

ГЕОФИЗИКА

И. С. ШКЛОВСКИЙ

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО
НЕБА С КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНЫМИ ПОЛОСАМИ
МОЛЕКУЛЫ ГИДРОКСИЛА ОН

(Представлено академиком Г. А. Шайном 29 IX 1950)

Получение В. И. Красовским спектрограмм свечения ночного неба в области $\lambda 9000-11000 \text{ \AA}$ ⁽¹⁾ является выдающимся достижением советской астрофизики. В. И. Красовский убедительно показал, что получившее широкое распространение за рубежом отождествление этого излучения с полосой $(0, 0)$ первой положительной системы молекулы азота $\lambda 10440 \text{ \AA}$, выполненное американскими исследователями ⁽²⁾, ошибочно. В действительности, вместо одной полосы у $\lambda 10440 \text{ \AA}$, как это полагали Стеббинс, Уайтфорд и Свингс ⁽²⁾, имеет место целая система полос, причем у $\lambda 10440 \text{ \AA}$ не существует никакого локального максимума.

Встает проблема отождествления этого инфракрасного излучения —

самой интенсивной части свечения ночного неба. В недавно появившемся небольшом предварительном сообщении Мейнел ⁽³⁾ приводит полученную им спектрограмму свечения ночного неба в области $7000 \text{ \AA} < \lambda < 8900 \text{ \AA}$, убедительно показывающую вращательную структуру полосы $\lambda 8347 \text{ \AA}$, и отождествляет ее с вращательно-колебательной полосой гидроксила OH. В другом предварительном сообщении ⁽⁴⁾ Мейнел отождествляет слабые полосы свечения ночного неба в красной и оранжевой части спектра $\lambda\lambda 6560, 6502, 6464, 6258, 6172$ и 5890 \AA с некоторыми ветвями вращательно-колебательного спектра OH.

Представляется вполне естественным попытаться отождествить инфракрасное излучение неба с вращательно-колебательными полосами гидроксила OH.

Для этого восстановим схему колебательных уровней молекулы OH. Согласно Шпонер ⁽⁵⁾, волновые числа колебательных уровней основного электронного состояния OH могут быть найдены из формулы:

$$\nu = 3734,9 (\nu' + \frac{1}{2}) - 82,6 (\nu' + \frac{1}{2})^2. \quad (1)$$

Отсюда будем иметь табл. 1 для ν .

Волновые числа для колебательных уровней $\nu \geq 10$ мы не приводим (см. по этому поводу ниже). Кроме того, для высоких колебательных уровней формула (1) уже не будет достаточно точной.

Таблица 1

ν'	ν	ν'	ν
0	1847,7	5	18043,3
1	5416,4	6	20787,0
2	8821,0	7	23365,5
3	12060,3	8	25778,8
4	15134,4	9	28027,0

Вращательная структура колебательно-вращательного спектра гидроксила OH может быть получена из известных формул ⁽⁶⁾*:

$$\nu = \nu_0 + (B_{v'} + B_{v''}) m + (B_{v'} - B_{v''}) m^2 - (B_{v'} - B_{v''}) \quad (2)$$

$$m = 2, 3, \dots \quad (R\text{-ветвь}),$$

$$m = -2, -3, \dots \quad (P\text{-ветвь});$$

ν_0 есть волновое число нулевой линии рассматриваемой полосы. Для Q-ветви (которая в случае молекулы гидроксила будет иметь место, так как основное состояние $^2\Pi$) волновые числа различных вращательных линий будут близки к ν_0 .

Далее имеем:

$$B_v = B_e - \alpha_e (v + 1/2). \quad (3)$$

Для молекулы гидроксила, согласно ⁽⁵⁾, $B_e = 19,025 \text{ см}^{-1}$, $\alpha_e = 0,724$. Согласно ⁽³⁾, вычислим таблицу значений B_v (см. табл. 2).

Таблица 2

v	B_v	v	B_v
0	18,663	5	15,140
1	17,938	6	14,416
2	17,214	7	13,692
3	16,490	8	12,968
4	15,765	9	12,244

На основании имеющихся у нас данных мы прежде всего отождествим разложенные на вращательную структуру полосы, полученные Мейнелом в области $\lambda 7200-8200 \text{ \AA}$ (насколько нам известно, Мейнел отождествил только полосу $\lambda 8347 \text{ \AA}$).

На рис. 1 приводятся результаты этого отождествления. Прежде всего заметим, что у $\lambda 8200 \text{ \AA}$ нет никаких следов эмиссии. Между тем полоса (10,5) падает как раз на эту область

спектра. Это дает нам основание считать, что молекул гидроксила в колебательных состояниях выше 10-го (включительно) очень мало, и не рассматривать переходы с этих уровней**. Тогда все свечение ночного неба в области $7200 \text{ \AA} < \lambda < 8500 \text{ \AA}$ совершенно однозначно отождествляется с колебательно-вращательными полосами OH последовательно: (8,3) — $\lambda 7250-7400 \text{ \AA}$; (4,0) — $\lambda 7470-7600 \text{ \AA}$; (9,4) — $\lambda 7700-7830 \text{ \AA}$; (5,1) — $\lambda 7850-8070 \text{ \AA}$; (6,2) — $\lambda 8280-8500 \text{ \AA}$ (последняя полоса отождествлена Мейнелом). У $\lambda 8650 \text{ \AA}$ находится слабая полоса, которую Мейнел отождествил с некоторым переходом молекулы кислорода.

Далее, у $\lambda 8770 \text{ \AA}$ начинается полоса (7,3). Можно видеть только R- и Q-ветви ее. Ветвь P из-за резкого падения чувствительности пластиинки не выявляется. Можно видеть, что все полосы имеют примерно

* Формула (2) будет приближенно справедлива, поскольку у молекулы OH энергия взаимодействия спина и орбитального момента мала по сравнению с разностью вращательных термов (случай «b» классификации Гунда). В нашем приближении дублетная структура вращательных линий не учитывается.

** После того как настоящая работа была написана, мы ознакомились со статьей Бэйтса и Николета, посвященной атмосферному водороду ⁽⁷⁾. Согласно указанным авторам, наиболее вероятная реакция, приводящая к образованию возбужденных молекул гидроксила, будет:



При этом будут возбуждаться колебательные уровни с энергией возбуждения меньшей 3,3 ев. Из табл. 1 видно, что 9-й уровень имеет энергию возбуждения $28027,0 - 1847,7 = 26179,3 \text{ см}^{-1} = 3,24 \text{ ев}$; 10-й уровень имеет энергию возбуждения 3,51 ев, следовательно, возбуждаться механизмом (4) уже не будет. Мы можем сделать вывод, что полное отсутствие эмиссии у $\lambda 8200 \text{ \AA}$ является серьезным аргументом в пользу «озонного» механизма возбуждения свечения гидроксила в земной атмосфере. Поглощение водяными парами у $\lambda 8200 \text{ \AA}$ (полоса Z) не может так существенно ослабить излучение ночного неба, чтобы сделать его ненаблюдаемым.

одинаковую характерную структуру. Ветви R довольно быстро сходятся к пределу со стороны коротких длин волн. Напротив, линии ветви P сравнительно широко расставлены и не обнаруживают тенденции сходиться к пределу.

Необходимо заметить, что мы для восстановления колебательно-вращательного спектра молекулы OH пробовали пользоваться значениями молекулярных констант, приведенных у Г. Герцберга (6). В этом случае нельзя уверенно отождествить ни одну из полос свечения ночного неба в области $\lambda 7200-8800 \text{ \AA}$. В частности, совершенно не получается полоса у $\lambda 8347 \text{ \AA}$, отождествленная Мейнелом. Это заставляет нас считать, что предпочтительными являются более старые молекулярные константы, приведенные у Шпонер. Таким образом,

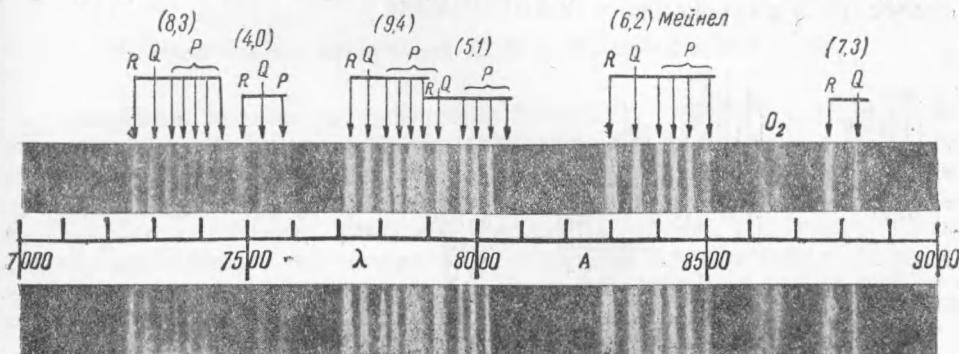


Рис. 1

отождествление инфракрасного излучения ночного неба позволяет уточнить молекулярные константы гидроксила (на это обстоятельство нам указал Г. А. Шайн).

Таким образом, практически все излучение ночного неба в области $7200 \text{ \AA} < \lambda < 8800 \text{ \AA}$ имеет гидроксильное происхождение, за одним небольшим исключением — слабой кислородной эмиссии у $\lambda 8650 \text{ \AA}$. Распространение мейнеловского отождествления на всю указанную область спектра, очевидно, является полным подтверждением этого отождествления. Проведение отождествления по одной полосе для молекулярных спектров не могло бы быть достаточно убедительным.

Имея в своем распоряжении все необходимые молекулярные константы OH, мы восстановим теперь колебательно-вращательный спектр этой молекулы для области $\lambda 8800-11000 \text{ \AA}$ и сравним с наблюдениями В. И. Красовского. Из-за малой дисперсии (1200—2400 $\text{\AA}/\text{мм}$) и незначительной разрешающей способности полосы и бланды не могут быть разрешены не только на линии вращательной структуры, но и на ветви. Тем не менее, общее распределение интенсивности в этой части спектра получается вполне уверенно.

Мы полностью учитывали все переходы, у которых исходный колебательный уровень меньше 10 и которые дают излучение в интересующей нас части спектра.

На рис. 2 приведено распределение интенсивности инфракрасного излучения ночного неба, полученное В. И. Красовским (1). Одновременно показано отождествление этого излучения с колебательно-вращательным спектром OH. Ясно видно, что каждому максимуму интенсивности однозначно соответствуют определенные полосы излучения OH. Справа на диаграмме виден максимум, отождествленный Мейнелом с переходом (6,2). Затем небольшой максимум, на который не падает никакое гидроксильное излучение, отождествленный Мейнелом с полосой O_2 . Далее следует большой максимум, который мы отождествляем

с переходом (7,3). Ветви R и Q этого максимума разрешены Мейнелом.

До этой части спектра ($\lambda 8800 \text{ \AA}$) спектрограммы Мейнела и В. И. Красовского перекрывались. Далее максимум у $\lambda 9400 \text{ \AA}$ соответствует полосе (8,4) колебательно-вращательного спектра OH. Пологий небольшой максимум у $\lambda 9700 \text{ \AA}$ соответствует R -ветви полосы (3,0). Максимум у $\lambda 9950 \text{ \AA}$ соответствует неразрешенным линиям P -ветви той же полосы и R -ветви полосы (9,5). Полоса у $\lambda 10217 \text{ \AA}$, образующая, как отметил В. И. Красовский, пологий «скат» более интенсивной полосы у $\lambda 10374 \text{ \AA}$ ⁽⁴⁾, образуется ветвью R -полосы гидроксила (4,1) и частично, ветвью P -полосы (9,5). Полоса у $\lambda 10300 \text{ \AA}$ соответствует Q - и P -ветвям полосы гидроксила (4,1). Наконец, излучение у $\lambda 10800 \text{ \AA}$ соответствует полосе (5,2) гидроксила.

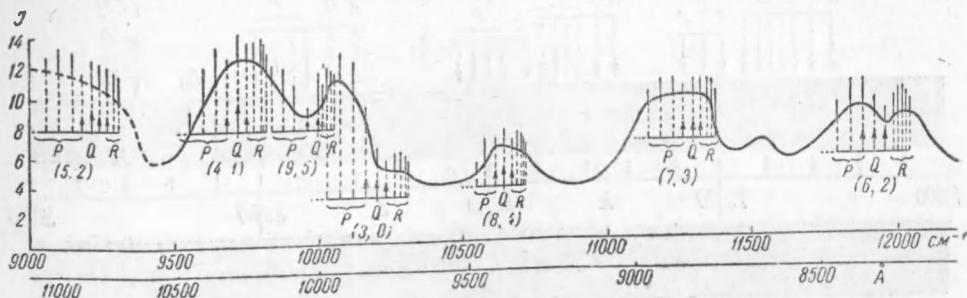


Рис. 2

Таким образом, мы видим, что вращательно-колебательный спектр OH полностью объясняет наблюдаемое излучение ночного неба в области $8800 \text{ \AA} < \lambda < 11000 \text{ \AA}$. Хотя в этой части спектра может присутствовать и не гидроксильное излучение, но оно, повидимому, играет, второстепенную, не определяющую роль. Нелишне отметить, как это видно из рис. 2, что максимум у $\lambda 8870 \text{ \AA}$, разрешенный Мейнелом на ветви (рис. 1) и отождествленный нами с полосой (7,3), имеет интенсивность, сравнимую с найденным В. И. Красовским главным максимумом у $\lambda 10300 \text{ \AA}$.

В сочетании с изложенным выше мы видим, что гидроксильное излучение в области $7200 \text{ \AA} < \lambda < 11000 \text{ \AA}$ является основной составляющей светимости ночного неба. Это излучение во много десятков раз более интенсивно, чем общее излучение ночного неба в более коротковолновой части спектра, включающее в себя хорошо известные зеленую, желтую и красную линии атомного происхождения. Несомненно, что гидроксил в земной атмосфере должен иметь выдающееся геофизическое значение.

Крымская астрофизическая обсерватория

Поступило
26 VIII 1950

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 В. И. Красовский, ДАН, 66, № 1 (1949); 70, № 6 (1950); 73, № 4 (1950).
- 2 J. Stebbins, A. Whitford and P. Swings, Astroph. Journ., 101, 39 (1945).
- 3 A. Meinel, ibid, 111, 207 (1950). 4 A. Meinel, ibid, 111, 433 (1950). 5 H. Sponer, Molekulspektren und ihre Anwendung auf chemische Probleme, 1, Berlin, 1935.
- 6 Г. Герцберг, Спектры и строение двухатомных молекул, 1949.
- 7 D. Bates and M. Nicolle, Publ. Astron. Soc. Pacific, 62, 106 (1950).