

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ И
ПИСЬМА В РЕДАКЦИЮ**

УДК 523.4

**К ОЦЕНКАМ СОДЕРЖАНИЯ АММИАКА И ПАРОВ ВОДЫ В АТМОСФЕРАХ
УРАНА И НЕПТУНА**

С. Б. Андриянычева, К. П. Гайкович, А. П. Наумов

С развитием радиоастрономии и космических исследований существенно возрос интерес к изучению физических условий на удаленных планетах-гигантах (на Уране и Нептуне). К актуальным вопросам строения атмосфер этих планет относятся вопросы содержания малых газовых примесей в них (в первую очередь — аммиака и паров воды). В [1] на основе данных по тепловому радиоизлучению Урана в области длин волн $\lambda = 0,3 \div 10$ см был сделан вывод о возможности интерпретации упомянутого радиоизлучения в рамках атмосферной модели планеты с насыщенным содержанием NH_3 . За истекшее с момента опубликования [1] время были проведены измерения радиоизлучения в длинноволновой области сантиметрового диапазона $\lambda = 10 \div 21$ см [2,3], которое формируется в более глубоких слоях атмосферы и содержит информацию об этих слоях. Термическое зондирование в ИК области спектра [4,5] и теоретические исследования [6] условий переноса излучения на Уране позволили уточнить модели верхней части атмосферы планеты. Согласно [6] уровню температуры $T_v = 52$ К, ниже которого температура на Уране возрастает с приблизительно постоянным градиентом, соответствует давление $P_y^0 \approx 0,26$ атм*. Этот уровень можно принять за начало отсчета высоты.

Радиоастрономические измерения теплового излучения Нептуна в настоящее время проведены в области $\lambda = 0,3 \div 11$ см и считается, что физические условия в верхних слоях атмосферы на этой планете близки к физическим условиям на аналогичных высотных уровнях Урана. Разница в высотных распределениях метеопараметров (в частности, давления) на Уране и Нептуне ниже видимых облачных покровов связана с различными значениями показателя адиабаты для этих планет (см. ниже), которые обусловлены в основном разницей между соответствующими величинами ускорения свободного падения ($g_y = 940$ см/с², $g_n = 1500$ см/с² [7]).

Расчет спектра теплового радиоизлучения Урана и Нептуна в данной работе осуществлялся, подобно [8,9], по формуле

$$T_y = 2 \int_0^1 \int_0^{\tau_m} T(\tau) e^{-\tau/\mu} d\tau d\mu, \quad (1)$$

в которой $T(z)$ — высотная зависимость температуры, $\tau(h) = \int_0^h \gamma_\lambda(h') dh'$ —

оптическая толщина атмосферы, $\mu = \cos \theta$, высота h отсчитывается от уровня, на котором давление и температура считались равными P_i^0 и T_i^0 и который расположен вблизи видимой границы облачного покрова. В расчетах относительное содержание молекулярного водорода (по числу частиц) принималось равным $f_{\text{H}_2} = 0,85$, а гелия — $f_{\text{He}} = 0,15$. Относительные содержания аммиака и паров воды в верхних частях атмосфер рассчитывались из условий насыщения ($f_{\text{NH}_3}^{\text{нас}}$, $f_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нас}}$ соответствующие формулы приведены, например, в [10,11] до величин f_{NH_3} и $f_{\text{H}_2\text{O}}$, а затем считались постоянными по величине и равными значениям f_{NH_3} и $f_{\text{H}_2\text{O}}$. Значения f_{NH_3} и $f_{\text{H}_2\text{O}}$ являлись параметрами задачи и для различных атмосферных моделей варьировались соответственно в пределах

* В [1] рассматривалась модель Урана с параметрами $P_y^0 = 3$ атм и $T_y^0 = 55$ К на начальном уровне.

10^{-7} — 10^{-2} и 0 — 10^{-2} . Расчеты выполнялись для адиабатических атмосфер со средними градиентами температур $\nabla_T \approx 1$ град/км (отношение $r = C_p/C_v \approx 1,6$ — для Урана и $r \approx 1,3$ — для Нептуна).

Описание микроволновых спектров поглощения аммиака и водяного пара осуществлялось по формулам, приведенным в [8, 9]. Верхний облачный покров планет-гигантов состоит, по-видимому, из кристаллов аммиака* и не оказывает заметного влияния на радиоспектр. При наличии водяного пара в атмосферах Урана и Нептуна его конденсация может осуществляться на высотах $h \sim 300$ км и выше. При изменении f_{H_2O} в пределах 10^{-5} — 10^{-4} толщина жидкокапельной части облачного слоя может составлять $\sim 20 \div 60$ км, а интегральная (по высоте) водность W , рассчитанная по методике [12], достигать 1 — 250 кг/м³. Для земных условий критическое значение, при котором еще отсутствуют осадки, составляет $W_{кр} \sim 5$ кг/м³. Отметим, что указанному значению $W_{кр}$ в атмосферах Урана и Нептуна соответствует концентрация водяного пара ниже уровня конденсации $f_{H_2O} = f_{H_2O}^{кр} \sim 1,8 \cdot 10^{-5}$. Радиоизлучение Урана и Нептуна в миллиметровом и сантиметровом диапазонах волн ($\lambda < 10 \div 20$ см) формируется (по уровню $\tau = 1$) в атмосферном слое толщиной $\Delta h < 300$ км, и, таким образом, нижний облачный слой планеты, состоящий, вероятно, из растворенного в воде аммиака, не должен оказывать существенного влияния на радиоспектр в рассматриваемой области. Поэтому мы полагали, что оптическая толщина атмосфер Урана и Нептуна определяется лишь молекулярным поглощением NH_3 и H_2O .

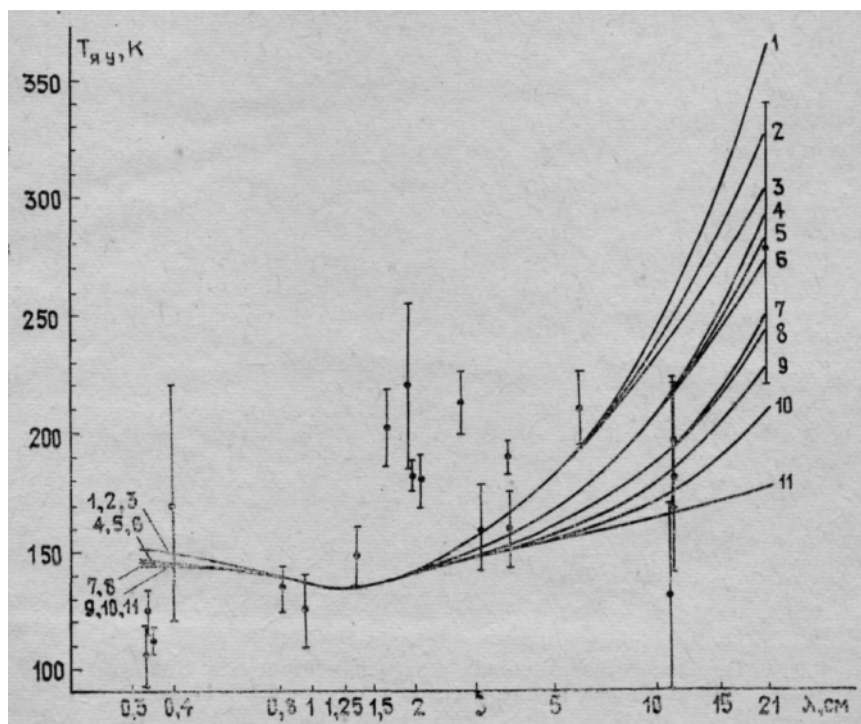


Рис. 1. Сравнение теоретических и экспериментального спектров радиоизлучения Урана в диапазоне λ от 0,3 ч- 21 см:

$$\begin{aligned}
 &1 - f_{NH_3} = 10^{-5}, f_{H_2O} = 0; \quad 2 - f_{NH_3} = 10^{-5}, f_{H_2O} = 10^{-3}; \quad 3 - f_{NH_3} = 10^{-5}, \\
 &f_{H_2O} = 10^{-2}; \quad 4 - f_{NH_3} = 2 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 0; \quad 5 - f_{NH_3} = 2 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 10^{-3}; \\
 &6 - f_{NH_3} = 2 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 10^{-2}; \quad 7 - f_{NH_3} = 4 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 0; \quad 8 - f_{NH_3} = \\
 &= 4 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 10^{-2}; \quad 9 - f_{NH_3} = 6 \cdot 10^{-5}, f_{H_2O} = 0 \div 10^{-2}; \quad 10 - f_{NH_3} = 10^{-4}, \\
 &f_{H_2O} = 0 \div 10^{-2}; \quad 11 - f_{NH_3} = 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}, f_{H_2O} = 0 \div 10^{-2}.
 \end{aligned}$$

На рис. 1 вычисленный по описанной методике спектр радиоизлучения $T_{яч}(\lambda)$ Урана в области $\lambda = 0,3 \div 21$ см сопоставлен с радиоастрономическими измерениями

* В атмосфере Урана не исключается наличие и метановых облаков [6].

[2, 3, 13-27]. Из сравнения вычисленных и измеренного спектров радиоизлучения можно сделать вывод о наиболее вероятном содержании аммиака в атмосфере Урана ниже уровня насыщения $f_{\text{NH}_3} = (1 \div 4) \cdot 10^{-5}$. Полученные оценки содержания NH_3 на Уране являются близкими к аналогичным оценкам на Юпитере [28] и Сатурне [8, 9].

Как видно из рис. 1, влияние водяного пара на спектр радиоизлучения Урана заметно проявляется только в области $\lambda \geq 15$ см при содержании $\text{NH}_3, f_{\text{NH}_3} \leq 2 \cdot 10^{-5}$, и поэтому количественные оценки содержания H_2O по области спектра, в которой в настоящее время выполнены измерения $T_{\text{яв}}(\lambda)$, затруднены. Оценки содержания H_2O могут быть выполнены, по-видимому, по измерениям $T_{\text{яв}}(\lambda)$ в более длинноволновой области ($\lambda \sim 50 \div 100$ см). Кривая 11 на рис. 1 описывает спектр $T_{\text{яв}}(\lambda)$ при насыщенном содержании аммиака в области формирования радиоизлучения.

Следует отметить, что экспериментальный материал по радиоизлучению Урана неоднороден по своему качеству и не все экспериментальные точки в областях $\lambda \approx 0,35$ см и $\lambda \approx 1,5 \div 3$ см согласуются между собой и с рассчитанным спектром. Рассмотренный в [29] механизм поглощения, обусловленный индуцированными при соударениях H_2 — H_2 дипольными моментами молекул водорода, в принципе может оказать определенное влияние на интерпретацию радиоспектра в коротковолновой части миллиметрового диапазона ($\lambda = 0,1 \div 0,3$ см), но, по-видимому, не может изменить сделанных выше количественных выводов о возможном содержании NH_3 . Интерпретация спектра радиоизлучения Урана, выполненная в [30] для меньшего содержания NH_3 в верхних слоях атмосферы из-за возможного взаимодействия с H_2S , привела к оценкам $f_{\text{NH}_3} < 10^{-6}$ в слоях с температурой $150 \div 200$ К.

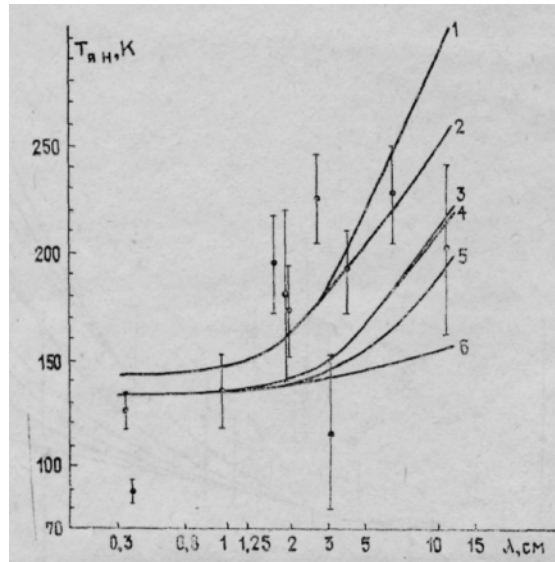


Рис. 2. Сравнение теоретических и экспериментального спектров радиоизлучения Нептуна в диапазоне $\lambda = 0,3 \div 11$ см:

- 1 - $f_{\text{NH}_3} = 10^{-7}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 0$; 2 - $f_{\text{NH}_3} = 10^{-7}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-3} \div 10^{-2}$;
 3 - $f_{\text{NH}_3} = 10^{-7}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 0$; 4 - $f_{\text{NH}_3} = 5 \cdot 10^{-7}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-3} \div 10^{-2}$;
 5 - $f_{\text{NH}_3} = 10^{-7}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 10^{-3} \div 10^{-2}$; 6 - $f_{\text{NH}_3} = (2 \div 6) \cdot 10^{-5}, f_{\text{H}_2\text{O}} = 0 \div 10^{-2}$.

Спектр радиоизлучения Нептуна $T_{\text{яв}}(\lambda)$ в области длин волн $\lambda = 0,3 \div 11$ см [2, 18, 22, 24, 26, 27] интерпретируется при относительном содержании аммиака ниже уровня насыщения $f_{\text{NH}_3} \sim 10^{-7} \div 10^{-6}$ (см. рис. 2). Влияние водяного пара на спектр $T_{\text{яв}}(\lambda)$ рассматриваемом диапазоне волн заметно проявляется лишь при $f_{\text{NH}_3} \sim 10^{-7}$. При столь малых содержаниях NH_3 не исключается количественное влияние на оптическую толщину атмосферы Нептуна и индуцированного механизма поглощения молекулярного водорода [29]. В этом случае определенное выше значение f_{NH_3} для Нептуна можно рассматривать как верхний предел содержания аммиака для приведенных моделей. Оценки содержания NH_3 на Нептуне могут быть уточнены в дальнейшем

при увеличении точности радиоастрономических измерений и расширении области экспериментальных исследований (при $\lambda > 10$ см).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Д. Кузьмин, ДАН СССР, **196**, № 1, 65 (1971).
2. W. J. Webster, A. C. Webster and G. T. Webster, *Astrophys. J.*, **174**, № 3, pt. 1, 679 (1972).
3. F. H. Briggs, *Astrophys. J.*, **182**, № 3, pt. 1, 999 (1973).
4. D. Morrison and D. P. Cruikshank, *Astrophys. J.*, **179**, № 1, pt. 1, 329 (1973).
5. G. H. Rieke and F. J. Low, *Astrophys. J.*, **193**, № 3, pt. 2, L147 (1974).
6. R. E. Danielson, *Icarus*, **30**, № 3, 462 (1977).
7. К. У. Аллен, *Астрофизические величины*, ИЛ, М., 1960.
8. А. Д. Кузьмин, А. П. Наумов, Т. В. Смирнова, *Астрон. вестник*, **6**, № 1, 13 (1972).
9. А. П. Наумов, *Изв. вузов — Радиофизика*, **17**, № 12, 1755 (1974).
10. В. М. Lasker, *Astrophys. J.*, **138**, № 3, 709 (1963).
11. Л. Т. Матвеев, *Физика атмосферы*, Гидрометеиздат, Л., 1965.
12. А. М. Обухов, Г. С. Голицын, *Космические исследования*, **6**, № 5, 759 (1968).
13. J.D.G. Rafter, B. L. Ulich and P. A. A d e, *Icarus*, **22**, № 4, 448 (1974).
14. И. И. Зинченко, А. Г. Кисляков, В. Н. Воронов, *Изв. вузов — Радиофизика*, **18**, № 4, 501 (1975).
15. B. L. Ulich, *Icarus*, **21**, № 3, 254 (1974).
16. B. L. G a n y, *Astron. J.*, **79**, № 2 (1974).
17. А. Д. Кузьмин, Б. Я. Лосовский, *Астрон. вестник*, **5**, № 1, 23 (1971).
18. C. H. Mayer and T. P. McCullough, *Icarus*, **14**, № 2, 187 (1971).
19. E. E. Epstein, M. M. Dworetsky, J. M. Montgomery, M. G. Forgarty and A. Schorn, *Icarus*, **13**, № 2, 276 (1970).
20. E. Gerard, *Astron. rind Astrophys.*, **2**, № 2, 246 (1969).
21. K. J. Kellerman, *Icarus*, **5**, № 5, 478 (1966).
22. K. J. Kellerman and J. J. K. Pauliny - Toth, *Astrophys. J.*, **145**, № 3, 954 (1966).
23. M. J. Klein and F. V. Selig, *Astrophys. J.*, **146**, № 2, 599 (1966).
24. B. L. Ulich and E. K. C o u k e i n, *Icarus*, **27**, № 2, 183 (1976).
25. В. А. Ефанов, В. И. Загатин, А. Г. Кисляков, И. Г. Моисеев, С. Нестеров, В. Б. Штейншлегер, *Астрон. вестник*, **11**, № 1, 25 (1977).
26. G J. L. K. P a u l i n y - T o t h and K. J. K e l l e r m a n, *Astrophys. Lett.*, **6**, № 3-4, 185 (1970).
27. L. Berge, *Astrophys. Lett.*, **2**, № 3, 127 (1968).
28. А. Д. Кузьмин, Т. В. Смирнова, *Астрон. вестник*, **7**, № 3, 139 (1973).
29. К. П. Гайкович, *Изв. вузов — Радиофизика* (в печати).
30. S. Gulkis, M. A. Janssen and E. T. Olsen, *Icarus*, **34**, № 1, 10 (1978).

Научно-исследовательский
радиофизический институт

Поступила в редакцию
16 августа 1978 г.