

И. С. ШКЛОВСКИЙ

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

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

Получение В. И. Красовским спектрограмм свечения ночного неба в области $\lambda 9000\text{--}11000 \text{ \AA}$ ⁽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:

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

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 ОН 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 $\lambda 7200-8200 \text{ Å}$ (насколько нам известно, Мейнел отождествил только полосу $\lambda 8347 \text{ Å}$).

На рис. 1 приводятся результаты этого отождествления. Прежде всего заметим, что у $\lambda 8200 \text{ Å}$ 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 $7200 \text{ Å} < \lambda < 8500 \text{ Å}$ совершенно однозначно отождествляется с колебательно-вращательными полосами ОН последовательно: (8,3) — $\lambda 7250-7400 \text{ Å}$; (4,0) — $\lambda 7470-7600 \text{ Å}$; (9,4) — $\lambda 7700-7830 \text{ Å}$; (5,1) — $\lambda 7850-8070 \text{ Å}$; (6,2) — $\lambda 8280-8500 \text{ Å}$ (последняя полоса отождествлена Мейнелом). У $\lambda 8650 \text{ Å}$ находится слабая полоса, которую Мейнел отождествил с некоторым переходом молекулы кислорода.

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

* Формула (2) будет приближенно справедлива, поскольку у молекулы ОН 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 (?). 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 $\lambda 8200 \text{ Å}$ является серьезным аргументом в пользу «озонного» механизма возбуждения свечения гидроксила в земной атмосфере. Поглощение водяными парами у $\lambda 8200 \text{ Å}$ (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 ОН 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 λ 7200—8800 Å. В частности, совершенно не получается полоса у λ 8347 Å, отождествленная Мейнелом. Это заставляет нас считать, что предпочтительными являются более старые молекулярные константы, приведенные у Шпонер. Таким образом,

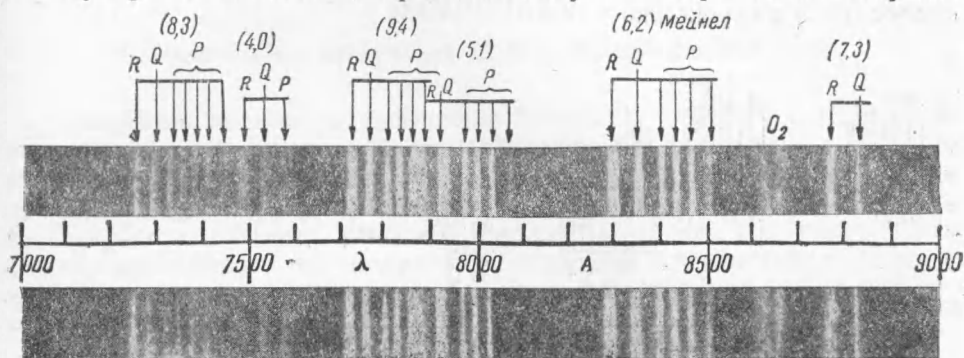


Рис. 1

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 $7200 \text{ Å} < \lambda < 8800 \text{ Å}$ имеет гидроксильное происхождение, за одним небольшим исключением — слабой кислородной эмиссии у λ 8650 Å. 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 ОН, мы восстановим теперь колебательно-вращательный спектр этой молекулы для области λ 8800—11000 Å и сравним с наблюдениями В. И. Красовского. Из-за малой дисперсии (1200—2400 Å/мм) и незначительной разрешающей способности полосы и бленды 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 ОН. Ясно видно, что каждому максимуму интенсивности однозначно соответствуют определенные полосы излучения ОН. 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 ОН. 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 $\lambda 10374 \text{ \AA}$ (¹), 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.

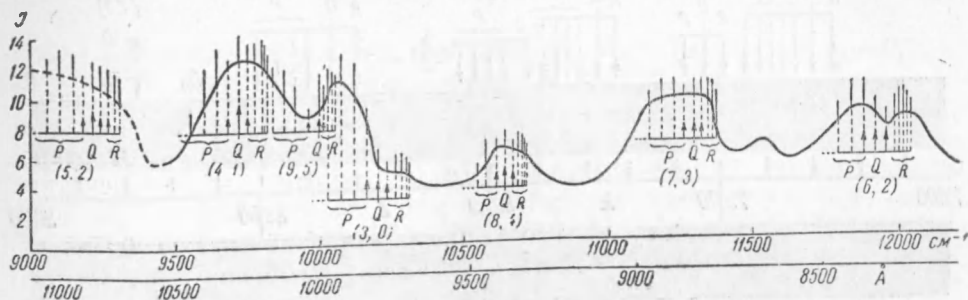


Рис. 2

Таким образом, мы видим, что вращательно-колебательный спектр ОН 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. Spöner, *Molekulspektren und ihre Anwendung auf chemische Probleme*, 1, Berlin, 1935.
- ⁶ Г. Герцберг, *Спектры и строение двухатомных молекул*, 1949. ⁷ D. Bates and M. Nicolet, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, 62, 106 (1950).