

Г. М. МАРТЫНКЕВИЧ

**О ПРИРОДЕ И МЕХАНИЗМАХ ОБРАЗОВАНИЯ ИОНОВ
17⁺, 18⁺, 19⁺ И 44⁺ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ**

(Представлено академиком Е. К. Федоровым 25 VII 1973)

Ранее уже была предпринята успешная попытка показать, что ионы 18⁺ (H₂O⁺) в методически корректных экспериментах (ракетных и спутниковых) имеют атмосферное происхождение (¹). Ниже приведено более строгое доказательство того, что ионы 18⁺ (H₂O⁺), 19⁺ (H₃O⁺), 17⁺ (OH⁺) и 44⁺ (?) имеют атмосферное происхождение, и предложены механизмы их образования в ионосфере.

Введем необходимые обозначения. Пусть u — скорость движения масс-спектрометра, установленного на ракете или спутнике и анализирующего одновременно ионы и нейтралы (см., например, (², ³)), n_i , n_{i^+} , v_i , v_{i^+} — числовые плотности и наиболее вероятные скорости i -го нейтрала и иона соответственно, R — радиус входного отверстия анализатора, γ_i — скорости ионно-молекулярных реакций i -го нейтрала или иона.

Обратимся к доказательству, справедливому при следующих предположениях:

- 1) $u \gg v_i$, $u \gg v_{i^+}$.
- 2) Любой нейтрал неатмосферного происхождения при первом же столкновении приобретает скорость атмосферных частиц.
- 3) Источник молекул неатмосферного происхождения имеет форму сферы радиуса R и постоянную мощность.
- 4) Молекулы неатмосферной природы не имеют упорядоченной скорости относительно масс-спектрометра и в связанной с ним системе отсчета распределены в пространстве по закону

$$n_i(r) = n_{ir}(R/r)^2. \quad (1)$$

- 5) Молекулы H₂O и CO₂ образуются внутри масс-анализатора, первые вследствие рекомбинации атмосферных атомов Н и О (¹), что окончательно показано ниже, вторые — за счет реакции атмосферного кислорода с углеродом накаливаемого катода, что показано в (⁴).

Доказательству рекомбинационной, а не десорбционной природы молекул H₂O был посвящен специальный эксперимент, произведенный 8 X 1971 г. в п. Волгоград на ракете МР-12 с помощью времяпролетного (ВМС типа МХ-5402) и радиочастотного (РЧМС типа МХ-6407П) масс-спектрометров, установленных так, что входные отверстия обоих анализаторов РЧМС «видят» практически весь анализатор ВМС, тогда как последний не «видит» абсолютно никаких десорбирующих поверхностей.

Если вклад десорбированных молекул H₂O в измеренную числовую плотность этих молекул велик по сравнению с суммарным вкладом рекомбинации и атмосферы, то РЧМС, во входное отверстие анализатора средних масс которого могут напрямую с необезгаженных («видимых» входным отверстием) поверхностей анализатора ВМС проникать десорбированные молекулы H₂O, должен регистрировать гораздо большую, чем ВМС, во входное отверстие анализатора которого десорбированные молекулы могут попасть только после отражения от атмосферных, абсолютную и относительную концентрацию молекул H₂O. Согласно теории (⁵) разница меж-

ду концентрациями молекул H_2O , измеренными РЧМС (прямой десорбированный поток) и ВМС (отраженный поток), должна с учетом реальной геометрии достигать 2–3 порядков. Измеренная же разница в пределах погрешности измерений отсутствует, что и является убедительным доказательством рекомбинационной и атмосферной природы молекул H_2O во всех трех анализаторах. Это неоднократно отмечалось ранее ⁽¹⁾, но на основании только расчетов.

Для расчета распределения концентрации любого иона неатмосферного происхождения воспользуемся уравнением неразрывности с источниками q_{i^+} и стоками l_{i^+} . Оно имеет вид

$$dn_{i^+}/dt + n_{i^+} \operatorname{div} \mathbf{u} = q_{i^+} - l_{i^+}.$$

Пренебрегая членом $n_{i^+} \operatorname{div} \mathbf{u}$, ибо $\mathbf{u} = \text{const}$, и всеми стоками, будем иметь верхний предел для n_{i^+} . Решая одномерную стационарную задачу, чего вполне достаточно для оценок (завышенных), из (1) получаем

$$n_{i^+} = q_{i^+} R^2 / ur. \quad (2_a)$$

Конкретизируем решение (2_a) для молекул H_2O , CO_2 и ионов H_2O^+ , CO_2^+ . Неатмосферные ионы H_2O^+ , CO_2^+ образуются в реакциях



$$\gamma_3 = 2,33 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 295^\circ \text{ К } ^{(1)};$$



$$\gamma_4 = 2,19 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 295^\circ \text{ К } ^{(1)};$$



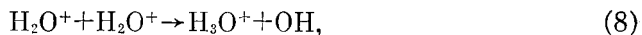
$$\gamma_5 = 2,57 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 295^\circ \text{ К } ^{(1)};$$



$$\gamma_6 = 9 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(6)};$$



$$\gamma_7 = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(6)}, \text{ и исчезают в реакциях}$$



$$\gamma_8 = 8,3 \cdot 10^{-10} - 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1} ^{(6)};$$



$$\gamma_9 = 2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(3)};$$



$$\gamma_{10a} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 295^\circ \text{ К } ^{(7)};$$



$$\gamma_{10b} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 295^\circ \text{ К } ^{(7)};$$



$$\gamma_{11} = 5 \cdot 10^{-11} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(8)};$$



$$\gamma_{12a} = 6 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(7)};$$



$$\gamma_{12b} = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}^{-1}, T = 300^\circ \text{ К } ^{(7)}.$$

Таким образом,

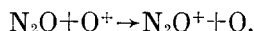
$$q_{\text{H}_2\text{O}^+} = n_{\text{H}_2\text{O}}(n_{\text{O}^+}\gamma_3 + n_{\text{N}_2^+}\gamma_4 + n_{\text{N}^+}\gamma_5), \quad (13)$$

$$q_{\text{CO}_2^+} = n_{\text{CO}_2}(n_{\text{N}_2^+}\gamma_6 + n_{\text{N}^+}\gamma_7).$$

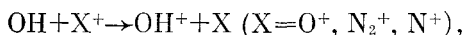
В соответствии с ⁽²⁾ для $h=140$ км двумя последними членами в (13) можно пренебречь, поэтому

$$n_{\text{H}_2\text{O}^+}(R) = n_{\text{O}^+}n_{\text{H}_2\text{O}}\gamma_3 R/u. \quad (26)$$

Расчет с учетом скоростного напора ($n_{\text{H}_2\text{O}} \leq 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $u=1,3 \cdot 10^5 \text{ см/сек}$, $n_{\text{O}^+}=2,15 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$, $R \leq 2,5 \text{ см}$, $\gamma_3=2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{сек}$) приводит к $n_{\text{H}_2\text{O}^+} < 2 \text{ см}^{-3}$ при измеренном значении $\sim 2,6 \cdot 10^2 \text{ см}^{-3}$; разница, превышающая 10^2 , является, на наш взгляд, убедительным доказательством атмосферного происхождения ионов H_2O^+ , регистрировавшихся авторами статей ^(2, 3) и многими другими ⁽¹⁾. Аналогичный расчет, сделанный тоже по данным ⁽²⁾, снова приводит к выводу об атмосферной природе ионов 44^+ , которыми могут, в частности, быть ионы N_2O^+ , SiO^+ , причем первые более вероятно, чем вторые. Ионы N_2O^+ могут возникать в реакции



Доказательство атмосферной природы ионов H_2O^+ одновременно является доказательством атмосферной природы ионов H_3O^+ , OH^+ , а также молекул H_2O , из которых ионы H_2O^+ , H_3O^+ и OH^+ образуются в ионосфере Земли вследствие процессов (3)–(5), (8), а также реакций



константы скоростей которых пока, по видимому, не измерены. Атмосферные ионы H_2O^+ исчезают в процессах (8), (9) и в процессе диссоциативной рекомбинации. В случае равновесия это приводит к следующему, более общему, чем в ⁽¹⁾, выражению для числовой плотности атмосферных молекул H_2O :

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}^+}(n_{\text{O}_2}\gamma_9 + n_e\alpha)}{n_{\text{O}^+}\gamma_3 + n_{\text{N}_2^+}\gamma_4 + n_{\text{N}^+}\gamma_5 - n_{\text{H}_2\text{O}^+}\gamma_8}, \quad (14)$$

в котором n_e , α — числовая плотность электронов и эффективный коэффициент диссоциативной рекомбинации.

Соотношение (14), в свою очередь, позволяет рассчитать эффективный коэффициент рекомбинации $r_{\text{эф}}^{\text{H}+\text{O}}$ атомов Н и О внутри масс-анализатора. Для этого достаточно определить $r_{\text{эф}}^{\text{H}+\text{O}}$ как отношение измеренной в режиме анализа нейтралов числовой плотности $n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{изм}}$ к числовой плотности $n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{расч}}$, рассчитанной в (14):

$$r_{\text{эф}}^{\text{H}+\text{O}} = n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{изм}} / n_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{расч}}.$$

Пример зависимости от высоты числовой плотности атмосферных молекул H_2O и коэффициента $r_{\text{эф}}^{\text{H}+\text{O}}$ представлен на рис. 1, там же для сравнения приведены расчеты числовой плотности атмосферных молекул по

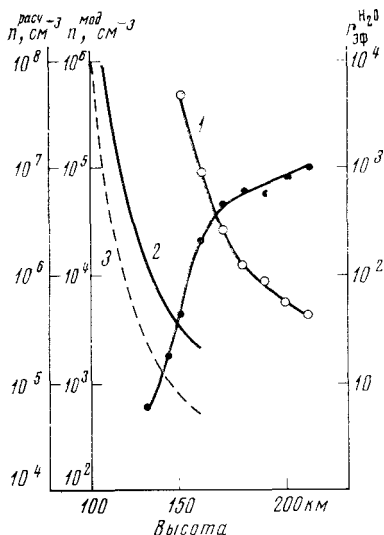


Рис. 1. Зависимость от высоты рассчитанной (1) и модельных числовых плотностей n молекул H_2O (2, 3), а также коэффициента $r_{\text{эф}}^{\text{H}+\text{O}}$ (4). 2 — модель для 60° с.ш., 3 — 30° с.ш.

фотохимической теории (⁹). Из рис. 1. следует, что вклад рекомбинации в числовую плотность молекул H_2O резко падает к высотам 100–110 км; это свидетельствует о возможности пренебречь вкладом рекомбинации на высотах $h < 100$ км. На высотах 140–150 км практически все молекулы H_2O , регистрируемые масс-спектрометром в режиме анализа нейтралов, образуются в результате рекомбинации атмосферных атомов Н и О внутри анализатора.

Остается отметить, что аргументы в пользу атмосферной природы ионов H_2O^+ , изложенные в (¹), становятся гораздо более убедительными, если учесть, что в формуле (7) из (¹) следует принимать в качестве t не время пребывания ионов H_2O в зоне эффективного затягивающего потенциала, ибо он вследствие малости дебаевского радиуса ($r_D \ll 1$ см (¹⁰) для $h \geq 100$ км) мал, а время пребывания ионов O^+ , N_2^+ , N^+ в зоне наиболее высокой концентрации неатмосферных молекул H_2O , из которой ионы H_2O^+ почти полностью попадают внутрь анализатора и которая в случае $R \approx 2-2,5$ см не превышает 10 см. Это снижает время пребывания неатмосферных молекул H_2O в эффективной зоне реакции до $1,7 \cdot 10^{-4}$ сек., а верхний предел числовой плотности молекул H_2O рекомбинационного происхождения, вкладом которого в числовую плотность атмосферных ионов H_2O^+ можно пренебречь, повышает до $1,5 \cdot 10^{10}$ см⁻³ и даже более.

Полученные результаты позволяют надеяться, что ионы 31^+ , 45^+ и 47^+ (¹¹) также имеют атмосферную природу, в частности ими могут быть ионы NOH^+ , N_2OH^+ и NO_2H^+ .

В заключение считаю своим приятным долгом поблагодарить А. И. Ивановского и Г. А. Кокина за плодотворное обсуждение и большую помощь.

Центральная аэрологическая обсерватория
Долгопрудный Московской обл.

Поступило
6 VII 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ G. M. Martynkevich, Space Res., v. 12, 1311 (1972). ² F. Arnold, W. Bertold et al., Space Res., v. 9, 256 (1969). ³ E. Kopp, P. Eberhardt, J. Geiss, Planet. Space Sci., v. 21, № 2, 227 (1973). ⁴ D. Offerman, U. von Zahn, J. Geophys. Res., v. 76, № 10, 2520 (1971). ⁵ А. И. Ивановский, Р. С. Жангуаров, Тр. Центр. аэрологич. обсерв., в. 56, 97 (1964). ⁶ E. W. McDaniel, V. Cermak et al., Ion — molecules Reactions, N. Y. — London — Sydney — Toronto, 1970. ⁷ E. E. Ferguson, Ann. Geophys., v. 28, № 2, 389 (1972). ⁸ F. C. Fehsenfeld, D. B. Dunkin, E. E. Ferguson, Planet. Space Sci., v. 18, № 8, 1267 (1970). ⁹ T. J. Keneshea, S. P. Zimmerman, J. D. George, Space Res., v. 12, 695 (1972). ¹⁰ Я. Л. Альперт, А. В. Гуревич, Л. П. Путаевский, Искусственные спутники Земли в разреженной плазме, «Наука», 1964, стр. 15. ¹¹ В. Г. Истомина, Искусств. спутн. Земли, в. 7, 64 (1961).