью, изображенной пунктиром на рис. 4. Мы не пытаемся строить модель, которая бы в точности соответствовала измеренному профилю, так как измерения не вполне однозначны. Целью этих вычислений является показать, что наши представления о термосфере Юпитера, видимо, должны быть пересмотрены, имея в виду измеренный "Пионером-10" профиль верхней ионосферы. Однако легко видеть, что даже небольшое изменение температурной структуры термосферы позволило бы лучше согласовать теорию с результатами измерений.

Постоянная времени исчезновения протонов на высоте $L5$ порядка 10^4 с и растет до 10^7 с на высоте $L1$. На этих высотах долгоживущие протоны под совместным воздействием магнитного поля Юпитера и возможных горизонтальных ветров (или распространяющихся вертикальных волн) будут группироваться в слои около положений нулевых точек или узлов. Это явление можно сравнить со слоением спорадического слоя E в земной ионосфере. Похоже, что слой $L7$ располагается на уровне максимального образования ионов CH_3^+ . Идентификация слоя $L7$ с образованием ионов CH_3^+ , однако, была бы преждевременной. Это обусловлено тем, что даже небольшое уменьшение (в 4 раза) отношения $\sigma_I(\text{CH}_3)/r_7$ стерло бы эту особенность в профиле N_e . Предварительные результаты Майера и Фессен-

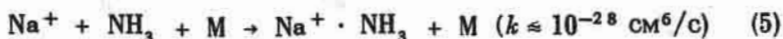
дена [28] дают значение τ_7 вдвое больше, чем значение, данное Роббером и др. [36]; используемое здесь значение $\sigma_I(\text{CH}_3)$ является верхним пределом. Более того, C_2H_5^+ , возможно, не является конечным ионом в реакции $\epsilon 17$. Новые измерения говорят о том, что C_2H_5^+ быстро взаимодействуют с C_2H_4 и C_2H_2 при комнатной температуре с образованием ионов углеводородов большего числа атомов C_3H_5^+ и C_4H_7^+ :



и



Таким образом, в отношении $\sigma_I(\text{CH}_3)/\tau$, возможно, должны входить скорости рекомбинации C_3H_5^+ и C_4H_5^+ . Пока нет никаких данных об этих скоростях. Ввиду этого мы считаем идентификацию пика L7 (обусловленного CH_3^+) в лучшем случае сомнительной. Высота слоя L7 совпадает с нижним пиком (обусловленным CH_3^+) в модели с переменным K ; этот пик располагается примерно на 50 км ниже в модели с низким K ($K = 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$) (рис. 3.). Слои L6 и L7, вероятно, могут быть обусловлены связанными с Ио ионами натрия, которые проникают до нижней ионосферы Юпитера, как предположили Атрея и др. [3] в своей модели, предшествующей пролету "Пионера-10". Исчезновение Na^+ в радиативной рекомбинации происходит очень медленно ($\tau \approx 10^6 \text{ с}$), с константой скорости порядка $10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$. Это единственный вероятный механизм исчезновения таких ионов в атмосфере Юпитера. Другим путем может быть объединение с аммиаком в присутствии третьего тела с последующей диссоциативной рекомбинацией объединения в таких реакциях:



и затем



Однако устранение ионов натрия аммиаком в атмосфере Юпитера выглядит маловероятным из-за исключительно низких концентраций NH_3 на высотах ионосферы. Вероятно, присутствуют ионы других металлов, кроме натрия, либо присущих самому Юпитеру, либо принесенных из тора. Такими потенциально долгоживущими ионами можно было бы объяснить некоторые слои в профиле электронной концентрации. Однако никоим образом не показано, что ионы натрия от Ио могут проникать в атмосферу Юпитера в количестве, достаточном для объяснения слоев L6 и L7.

Нам помогли исчерпывающие дискуссии с Хантеном по данным о радиозатмении КА "Пионер-10", с Мак-Элроем о нагреве термосферы Юпитера и с Строблом о фотоллизе углеводородов. Эта работа субсидировалась Национальной обсерваторией Китт-Пик согласно контракту с Национальным научным фондом и при поддержке Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту NAS7-100.

ДИСКУССИЯ

Хантен. Предположение, что ионы натрия спускаются от Ио по силовым линиям к Юпитеру, интересно, но имеет одну большую сложность. Было много работ о Юпитере как о центробежном ускорителе, основанных на идее, что магнитное поле закручивает ионы со скоростями, значительно превышающими кеплеровскую. Действующая на них результирующая сила направлена строго наружу. Может быть, можно найти способ обойти эту сложность, но ситуация едва ли так проста, как вначале предположили Атрея и др. [3].

Атрея. Я хочу сделать два комментария к этому замечанию: 1) Как нами было отмечено в статье, источник возможных в стратосфере Юпитера ионов натрия определенно не установлен; 2) может оказаться, что мы пытаемся объяснить те черты в профиле электронной концентрации по данным "Пионера-10", которых в действительности нет. Относительно источника ионов натрия я думаю, что натрий от Ио — только одна из нескольких возможностей. Присущий Юпитеру или приносимый метеоритами натрий, например, представляет собой другую возможность. Справедливость этих гипотез еще требует проверки. Мой второй комментарий относится к проведенному Фьелдбо анализу данных по КА "Пионер-10, -11". Фьелдбо и др. [15] установили, что ионизационные пики L6 и L7 не имеет четких очертаний в радиозаписях, и вместо реальных слоев эти вычисленные пики ионизации могут быть вызваны мерцающим шумом или отклонениями от сферической симметрии. Вот почему мы привлекли гипотезы о ионах металлов для точного объяснения "слоев" L6 и L7. На уровне слоя L5 и выше время жизни протонов достаточно велико, чтобы они вели себя аналогично ионам металлов при разделении на слои подобно спорадическому слою E.

ЛИТЕРАТУРА

1. ATREYA S.K., DONAHUE T.M., Ionospheric models of Saturn, Uranus and Neptune, *Icarus*, 24, 358 — 362, 1975.

2. ATREYA S.K., DONAHUE T.M., The role of hydrocarbon in the ionospheres of the outer planets, *Icarus*, **25**, 335 – 338, 1975.
3. ATREYA S.K., DONAHUE T.M., MCELROY M.B., Jupiter's ionosphere: prospects for Pioneer 10, *Science*, **184**, 154 – 156, 1974.
4. BATES D.R., DALGARNO A., Electronic recombination, atomic and molecular processes, ed. D.R. Bates, Academic Press, New York, 1962, p. 245.
5. BAUER S.J., Physics of planetary ionospheres, Springer-Verlag, New York, 1973, p. 84.
6. BROWNING R., FRYAR J., Dissociative photoionisation of H₂ and D₂ through the 1s σ_g ionic state, *Proc. Phys. Soc. London (At. Mol. Phys.)*, **6**, 364 – 371, 1973.
7. CAPONE L.A., PRASAD S.S., Jovian ionospheric models, *Icarus*, **20**, 200 – 212, 1973.
8. CARLSON R.W., JUDGE D.L., Pioneer 10 ultraviolet photometer observations at Jupiter encounter, *J. Geophys. Res.*, **79**, 3623 – 3633, 1974.
9. CHASE S.C., RUIZ R.D., MÜNCH J., NEUGEBAUER J., SCHROEDER M., TRAFTON L.M., Pioneer 10 infrared radiometer experiment: preliminary results., *Science*, **183**, 315 – 317, 1974.
10. COOK G.R., METZGER P.H., Photoionisation and absorption cross sections of H₂ and D₂ in the vacuum ultraviolet region, *J. Opt. Soc. Amer.*, **54** (8), 968 – 972, 1964.
11. DALGARNO A., Applications in aeronomy. Physics of electronic and atomic collisions, VII ICPEAC, eds. F.R. Grover and F.J. de Heer, Amsterdam, North Holland Publishing Co, 1971, pp. 381 – 398.
12. ELDER F.A., GEISE C., STEINER B., INGRAM M., Photoionisation of alkyl-free radicals, *J. Chem. Phys.*, **36**, 3292 – 3296, 1962.
13. ELLIOTT J.L., WASSERMAN L.H., VEVERKA J., SAGAN C., LILLER W., The occultation of Beta Scorpii by Jupiter. 2. The hydrogen-helium abundance in the Jovian atmosphere, *Astrophys. J.*, **190**, 719 – 729, 1974.
14. FINK U. BELTON M.J.S., Collision-narrowed curves of growth for H₂ applied to new photoelectronic observations of Jupiter, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 952 – 962, 1969.
15. FJELDBO G., KLIORÉ A.J., SEIDEL B., SWEETNAM D., CAIN D., The Pioneer 10 radio occultation measurement of the ionosphere of Jupiter, *Astron. Astrophys.*, **39**, 91 – 96, 1975.
16. FRENCH R.G., GIERASCH P.J., Waves in the Jovian upper atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 1707 – 1712, 1974.
17. GROSS S.H., RASOOL S.I., The upper atmosphere of Jupiter, *Icarus*, **3**, 311 – 322, 1964.
18. HENRY R.J.W., MCELROY M.B., The absorption of extreme ultraviolet solar radiation by Jupiter's upper atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 912 – 917, 1969.

19. HINTEREGGER H.E., The extreme ultraviolet solar spectrum and its variation during the solar cycle, *Ann. Geophys.*, **26**, 547 – 554, 1970.
20. HUNTEN D.M., The upper atmosphere of Jupiter, *J. Atmos. Sci.*, **26**, 826 – 834, 1969.
21. HUNTEN D.M., MÜNCH G., The helium abundance on Jupiter, *Space Sci. Rev.*, **14**, 433 – 443, 1973.
22. HUNTRESS W.T., Jr. A review of Jovian ionospheric chemistry, *Advances in atomic and molecular physics*, eds. D.R. Bates and B. Beaderson, New York, Academic Press, 1974, pp. 295 – 340.
23. JENKINS E.B., WALLACE L., DRAKE J.F., 1973. Неопубликованные результаты ОАО "Коперник" ; см. дискуссию в [8].
24. JOHNSEN R., BIONDI M.A., Measurements of positive ion conversation and removal reactions relating to the Jovian ionosphere, *Icarus*, **23**, 139 – 142, 1974.
25. JUDGE D.L., CARLSON R.W., Pioneer 10 observations of the ultraviolet glow in the vicinity of Jupiter, *Science*, **183**, 317 – 320, 1974.
26. KLIORÉ A., CAIN D.L., FJELDBO G., SEIDEL B.L., Preliminary results on the atmospheres of Io and Jupiter from the Pioneer 10 S-band occultation experiment, *Science*, **183**, 323 – 324, 1974.
27. LEU M.T., BIONDI M.A., JOHNSEN R., Dissociative recombination of electrons with H_3^+ and H_5^+ ions, *Phys. Rev.*, **8**, 413 – 419, 1973.
28. MAIER H.N., FESSENDEN R.W., Electron ion recombination rate constants for some compounds of moderate complexity, *J. Chem. Phys.*, **62**, 4790 – 4795, 1975.
29. MCELROY M.B., The ionosphere of the major planets, *Space Sci. Rev.*, **14**, 460 – 473, 1973.
30. MCELROY M.B., JUNG Y.L., BROWN R.A., Sodium emission from Io: implications, *Astrophys. J.*, **187**, L127 – L130, 1974.
31. MILLER T.M., MOSELEY J.T., MARTIN D.W., MCDANIEL E.W., Reactions of H^+ in H_2 and D^+ in D_2 ; mobilities of hydrogen and alkali ions in H_2 and D_2 gases, *Phys. Rev.*, **173**, 115 – 123, 1968.
32. MONAHAN K.M., HUNTRESS W.T., Jr., LANE A.L., AJELLO J., BURKE T.G., LEBRETON P., WILLIAMSON A., Cross sections for the dissociative photoionisation of hydrogen by 584 Å radiation: the formation of protons in the Jovian ionosphere, *Planet. Space. Sci.*, **22**, 143 – 149, 1974.
33. MOOS H.W., ROTTMAN G.J., The far ultraviolet emission spectrum of Jupiter, *Bull. Amer. Astron. Soc.*, **4**, 360, 1972.
34. PRASAD S.S., CAPONE L.A., The Jovian ionosphere: composition and temperatures, *Icarus*, **15**, 45 – 55, 1971.

35. PRASAD S.S., TAN A., The Jovian ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **1**, 337 – 340, 1974.
36. REBBERT R.E., LIAS S.G., AUSLOOS P., Pulse radialysis of methane, *J. Res Nat. Bur. Stand. (U.S.)*, **77A**, 249 – 257, 1973.
37. RISHBETH H., The ionosphere of Jupiter, *Aust. J. Phys.*, **12**, 466 – 468, 1959.
38. SAMSON J.A.R., The measurement of the photoionisation cross sections of the atomic gases, *Adv. At. Mol. Phys.*, **2**, 177 – 261, 1966.
39. SAMSON J.A.R., Observation of double electron excitation in H_2 by photoelectron spectroscopy, *Chem. Phys. Lett.*, **12**, 625 – 627, 1972.
40. SAMSON J.A.R., CAIRNS R.B., Total absorption cross sections of H_2 , N_2 , and O_2 in the region 550 – 200 Å, *J. Opt. Soc. Amer.*, **55**, 1035, 1965.
41. SHIMIZU M., The upper atmosphere of Jupiter, *Icarus*, **14**, 273 – 281, 1971.
42. STEWART A.L., WEBB T.G., Photoionization of helium and ionized lithium, *Proc. Phys. Soc. London*, **82**, 522 – 536, 1963.
43. STROBEL D.F., The photochemistry of hydrocarbons in the Jovian atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 489 – 498, 1973.
44. STROBEL D.F., Aeronomy of the major planets: photochemistry of ammonia and hydrocarbons, *Rev. Geophys. Space Phys.*, **13**, 372 – 382, 1975.
45. STROBEL D.F., SMITH G.R., On the temperature of the Jovian thermosphere, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 718 – 725, 1973.
46. TANAKA T., HIRAO K., Structure and time variations of the ionosphere, *Planet. Space Sci.*, **21**, 751 – 762, 1973.
47. THEARD L.P., HUNTRESS W.T., Jr., Ion-molecule reactions and vibrational deactivation of H_2^+ ions in mixtures of hydrogen and helium, *J. Chem. Phys.*, **60**, 2840 – 2848, 1974.
48. VEVERKA J., ELLIOT J., WASSERMAN L., SAGAN C., The upper atmosphere of Jupiter, *Astron. J.*, **179**, 73 – 84, 1974.
49. WALLACE L., HUNTEN D.M., The Lyman alpha albedo of Jupiter, *Astrophys. J.*, **182**, 1013 – 1031, 1973.
50. ZABRISKIE F.R., Studies on the atmosphere of Jupiter, Ph. D. dissertation, Princeton Univ., Princeton, New Jersey, 1960.