

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА \*)

*В. И. Красовский*

Ничто не характеризует так хорошо свойства и процессы верхних слоёв земной атмосферы, как их собственное излучение. Однако в дневное время оно маскируется рассеянным солнечным светом и обнаруживается пока только ночью, за что получило название «излучения ночного неба». До недавнего времени были известны спектры такого излучения от 3000 до 7000—8000 Å. Они исчерпывались немногочисленными малоинтенсивными линиями или полосами атомов и молекул кислорода и азота. За последние годы обнаружено и исследовано более мощное инфракрасное излучение ночного неба. С его открытием стали говорить о «слабом» и «мощном» излучении, но даже последнее по существу весьма малоинтенсивно. Светосильные спектрографы позволяют получить спектр ночного неба в ультрафиолетовой и видимой областях спектра при относительно небольшой дисперсии (1000 Å/мм) только в результате многочасовых экспозиций. Здесь излагается краткий итог исследований излучения ночного неба в ближней инфракрасной области спектра вплоть до длинноволнового предела 12 000 Å. Хотя эти исследования касались в основном испытания новых методов спектроскопии с помощью электроннооптического преобразователя<sup>1, 2, 6, 8, 10</sup> и не имели целью полное и регулярное наблюдение за инфракрасным излучением ночного неба, они, тем не менее, представляют интерес для суждений об этом излучении, в особенности за длинноволновым пределом 8000—9000 Å, вообще не превзойдённым за рубежом. Накопленный материал не однороден по качеству. С каждым годом аппаратура подвергалась существенным усовершенствованиям. В 1948 г. первые исследования были выполнены с призмёнными приборами с дисперсией около

---

\*) Доклад, сделанный на заседании Отделения физико-математических наук Академии наук СССР в Москве 19 марта 1952 г.

7500  $\text{\AA}/\text{мм}$  и разрешающей способностью до 300  $\text{\AA}$ . В 1950 г. применялись спектрографы с дифракционными решётками. Они давали дисперсию до 150  $\text{\AA}/\text{мм}$  и разрешающую способность до 5  $\text{\AA}$ . Эта аппаратура превосходила лучшую зарубежную даже за длинноволновым пределом 8000—9000  $\text{\AA}$ <sup>18</sup>. Вначале, при фотографировании спектров с малой дисперсией, выдержки достигали нескольких часов. Но и при переходе в последних исследованиях на большую дисперсию экспозиции не увеличивались, а при 800  $\text{\AA}/\text{мм}$  даже снизились до десяти минут. Следует ещё упомянуть, что усовершенствование аппаратуры обеспечило повышение почернений снимков.

Новые средства были впервые испытаны на излучении ночного неба в 1948 г. в момент широкого распространения предположения американских исследователей Стеббинса, Уайтфорда и Свингса, что инфракрасное излучение ночного неба более или менее монохроматично и сосредоточено около 10440  $\text{\AA}$ . В то время шли споры, принадлежит ли оно молекулярному или атомарному азоту<sup>14</sup>. Если такое излучение принадлежало атомарному азоту, оно должно было быть наиболее монохроматичным. В этом случае при фотографировании ночного неба в инфракрасных лучах через эталон Фабри-Перо ожидалось интерференционные кольца, аналогичные наблюдаемым в излучении известной зелёной линии свечения ночного неба у 5577  $\text{\AA}$ . Такое фотографирование было осуществлено. Но интерференционных колец в излучении ночного неба около 10440  $\text{\AA}$  обнаружено не было. Стало ясно, что инфракрасное излучение не является строго монохроматичным и не может поэтому принадлежать в значительной доле атомарному азоту. Вскоре были получены<sup>1</sup> спектры этого излучения с дисперсией около 7500  $\text{\AA}/\text{мм}$ . Они показали, что излучение распределено по всему спектру от 7000 до 11000  $\text{\AA}$ . У 10440  $\text{\AA}$  вообще не было обнаружено даже какого бы то ни было максимума излучения. Тем самым было опровергнуто другое предположение американских исследователей, что инфракрасное излучение ночного неба всецело принадлежит полосе 0—0 первой положительной группы молекулярного азота.

Общее представление о распределении интенсивности инфракрасного излучения ночного неба по спектру даёт рис. 1 (см. вклейку). На нём воспроизведена репродукция со снимков спектра, полученных ещё в 1949 г. с дисперсией 1200  $\text{\AA}/\text{мм}$  и разрешающей способностью до 60  $\text{\AA}$  около 8400  $\text{\AA}$  и с дисперсией 2400  $\text{\AA}/\text{мм}$  и разрешающей способностью до 120  $\text{\AA}$  около 10800  $\text{\AA}$ <sup>3,4</sup>. Эта репродукция даёт ясное представление о наиболее интенсивных участках спектра. На рис. 2 (см. вклейку) показано истинное распределение излучения по спектру в

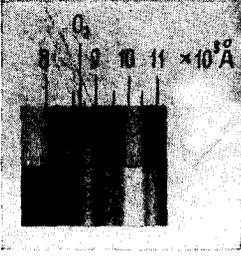


Рис. 1.

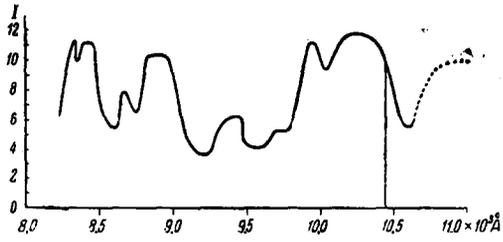


Рис. 2.

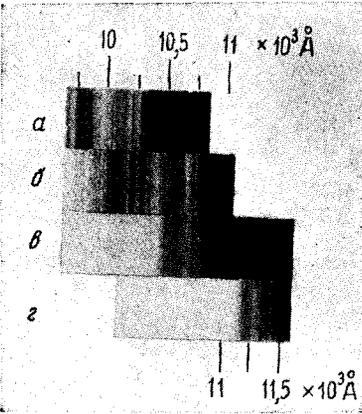


Рис. 3.

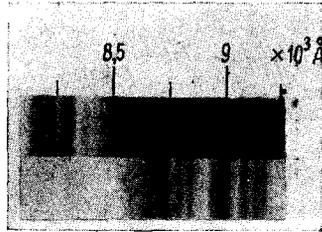


Рис. 4а.

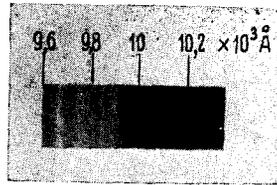


Рис. 4б.

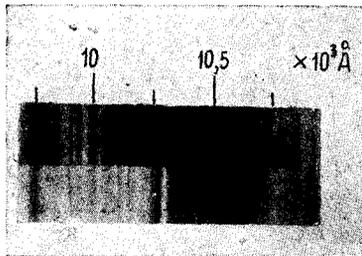


Рис. 4в.

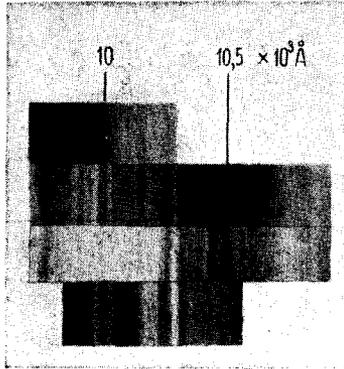


Рис. 5.

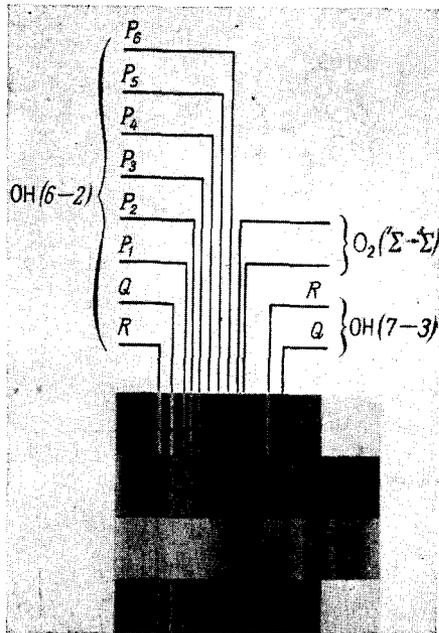


Рис. 6.

к статье В. И. Красовского

относительных единицах, полученное в результате обработки только что показанного верхнего снимка с учётом спектральной чувствительности аппаратуры. Кривая интенсивностей воспроизведена без учёта второстепенных подробностей. Часть кривой, обозначенная пунктиром, относится к области пониженной чувствительности аппаратуры и за её высокую точность поручиться нельзя. Кривая распределения интенсивностей показывает, что излучение практически заполняет весь рассматриваемый участок спектра. Наблюдаемые максимумы относительно невелики. Следует обратить внимание, что совершенно отчётливый максимум имеется даже на участке интенсивного поглощения водяного пара около  $9400 \text{ \AA}$ . Ранее возникавшие опасения, что сплошное заполнение излучением всего спектра является следствием недостаточной разрешающей способности аппаратуры, отпадают. Теперь полученные снимки спектра со значительно большей дисперсией и разрешающей способностью, на которых действительно обнаружено излучение на участках, соответствующих минимумам только что показанной кривой интенсивности.

На рис. 3 (см. вклейку) показаны репродукции со снимков спектров с несколько большей дисперсией<sup>10</sup>. Применявшийся для их получения спектрограф с дифракционной решёткой обладал дисперсией  $850 \text{ \AA/мм}$  и разрешающей способностью до  $30 \text{ \AA}$ . Смонтированы параллельно различные репродукции. Из них *a* и *b* соответствуют одному и тому же оригиналу, полученному с экспозицией 15 мин. Участок *a* отпечатан на фотобумаге с передержкой, а участок *b* — с недодержкой. Репродукция *б* сделана с другого оригинала, также экспонированного в течение 15 мин. Однако, чтобы запечатлеть более широкий участок спектра, отпечаток на фотобумагу осуществлён при освещении, плавно уменьшающемся в сторону длинных волн. Следует обратить внимание, что на репродукции со стороны коротких волн имеется диффузная полоса, отсутствующая на снимке *a*. Репродукция *г* сделана с негатива, полученного с экспозицией 45 мин. Первая тёмная полоса со стороны коротких волн, возможно, вызвана поглощением паров воды. Спектр с дисперсией  $850 \text{ \AA/мм}$  находится в удовлетворительном согласии с ранее полученным в 1949 г. спектром с меньшей дисперсией. Исследование нового спектра, так же как и показанного выше, позволило установить, что минимумы интенсивности не глубоки и заполнены диффузным излучением, хотя и неравномерным по спектру.

На рис. 4 (см. вклейку) приведены репродукции с нескольких других снимков инфракрасных спектров излучения ночного неба<sup>11, 12</sup>. Они получены с помощью спектрографа с дифракционной решёткой при дисперсии  $175 \text{ \AA/мм}$  и разрешающей способности до  $5 \text{ \AA}$ . Верхняя и нижняя репродукции продублированы отпечатками различной плотности. На рис. 5 (см. вклейку)

показаны репродукции с различных снимков одинакового участка спектра<sup>10, 11 и 12</sup>. Они сняты тем же спектрографом, но в разное время. Две средние репродукции — отпечатки различной плотности с одного и того же оригинала. Имеются основания предполагать, что спектральный состав излучения ночного неба подвержен некоторым изменениям. Нужно также подчеркнуть, что и при большой дисперсии все минимумы излучения неглубоки. Диффузное излучение относительно интенсивно, хотя и неравномерно по спектру. Может ли оно при ещё большей дисперсии разрешиться на отдельные детали — неизвестно. Это диффузное излучение и близко расположенные линии или полосы, образующие бленды, затрудняют определение истинной интенсивности отдельных элементов инфракрасного спектра ночного неба.

По выдержкам при фотографировании в результате трёх-четырёхлетних наблюдений установлено, что довольно часто интенсивность инфракрасного излучения в полночь раза в два больше, чем вечером или утром. Этот результат подтверждает аналогичный, полученный ранее и независимо С. Ф. Родионовым с помощью электрофотометра<sup>15</sup>. По выдержкам при фотографировании обнаружено также, что интенсивность исследуемого излучения в начале года выше, чем летом. Имеются подозрения, что это излучение летом 1950 г. стало раза в два-три слабее, чем летом 1948 г. Иногда интенсивность бывает настолько слабой, что фотографирование спектров становится невозможным. Такие условия, например, были в Крыму в августе 1950 г. Хотя все упоминаемые здесь исследования преднамеренно выполнялись при ясной погоде, всё же трудно утверждать, что к колебаниям интенсивности совершенно непричастны метеорологические условия, не поддающиеся исчерпывающему учёту в момент фотографирования ночью.

Грубая оценка абсолютной интенсивности всего фиксируемого на поверхности земли инфракрасного излучения ночного неба на участке от 7000 до 11000 Å примерно в сотню — две сотни раз превышает интенсивность известной зелёной линии свечения ночного неба 5577 Å. Такая оценка хорошо согласуется с результатом С. Ф. Родионова, полученным независимо с помощью электрофотометра<sup>15</sup>.

В ультрафиолетовой и видимой областях в спектре ночного неба излучения атомарного азота, с достоверностью не обнаружено, а молекулярный азот представлен системой полос Вегарда-Каплана небольшой интенсивности и очень слабыми полосами первой положительной группы, наличие которых зачастую оспаривается<sup>14</sup>. В инфракрасном излучении ночного неба не удалось обнаружить эмиссии атомарного и молекулярного азота. Это, однако, не означает, что излучение атомарного и молекулярного азота отсут-

ствует полностью. Возможно, что оно только маскируется значительно более мощным излучением другого происхождения.

В инфракрасной части спектра пока не обнаружено также излучения атомарного кислорода, представленного в более коротковолновой области её наиболее интенсивными известными зелёной и красной линиями.

В ультрафиолетовой области спектра молекулярному кислороду принадлежат относительно слабые полосы Герцберга<sup>17</sup>. Характерной чертой этой системы полос является распределение в ней максимальных интенсивностей. Наиболее интенсивные полосы соответствуют переходам с высоких колебательных уровней, близких к порогу диссоциации. Полосы при переходах с нулевого и близких к нему колебательных уровней или слабы, или отсутствуют.

В новой инфракрасной области спектра совершенно достоверно отождествлена полоса молекулярного кислорода  $0 \rightarrow 1$  от перехода из состояния  $^1\Sigma$  в основное состояние  $^3\Sigma$ . При наших наибольших дисперсиях эта полоса распадается на две отдельные, но бесструктурные ветви. Повидимому, весьма существенно, что указанная полоса не обладает постоянной интенсивностью. На рис. 1 смонтированы вместе репродукции со спектров ночного неба, снятых одинаковым образом одной и той же аппаратурой (дисперсия около  $1200 \text{ \AA}/\text{мм}$ ). Снимки, однако, получены в различных географических местах и в разное время года. Полоса  $\text{O}_2(^1\Sigma \rightarrow ^3\Sigma)$  обнаружена только на наших летних снимках в Симеизе (верхняя репродукция) и отсутствует на зимних снимках около Москвы (нижняя репродукция). На рис. 6 смонтированы репродукции спектров: сверху — со снимка, полученного Мейнелом<sup>18</sup> на Ликской обсерватории зимой 1949/50 г., а внизу — с одного из наших снимков зимой около Москвы. Полоса  $\text{O}_2(^1\Sigma \rightarrow ^3\Sigma)$ , имеющаяся на снимке Мейнела, отсутствует на нашем. Особенно велика относительная интенсивность этой полосы на спектрограмме, полученной Дюфе<sup>21</sup> на юге Франции в 1950 г. Небезинтересно ещё отметить, что полоса молекулярного кислорода  $^1\Sigma \rightarrow ^3\Sigma$  — первая обнаруженная полоса излучения ночного неба с изменяющимся контуром, повидимому, указывающим на непостоянство вращательной температуры излучающих молекул.

Хотя упомянутая полоса молекулярного кислорода в ряде случаев отсутствует, тем не менее её максимальная интенсивность доходит иногда до 10—20 интенсивностей известной красной линии свечения ночного неба у  $6300 \text{ \AA}$ . По интенсивности этой полосы может быть вычислена интенсивность другой, ещё более сильной полосы  $0 \rightarrow 0$  той же системы, образующейся при переходах с того же исходного уровня. Недавними лабораторными исследованиями Квифта<sup>23</sup> установлено, что интенсивность полосы  $0 \rightarrow 0$  в пятьдесят раз больше, чем у полосы  $0 \rightarrow 1$ . Таким

образом, интенсивность полосы  $0-0$  может в  $500 \div 1000$  раз превосходить интенсивность известной красной линии свечения ночного неба у  $6300 \text{ \AA}$ . Такой вывод весьма многозначителен, так как свидетельствует, что истинная эмиссия молекулярного кислорода верхних слоёв земной атмосферы принадлежит к наиболее мощным излучениям в ближней инфракрасной области спектра до  $12\,000 \text{ \AA}$ . Ненаблюдаемость этого излучения, сосредоточенного у  $7600 \text{ \AA}$ , очень просто объясняется его полным поглощением нижними слоями атмосферы. Как известно, полоса молекулярного кислорода  $0-0$  при переходе из основного состояния  $^3\Sigma$  в возбуждённое  $^1\Sigma$  является наиболее интенсивной полосой поглощения атмосферы.

Отождествляя инфракрасный спектр ночного неба, полученный нами с небольшой дисперсией, Дюфе<sup>33</sup> предположил, что мощное излучение у  $10\,000 \text{ \AA}$  обязано полосе  $0-2$  той же самой системы полос молекулярного кислорода. Однако, на наших снимках спектров с большой дисперсией на указанном Дюфе месте среди наиболее интенсивных деталей не обнаружено ветвей этой полосы. Её отсутствие хорошо согласуется с лабораторными исследованиями Квифта, не обнаружившего даже и следов такой полосы<sup>33</sup>.

Весьма интересно, что в излучении ночного неба не наблюдается поддающихся обнаружению полос молекулярного кислорода  $^1\Sigma-^3\Sigma$ , которые соответствовали бы переходам с первого и других более высоких колебательных уровней. Следует также напомнить, что и в лаборатории Квифт наблюдал только одну полосу  $1-1$  с интенсивностью, в двести раз меньшей, чем у полосы  $0-0$ <sup>23</sup>.

Несколько ранее нами было высказано предположение<sup>5</sup>, что молекулярный кислород верхних слоёв земной атмосферы может ещё излучать полосы, соответствующие переходам из состояния  $^1\Delta$  в основное состояние  $^3\Sigma$ . Предполагаемое положение этих полос падает на исследуемый участок спектра. Среди многих интенсивных деталей инфракрасного излучения ночного неба, пока не поддающихся или с трудом поддающихся отождествлению, можно было бы подозревать некоторые, как полосы  $O_2 (^1\Delta-^3\Sigma)$ , соответствующие наиболее вероятным, по принципу Франка-Кондона, переходам с высоких колебательных уровней. Однако последние опытные данные об исключительной населённости нулевого колебательного уровня состояния  $^1\Sigma$  молекулярного кислорода, заставляют ожидать сходную населённость и у легче возбуждаемого и более метастабильного его состояния  $^1\Delta$ . Если справедливо именно такое последнее предположение, то на исследованном участке спектра имеет шансы быть обнаруженной только одна полоса  $1-0$  этой системы около  $10\,700 \text{ \AA}$ . К сожалению, чёткие снимки спектра ночного неба в этой области пока отсутствуют. Но имеющиеся снимки (см. рис. 3 и 4) показывают, что около

10 700 Å расположена интенсивная широкая расфокусированная полоса, которая нами ранее принималась за  $R$  — ветвь полосы гидроксидла 5—2. Тогда же, независимо от предположения о полосах  $O_2(1\Delta—3\Sigma)$ , уже отмечалось, что эта полоса слишком интенсивна и широка, чтобы её можно было приписать только одной  $R$ -ветви полосы гидроксидла<sup>12</sup>. Соблюдая максимальную осторожность, можно сказать, что имеющийся фактический материал пока не противоречит предположению о присутствии полосы 1—0  $O_2(1\Delta—3\Sigma)$ . Если бы такое предположение оказалось справедливым, то тем самым было бы доказано существование другой, гораздо более интенсивной полосы той же системы 0—0, расположенной около 12 500 Å. Таким образом, возможно, что полосы молекулярного кислорода могут преобладать в инфракрасном излучении верхних слоёв земной атмосферы вплоть до 13 000 Å.

На полученных за рубежом обычным фотографическим путём спектрах ночного неба до 8500 Å Мейнел<sup>18</sup> отождествил вращательно-колебательные полосы гидроксидла в основном состоянии. Это отождествление развивалось дальше И. С. Шкловским<sup>16</sup>. Предполагалось, что практически всё инфракрасное излучение ночного неба исчерпывается излучением гидроксидла. Однако наш материал, правда, охватывающий лишь ближнюю инфракрасную часть спектра, повидимому, ещё не даёт оснований для столь однозначных заключений. На рис. 6 спектр Мейнела сопоставлен с нашим. В центре расположены отпечатки различной плотности с нашего оригинала. По краям смонтированы репродукции со спектра Мейнела. Как уже отмечалось<sup>12</sup>, ряд деталей спектра Мейнела и нашего совпадает, кое-что у нас отсутствует, но, что самое главное, имеется многое, отсутствующее у Мейнела, а также значительное неравномерное диффузное излучение. По материалам Мейнела интенсивность  $Q$ -ветви полосы гидроксидла составляет около четверти интенсивности всей полосы. Исходя из этого, наш снимок позволяет оценить интенсивность полос гидроксидла на сравнимом участке спектра. Если учесть всё излучение на рассматриваемом участке, в том числе и диффузное, неразрешаемое на детали, оказывается, что общая интенсивность полос гидроксидла 6—2 и 6—3 не только практически не исчерпывает всё это излучение, но даже не является его преобладающей частью. Таково положение дел в той области спектра, где имеется возможность сопоставить наши результаты с наиболее популярными зарубежными.

Переходя к более длинноволновой области, простирающейся за 10 000 Å, поневоле приходится ограничиваться изложением одних наших результатов<sup>11</sup>. В средней части диаграммы рис. 7 показаны лишь некоторые, наиболее отчётливые детали спектра ночного неба в этой области. Диаграмма составлена в шкале  $см^{-1}$ .

Обозначения линий или полос указывают ширину и отчётливость. Пары линий с заштрихованными промежутками, возможно, являются единым образованием, так как различаются раздельно с большим трудом. Широкая диффузная полоса, примерно расположенная между 9650—9750 Å, обозначена одной линией, соответствующей месту максимальной интенсивности у 9712 Å. В верхней части диаграммы рис. 7 указаны некоторые характерные места вращательно-колебательных полос гидроксила в основном состоянии, вычисленные по материалам Мейнела. Отмеченные линии *R*- и *P*-ветвей соответствуют воображаемому состоянию <sup>1</sup>Π. Для упрощения дублетная структура не учтена. Места истинных наиболее интенсивных *P*-линий OH <sup>3</sup>Π<sub>3/2</sub> находятся с длин-

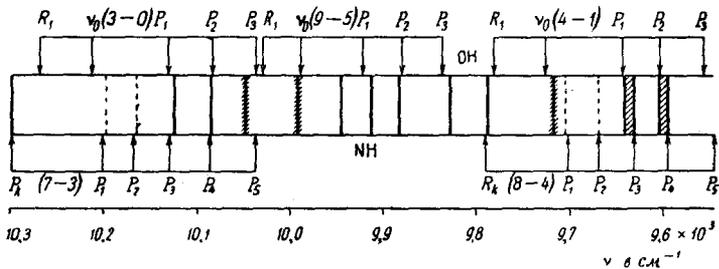


Рис. 7.

новолновой стороны отметок ( $\sim$  на 10  $\text{см}^{-1}$ ). Пока удовлетворительное совпадение, повидимому, имеется только для полос 4—1 и 9—5, но и оно, за исключением *Q*-ветвей, заставляет желать лучшего. Совершенно неудовлетворительно отождествление полосы 3—0. Так, например, отсутствует её обязательная интенсивная *Q*-ветвь. Если линию 10 288 Å принять за *Q*-ветвь полосы 4—1, а линию 10 013 Å — за *Q*-ветвь полосы 9—5, то суммарная интенсивность двух указанных ветвей вместо необходимой  $\frac{1}{4}$  окажется приблизительно равной не более, чем  $\frac{1}{10}$  полной интенсивности излучения на месте полос OH 4—1 и 9—5. Повидимому, на эти полосы накладывается излучение, не связанное с гидроксилом. Интенсивность полосы OH 3—0, скорее всего, существенно меньше интенсивности полос 4—1 и 9—5 и не превосходит интенсивности фона.

Хотя вращательно-колебательные полосы гидроксила практически не исчерпывают всего инфракрасного излучения ночного неба, тем не менее, присутствие некоторых из них теперь несомненно установлено и в более длинноволновой, не исследованной зарубежными авторами, области. Все открытые полосы гидроксила относятся только к —4 и —3 последовательностям. Это означает, что неизбежно присутствие всех остальных более интенсив-

ных полос меньших последовательностей. И. С. Шкловский, воспользовавшись формулой Шольца, вычислил относительные интенсивности полос различных последовательностей для многих исходных колебательных уровней гидроксила<sup>16</sup>. Таким образом теперь может быть оценена интенсивность всех остальных более длинноволновых полос по интенсивностям известных. Проверка формулы Шольца на интенсивностях этих полос указывает на расхождение некоторых вычисленных и наблюдаемых интенсивностей в несколько раз<sup>9</sup>. Сейчас трудно судить, повинны ли в этом приближенность формулы Шольца или неточность определения интенсивностей известных полос гидроксила, или, наконец, и то и другое вместе. Однако это всё же не подвергает сомнению порядок величины конечного результата. Полная интенсивность всех более длинноволновых полос гидроксила, недоступных средствам современного исследования, оказывается, превосходит интенсивность известной красной линии свечения ночного неба у 6300 Å в тысячи или десятки тысяч раз<sup>7, 16</sup>. Это означает, что абсолютная интенсивность длинноволнового излучения гидроксила оценивается величиною порядка  $1 \div 10 \text{ эрг см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Трудно представить, чтобы в области, более длинноволновой, чем 15 000 Å, могли присутствовать какие-нибудь столь же мощные электронные спектры атомов или молекул.

Многие детали инфракрасного спектра ночного неба и расхождения в длинах волн остаются необъяснёнными. В этом может быть повинно пока неотожествлённое излучение негидроксильного происхождения. Блендирование элементов гидроксильного спектра с посторонними может быть причиной несовпадения эффективных длин волн и интенсивностей с ожидаемыми. Отсутствие исчерпывающего отождествления спектра ночного неба делает целесообразным поиски других расшифровок. Но само собой разумеется, что всё это может делаться пока только в рабочем порядке, без претензий на абсолютную достоверность. Поэтому ограничиваемся самыми беглыми замечаниями по этому поводу.

Не присутствуют ли в инфракрасном излучении ночного неба наряду с полосами гидроксила полосы другого гидрида NH? Вращательно-колебательный спектр молекулы NH в лабораторных условиях пока не наблюдался, так же как и аналогичный спектр гидроксила. Вычисление спектра NH затруднено отсутствием точных молекулярных констант этой молекулы. Однако в качестве пробы было предположено, что они близки средним величинам таких же констант молекул CH и OH<sup>11</sup>. В нижней части диаграммы рис. 7 указаны некоторые полученные таким образом характерные места вращательно-колебательных полос молекулы NH. Через  $R_k$  обозначены канты R-ветвей с красным оттенением. Их несовпадение с деталями спектра ночного неба не таково, чтобы полностью пренебречь присутствием излучения NH. Следует

отметить, что указанные на диаграмме рис. 3 места предполагаемых полос принадлежат последовательности — 4 и соответствуют переходам с высоких колебательных уровней. Другие полосы этой последовательности при переходах с более низких уровней располагаются в более коротковолновой области спектра вплоть до 8300 Å. Однако по аналогии с гидроксидом верхних слоёв земной атмосферы можно предполагать, что в одной и той же высокой последовательности интенсивности полос быстро ослабевают с переходом на более низкие исходные уровни.

Как уже сообщалось, весь исследованный нами инфракрасный участок спектра ночного неба, помимо линий и полос, заполнен излучением, пока не разрешающимся на отдельные детали. Возможно, это излучение обязано в некоторой мере молекуле  $\text{NO}_2$ . Небезинтересно отметить, что сходное излучение было получено недавно Капланом при искусственном воспроизведении в лабораторных условиях спектра ночного неба<sup>24</sup>. Этот автор получил диффузные полосы  $\text{NO}_2$ , начинающиеся в видимой области и простирающиеся до длинноволнового предела 9000 Å, обусловленного порогом чувствительности фотоматериала, применявшегося при фотографировании спектра.

Широкая диффузная полоса с максимумом интенсивности около 9712 Å, которая частично в длинноволновой области может быть отнесена за счёт излучения  $\text{NH}$ , может также принадлежать рассеянному земной атмосферой солнечному излучению. Спектры дневного неба, полученные с нашим спектрографом, указывают на существование у 9700 Å незначительного максимума интенсивности, монотонно уменьшающейся в сторону длинных волн. Если в дальнейшем такое предположение окажется справедливым, то придётся допустить, что наши спектры были получены в то время, когда инфракрасное излучение верхних слоёв земной атмосферы не превышало значительно рассеянное атмосферой солнечное излучение.

Этим заканчиваем очень краткий обзор современного фактического материала об инфракрасном излучении ночного неба. Не приходится сомневаться, что он характеризует только начальную стадию штурма тайн излучения верхних слоёв земной атмосферы. Различные предположения требуют подтверждений и уточнений, а не перестающий накапливаться фактический материал всё ещё продолжает ставить на разрешение новые задачи. Повидимому, инфракрасное излучение ночного неба непостоянно по абсолютной интенсивности и спектральному составу. Трудно, однако, сейчас утверждать что-либо более определённое о масштабах этого непостоянства.

Как у нас, так и за границей новый богатый фактический материал не мог не стимулировать попыток объяснить механизм

возбуждения излучения ночного неба. Значительно усовершенствовались старые гипотезы и появились новые. К сожалению, они ещё далеки до исчерпывающего завершения. Ограничимся изложением наиболее популярных предположений.

Нам представляется наиболее справедливой старая точка зрения, согласно которой источником энергии излучения ночного неба является энергия диссоциации молекул<sup>7, 11</sup>. Днём коротковолновая солнечная радиация диссоциирует на атомы молекулы верхних слоёв земной атмосферы. Преобладающая доля этой энергии тратится, прежде всего, на диссоциацию наиболее легко диссоциируемого молекулярного кислорода. Молекулярный азот диссоциируется незначительно, так как для его диссоциации необходимо излучение, более коротковолновое и поэтому менее интенсивное в солнечном спектре. Накапливаемые днём атомы кислорода обеспечивают ночью излучение ночного неба. Возникновение молекул из атомов наиболее эффективно при тройных соударениях. На высотах свыше ста километров, т. е. в зоне наиболее эффективной диссоциации молекул кислорода, каждый атом или молекула испытывает тройное соударение лишь один раз за несколько часов. В результате этого концентрация атомарного кислорода в течение ночи существенно не уменьшается, чем и обеспечивается более или менее постоянная интенсивность излучения ночного неба. Можно попытаться дать грубую оценку верхнего предела полной интенсивности этого излучения. Диссоциация, совершающаяся днём, в среднем всегда уравнивается процессом ассоциации, непрерывно протекающим в течение всех суток. Молекулярный кислород существенно диссоциируется лишь излучением короче  $1700 \text{ \AA}$ . Грубая оценка солнечной радиации, короче этого предела, может быть получена, если принять Солнце за абсолютно чёрное тело с температурой  $6000^\circ \text{ K}$ . Само собой разумеется, что такое предположение может дать только порядок интересующей нас величины, так как солнечная радиация может быть богаче или беднее ультрафиолетом, чем абсолютно чёрное тело. Солнечная постоянная для излучения короче  $1700 \text{ \AA}$  оказывается, таким образом, равной  $700 \text{ эрг см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ . Эта энергия может расходоваться на диссоциацию кислорода только частично. Некоторая часть кислорода всегда ассоциируется днём, остальная — ночью. Таким образом, полная интенсивность излучения ночного неба может достигать нескольких сотен  $\text{эрг см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ .

Мощность всего известного и предполагаемого излучения молекулярного кислорода и даже гидроксила гораздо меньше такой предельной величины. Куда же исчезает преобладающая часть энергии диссоциации? Какими каналами она удаляется из верхних слоёв земной атмосферы? Нам всегда казалось странным,

почему так остро ставится вопрос об источниках энергии излучения ночного неба, а не наоборот, о причинах излишней слабости известного излучения ночного неба.

По общепринятым представлениям атомарный кислород может воссоединяться в молекулы только в результате тройных соударений при участии пары атомов или атома и молекулы кислорода. В результате последней комбинации образуется озон, а молекулы кислорода появляются лишь вследствие бимолекулярной реакции озона с озоном или атомарным кислородом. Можно указать ещё один путь воссоединения атомарного кислорода в молекулы. Вначале, при тройных соударениях появляется закись азота. Затем она вступает в бимолекулярную реакцию с закисью же азота или атомарным кислородом, в результате которой также возникает молекулярный кислород. В конечном счёте неважно, каким путём появляются молекулы кислорода. Существенно только, что они зарождаются в возбуждённых состояниях, пределом которых является порог диссоциации, равный 117 килокалориям на моль. Само собою разумеется, что часть этой энергии может быть передана третьему телу, например атому кислорода. В настоящее время мы ещё не умеем предсказывать, в каких возбуждённых состояниях образуются новые молекулы кислорода. Принципиально такими состояниями могут быть метастабильные электронные состояния  $F^3\Sigma$ ,  $1^1\Sigma$  и  $1^1\Delta$ . Однако интенсивность наблюдаемых полос, соответствующих переходам из этих состояний, указывает, что они не исчерпывают значительной части возможной энергии излучения ночного неба. Из этого следует, что преобладающая часть молекулярного кислорода возникает в основном электронном состоянии  $3^1\Sigma$  при интенсивном колебательном возбуждении. Молекулы кислорода в таком состоянии не могут дезактивироваться посредством излучения. Что касается вновь образующихся молекул озона и закиси азота, то по энергетическим соображениям они возможны только в основных электронных состояниях на высоких колебательных уровнях. К счастью, для дальнейшего практически безразлично, каково электронное состояние вновь образующихся возбуждённых молекул.

Раньше обычно предполагалось, что вновь образовавшиеся в верхних слоях земной атмосферы возбуждённые молекулы кислорода химически стабильны и теряют возбуждение лишь через излучение или при многократных соударениях. В новой точке зрения существенно утверждение, что атомы и молекулы, появившиеся в возбуждённом метастабильном или близком к нему состоянии, настолько химически активны, что в большинстве случаев исчезают, вступая в реакцию с невозбуждёнными атомами и молекулами, и не успевают излучить или потерять при столкновениях значительной части энергии возбуждения. Аналогичная

участь постигает все вновь образующиеся возбуждённые продукты. Появляется большое число разнообразных быстро исчезающих и опять появляющихся соединений. Непрерывные превращения продолжаются, пока энергия возбуждения не будет отдана продуктами реакции посредством излучения. Неизбежность такого процесса ясна из сопоставления времени существования метастабильных состояний молекулярного кислорода, времени сохранения возбуждения при соударениях и времени между очередными реакциями, в которые вступают атомы и молекулы с возбуждением, превышающим энергию активации. Сообщаемо несколько примеров. Среднее время жизни возбуждённого молекулярного кислорода при дезактивации излучением в состоянии  $^1\Sigma$  составляет около 10 секунд, в состоянии  $^1\Delta$  оно значительно больше этой величины, а в основном электронном состоянии практически равно бесконечности. При соударениях возбуждённые молекулы обычно передают лишь один колебательный квант, соответствующий переходу между соседними уровнями. Вероятность этого процесса тем больше, чем выше возбуждение. Но всё же, в среднем, её значение характеризуется величиной, на несколько порядков меньшей единицы.

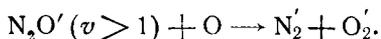
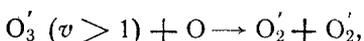
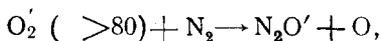
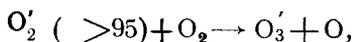
В то же время вероятность реакции возбуждённых молекул кислорода, например, с атомами азота и водорода, больше 0,1. Само собою разумеется, что на высоте около 100 км, где число двойных соударений, испытываемых возбуждённой молекулой, имеет значения, близкие  $10^5$ , скорее совершится реакция этой молекулы с малочисленными атомами азота и водорода, даже при относительных концентрациях их порядка  $10^{-4}$ , чем полная дезактивация её соударениями или излучением. Возникающая цепь химических реакций быстрее всего обрывается дезактивацией за счёт излучения наименее метастабильного продукта.

Число промежуточных химических реакций и соединений, возможных в верхних слоях земной атмосферы, велико. В качестве примера рассмотрим только некоторые из них, ограничиваясь наиболее существенными на наш взгляд.

Условимся обозначать возбуждённый продукт штрихом, а энергию его возбуждения килокалориями на моль или колебательным уровнем основного состояния, если продукт предполагается находящимся в таком состоянии. При написании химических формул эти значения будут указываться в скобках после символов атомов и молекул.

Как уже сообщалось, в основном первичными возбуждёнными продуктами могут быть только молекулы кислорода, озона и закиси азота. Первыми наиболее вероятными реакциями этих возбуждённых молекул являются их реакции с самыми распространёнными в верхних слоях земной атмосферы невозбуждёнными

атомами и молекулами кислорода и молекулами азота:

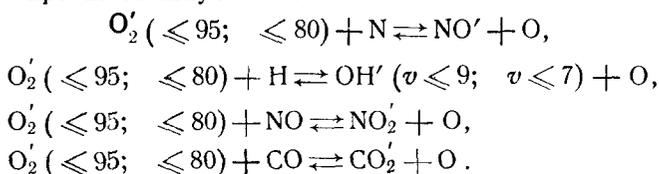


Все эти реакции становятся возможными, когда энергия возбуждения первичного продукта превышает указанную в скобках величину. Даже самое беглое ознакомление с двумя последними реакциями показывает, что возбуждённые молекулы озона и закиси азота исчезают при первых столкновениях с атомами кислорода. Характерной чертой этих реакций является неизбежность распределения энергии возбуждения между обоими конечными продуктами. В отличие от простых соударений в этом случае осуществляется передача колебательной энергии в размерах, превосходящих разность энергий двух соседних колебательных уровней. Иная судьба у возбуждённых молекул кислорода. Они становятся химически стабильными по отношению к молекулярному кислороду при энергиях возбуждения, меньших 95 килокалорий на моль, и по отношению к молекулярному азоту при энергиях возбуждения, меньших 80 килокалорий на моль.

Таким образом, создаются условия для эффективного накопления химически инертных молекул кислорода с энергией возбуждения, меньшей 80 килокалорий на моль и, в меньшей степени, с энергией возбуждения, меньшей 95 килокалорий на моль. Энергии возбуждения, превышающие эти пределы, быстро перераспределяются в результате третьей и четвертой реакции между их двумя конечными продуктами.

Если бы состав верхних слоев земной атмосферы исключительно исчерпывался молекулами и атомами кислорода и молекулами азота, то находящиеся в основном электронном состоянии колебательно возбуждённые молекулы кислорода могли бы дезактивироваться только одними неупругими соударениями. Для полной дезактивации таких молекул потребовалось бы число соударений, превышающее  $10^5$ . Судьба их, однако, существенно меняется при наличии в верхних слоях земной атмосферы таких атомов и молекул, как N, H, NO и CO. Если относительная концентрация этих элементов превышает значение  $10^{-5}$ , то неуспевшие дезактивироваться молекулы кислорода вступают с ними в какую-либо одну из нижеуказанных реакций, весьма эффективных и в обратном направлении. Эффективность или неэффективность обратной реакции прежде всего зависит от способности молекул  $NO'$ ,  $OH'$ ,  $NO'_2$  и  $CO'_2$  быстро

дезактивироваться излучением:



В результате указанных реакций образуются возбуждённые молекулы NO, OH, NO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Существенно, что в той или иной мере эти молекулы способны дезактивироваться посредством излучения. Отметим также, что в результате таких реакций могут появляться не только невозбуждённые, но и возбуждённые атомы кислорода. Молекулы NO, NO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>, повидимому, возникают, как и уже известные молекулы OH, в основном электронном состоянии с колебательным возбуждением. К сожалению, молекулы NO недостаточно ангармоничны. Их наиболее интенсивное излучение приходится на далёкую длинноволновую область, недоступную средствам современного исследования. Колебательно возбуждённые молекулы NO<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> могут эффективно излучать в той же длинноволновой области. Иначе обстоит дело с молекулами гидроксила. Благодаря значительной ангармоничности этих молекул, в исследованной нами области спектра удаётся обнаружить вращательно-колебательные полосы высоких последовательностей. Вероятно, в высоких слоях земной атмосферы общая концентрация N, NO и CO больше концентрации H. В реакциях с этими частицами перехватывается большая часть энергии первичного возбуждения. В таком случае наблюдаемые и предполагаемые излучения гидроксила не могут исчерпать всего инфракрасного излучения ночного неба. Весьма характерно, что предельное возбуждение гидроксила соответствует 9-му колебательному уровню, если он образуется от молекул кислорода с предельным возбуждением 95 килокалорий на моль, и 7-му колебательному уровню, если предельное возбуждение молекул кислорода равно 80 килокалориям на моль. Действительно, наблюдаемые в излучении ночного неба полосы гидроксила наиболее интенсивны при переходах с 7-го и более низких колебательных уровней и практически не наблюдаются при переходах с уровней, превышающих 9-ый. Таким образом, наблюдаемые излучения гидроксила отображают населённость химически наиболее стабильных состояний молекулярного кислорода.

Согласно развиваемой нами гипотезе, интенсивность полного излучения гидроксила наиболее существенно зависит от относительной концентрации атомного водорода в смеси всех атомов и молекул, способных вступать в реакцию с возбуждёнными молекулами кислорода, т. е. N, H, NO и CO. Абсолютная концентрация этих элементов определяет главным образом лишь скорость

высвечивания энергии возбуждения, первично связанной с молекулами кислорода. Однако даже при незначительных концентрациях N, H, NO и CO этот процесс совершается за время, ничтожное по сравнению с длительностью ночи. Уменьшение абсолютной концентрации N, H, NO и CO увеличивает лишь роль дезактивации неупругими столкновениями. В этом случае среднее колебательное возбуждение молекул кислорода уменьшается за счёт увеличения населённости более низких уровней. Как следствие оказываются более интенсивными полосы гидроксила от переходов с более низких колебательных уровней, чем предельные 9-й и 7-й уровни.

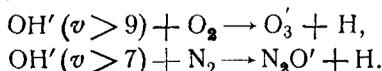
Колебания интенсивности излучения ночного неба теперь можно пытаться объяснять изменениями относительной и абсолютной концентраций N, H, NO и CO. Можно также предполагать, что если во время полярных сияний, за счёт диссоциации электрическим разрядом, увеличится относительная концентрация атомного азота, то интенсивность гидроксильного излучения ослабится. Б. А. Багацкий, повидимому, уже обнаружил такое явление<sup>13</sup>.

Описанный нами преобладающий механизм возбуждения гидроксила, возможно, не является единственным. Так, гидроксил может возбуждаться в пределе до 9-го колебательного уровня в диссоциирующей водяной пар реакции:



Состояние O (<sup>1</sup>S) является исходным при излучении известной зелёной линии ночного неба 5577 Å.

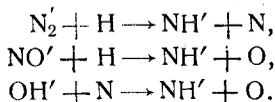
Небезинтересно отметить, что с энергетической точки зрения возможна реакция сильно возбуждённого гидроксила с молекулами кислорода и азота:



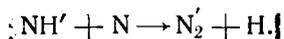
Эти реакции делают невозможным стабильное существование колебательных уровней OH, более высоких чем 7-ой и, в особенности, 9-ый.

Таким образом, наблюдаемое ослабление излучения гидроксила в полосах от переходов с более высоких колебательных уровней, чем 7-й, и практически полное отсутствие полос от переходов с уровней, более высоких, чем 9-й, не представляется таинственным и может удовлетворительно объясняться несколькими совершенно различными причинами.

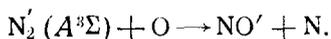
Очевидность присутствия в верхних слоях земной атмосферы возбуждённых молекул N<sub>2</sub>, NO и OH делает уместным предположение об их дальнейших реакциях с атомарным водородом и азотом:



В результате этих реакций неизбежно возникновение возбужденных молекул NH. Предполагаемые интенсивности полос этой молекулы прежде всего связаны с возможными концентрациями атомов водорода, азота и кислорода. Однако достаточные данные для суждений по этому поводу в настоящее время отсутствуют. Тем не менее представляется уместным обратить внимание на возможность реакции:

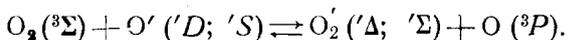


Если положить энергию диссоциации молекулярного азота равной 225 килокалориям на моль, а энергию диссоциации NH равной 90 килокалориям на моль (среднее значение энергии диссоциации CH и OH), то с учётом энергии активации этой реакции (12 килокалорий на моль) минимальное возбуждение вновь образующейся молекулы азота окажется равным 147 килокалориям на моль. В случае молекулярного азота в состоянии  $A^3\Sigma$  такому возбуждению соответствует, как наименьший, 1-й колебательный уровень. Не может ли служить поэтому отсутствие<sup>14</sup> в системе Вегарда-Каплана интенсивных полос от переходов с нулевого колебательного уровня состояния  $A^3\Sigma$  доказательством преимущественного возбуждения их за счёт реакции атомов азота с NH? Молекулярный азот в состоянии  $A^3\Sigma$  весьма метастабилен. Но нулевой колебательный уровень этого состояния не может заполниться, так как время жизни невелико из-за быстрого исчезновения возбуждённого молекулярного азота в реакции



Аналогичное, по видимому, имеет место и для  $\text{HO}_2' (F^3\Sigma)$  из-за реакции с N.

Как уже указывалось, атомарный и молекулярный кислород может возбуждаться в момент образования молекул при тройных соударениях. Возможно также возбуждение в результате промежуточных реакций с участием возбуждённых продуктов. Весьма существенно, однако, что возбуждённые атомы кислорода в состояниях  $'D$  и  $'S$  химически нестабильны. Они прежде всего могут вступать в реакцию с молекулами кислорода и конечными продуктами будут возбуждённая молекула и невозбуждённый атом кислорода:

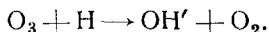


Такая прямая реакция обеспечивает более эффективное гашение возбуждённых состояний атомарного кислорода, чем обычное неупругое соударение. Обратная реакция может быть эффективной только при значительной диссоциации молекулярного кислорода. Отсутствие в излучении ночного неба полос молекулярного кислорода  $'\Sigma - {}^3\Sigma$  с более высоких колебательных уровней, чем нулевой,

поддаётся объяснению лишь в том случае, если допустить, что указанное излучение зарождается в слоях земной атмосферы, в которых содержание атомов N и H и молекул NO и CO, реагирующих с  $O_2(^1\Sigma)$ , настолько незначительно, что дезактивация кислородных молекул практически совершается за счёт многочисленных неупругих столкновений. В этом случае среднее время жизни  $O_2(^1\Sigma)$  на нулевом колебательном уровне значительно превосходит среднее время жизни в том же состоянии на более высоких колебательных уровнях, так как неупругое соударение  $O_2(^1\Sigma)$  на нулевом колебательном уровне связано со значительно большим и, следовательно, менее вероятным изменением энергии, чем при потере части колебательного возбуждения. Такие условия, повидимому, имеются только в более низких плотных слоях земной атмосферы. Можно поэтому предполагать, что вращательная температура полос молекулярного кислорода  $^1\Sigma - ^3\Sigma$  отображает температуру окружающей среды. Вращательная температура полос  $O_2(^1\Sigma - ^3\Sigma)$  очень низка (150--200° K)<sup>20, 21</sup>. Такая температура возможна лишь на высоте около 80 км в области температурного минимума. Изменение вращательной температуры полос  $O_2(^1\Sigma - ^3\Sigma)$  может объясняться изменением высоты возникновения этого излучения. Причиной исчезновения этих полос может быть, например, проникновение в нижние слои атмосферы больших количеств N, H, NO и CO.

Изложенная точка зрения характеризует лишь одно направление разгадок природы излучения ночного неба. Первые сведения о гидроксиле отвлекли на некоторое время внимание от вопроса, куда девается энергия ультрафиолетовой солнечной радиации, поглощаемая верхними слоями земной атмосферы и диссоциирующая её молекулы. Вместо объяснения излучения ночного неба как процесса, удаляющего энергию, выделяющуюся при образовании молекул, были предприняты поиски совершенно нового мощного источника энергии возбуждения гидроксила.

Поэтому нельзя не упомянуть озono-водородную гипотезу, впервые высказанную Бейтсом и Николетом и подробно развитую у нас И. С. Шкловским<sup>16</sup>. С точки зрения Шкловского, Бейтса и Николета возбуждение гидроксила обязано реакции



Тепловой эффект этой реакции обеспечивает максимальное возбуждение гидроксила только до 9-го колебательного уровня основного состояния. Авторами озono-водородной гипотезы также обстоятельство отождествляется с однозначностью озono-водородной реакции как источника возбуждения гидроксила. Увеличение населённости более низких колебательных уровней объясняется частичным возбуждением молекулы кислорода, являющейся одним из конечных продуктов озono-водородной реакции. Указывается, что молекулы

кислорода образуются в состояниях  $\Delta$  и  $\Sigma$ , что, однако, с нашей точки зрения, не является исчерпывающим предположением, так как эти молекулы могут возникать и в основном состоянии с высоким колебательным возбуждением. Вращательная температура полос гидроксила, равная  $260^\circ \text{K}$ , принимается за температуру окружающей среды. Высота излучающего слоя земной атмосферы определяется как одна из высот, на которой имеет место такая температура, т. е. 40, 75 или 80 км. Наибольшее предпочтение отдаётся высоте 75 км. И. С. Шкловский полагает, что на этой высоте имеется концентрация молекул озона, равная в дневное время, по Вульффу и Деммингу,  $10^7 \text{ см}^{-3}$ .

Исходя из такой концентрации озона и довольно правильной оценки скорости озono-водородной реакции ( $3 \cdot 10^{-12}$ ), вычисляется, что для поддержания интенсивности гидроксильного излучения на наблюдаемом уровне необходима концентрация атомов водорода, равная  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ . На этом, однако, разработка озono-водородной гипотезы пока обрывается.

В свете вышеизложенного, отсутствие в спектре ночного неба полос гидроксила от переходов с более высоких колебательных уровней, чем 9-й, не может служить однозначным указанием только на одну озono-водородную реакцию. Более существенно, что авторы новой гипотезы пренебрегают энергией активации озono-водородной реакции или пользуются сомнительными значениями этой величины. Её совместный учёт с тепловым эффектом не оставляет сомнения, что при этой реакции возбудится как предельный 10-й колебательный уровень гидроксила в основном состоянии.

Таким образом, довод о 9-м колебательном уровне не только не согласуется, но вообще противоречит озono-водородной гипотезе.

Определение высоты слоя, излучающего полосы гидроксила, по вращательной температуре этих полос также не представляется совершенно обоснованным. Уже опубликованы соображения, что вращательная температура полос излучения ночного неба не может точно отображать температуру окружающей среды, если время жизни молекулы в возбуждённом состоянии мало по сравнению с интервалами между соударениями этой молекулы или соизмеримо с ними. С нашей точки зрения, такие условия существуют у многих возбуждённых молекул верхних слоёв земной атмосферы, так как они быстро исчезают в химических реакциях, даже не успевая значительно дезактивироваться излучением. Таким образом, полное термодинамическое равновесие возбуждённых частиц с окружающей средой сомнительно. Как пример отсутствия такого равновесия, можно указать, что излучаемые земной атмосферой полосы гидроксила имеют температуру  $172^\circ \text{K}$ , если её определять по соотношению интенсивностей дублетов, в то время как их вращательная температура равна  $260^\circ \text{K}$ <sup>19</sup>. Пока не ясно, каково распределение

возбуждения между всеми степенями свободы молекул в момент их образования, невозможно и судить, разогреваются ли или охлаждаются вновь образовавшиеся молекулы, т. е. указать, выше или ниже температура среды, чем вращательная и кинетическая у излучающих молекул. Б. И. Степанов высказал предположение, что относительная населённость дублетных уровней не может изменяться в результате соударений и что температура гидроксила, определённая по соотношению интенсивностей дублетов, отображает поэтому температуру молекул в момент их возникновения. Это означает, что, возникнув, молекулы гидроксила постепенно разогреваются. Если излучающие молекулы гидроксила не находятся в равновесии с окружающей средой, то высказанное Б. И. Степановым соображение даёт основание предполагать, что температура среды, где возникают возбуждённые молекулы гидроксила, несколько превышает вращательную температуру их полос, равную  $260^{\circ}\text{K}$ .

Высказанные нами критические замечания по поводу некоторых деталей озono-водородной гипотезы не могут служить, однако, её полным отрицанием по существу. Наиболее серьёзны другие возражения, связанные с локализацией гидроксильного излучения на высоте  $75\text{ км}$ . Скорость озono-водородной реакции на этой высоте может поддерживать гидроксильное излучение на наблюдаемом уровне только в течение нескольких секунд. Предполагаемый запас озона будет израсходован в течение нескольких десятков секунд. Поддержание концентрации озона в течение ночи на неизменном уровне принципиально возможно при непрерывном образовании озона в результате тройных соударений атомов кислорода.

Однако среднее время жизни свободных атомов кислорода на высоте  $75\text{ км}$  значительно короче длительности ночи. Поэтому для поддержания более или менее постоянной концентрации атомарного кислорода необходимо непрерывное возникновение атомов кислорода. Пока не будет найден мощный источник энергии диссоциации молекул кислорода в ночное время на высоте  $75\text{ км}$ , озono-водородная гипотеза не представляется однозначно убедительной. Может показаться, что перемещение вверх спасёт озono-водородную гипотезу от недостатка и быстрого исчезновения атомарного кислорода. Но нами было уже показано, что свежеобразующийся возбуждённый озон исчезает немедленно, вступая в реакцию с атомами кислорода, образуя возбуждённые, но относительно химически стабильные молекулы кислорода. Непосредственная реакция водорода с возбуждённым озonom, как и с возбуждённой закисью азота, принципиально возможна, но количественно не существенна по сравнению с реакцией атомарного водорода с возбуждёнными молекулами кислорода.

В заключение следует также напомнить, что предполагаемая локализация излучающего гидроксил слоя на высоте  $75\text{ км}$  плохо со-

гласуется с локализацией на той же высоте излучения  $O_2(^1\Sigma - ^3\Sigma)$ , указывающего на очень малую концентрацию атомарного водорода. Но об этом уже сообщалось выше. Не вяжется такая локализация и с открытым Б. А. Багаряцким погасанием гидроксильного излучения в зоне полярных сияний, безусловно совершающихся на больших высотах.

Изложенное показывает, что состав, включая и слабые примеси, степень диссоциации молекул, температура и плотность верхних слоёв земной атмосферы в области ионосферы могут быть установлены исследованием и анализом излучения ночного неба. Успешное применение для этой цели нового метода исследования малоинтенсивных излучений является самым лучшим доказательством его высокой эффективности.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Красовский, ДАН **66**, № 1 (1949).
2. А. А. Калинин, В. И. Красовский и В. Б. Никонов, ДАН **66**, № 1 (1949).
3. В. И. Красовский, ДАН **70**, № 6 (1950).
4. В. И. Красовский, Известия Крымской обсерватории **5**, 100 (1950).
5. В. И. Красовский, ДАН **73**, № 4 (1950).
6. А. А. Калинин, В. И. Красовский и В. Б. Никонов, Известия Крымской обсерватории **6**, 119 (1950).
7. В. И. Красовский, ДАН **77**, № 3 (1951).
8. В. И. Красовский, ДАН **78**, № 3 (1951).
9. В. И. Красовский, ДАН **78**, № 4 (1951).
10. В. Т. Лукашениа и В. И. Красовский, ДАН **79**, № 2 (1951).
11. В. И. Красовский и В. Т. Лукашениа, ДАН **80**, № 5 (1951).
12. В. Т. Лукашениа и В. И. Красовский, ДАН **81**, № 5 (1951).
13. Б. А. Багаряцкий, В. И. Красовский и М. И. Мордухович, ДАН **82**, № 4 (1952).
14. И. А. Хвостиков, Свечение ночного неба (1948).
15. С. Ф. Родионов Известия АН СССР, сер. физич. **14**, № 3 (1950).
16. И. С. Шкловский, Известия Крымской обсерватории **7**, 34 (1951).
17. П. Койпер. Атмосфера земли и планет (1951).
18. A. V. Meinel, Astrophys. J. **111**, 555 (1950).
19. A. V. Meinel, Astrophys. J. **112**, 120 (1950).
20. A. V. Meinel, Astrophys. J. **112**, 464 (1950).
21. J. Dufay et M. Dufay, Comptes Rendus **232**, 426 (1951).
22. J. Dufay, Comptes Rendus **231**, 1531 (1950).
23. G. Kvifte, Nature **168**, 741 (1951).
24. J. Kaplan, Phys. Rev. **78**, 82 (1950).

## ПРИМЕЧАНИЕ ПРИ КОРРЕКТУРЕ

Мейнел в статье «Спектры излучения атмосферы и полярных сияний» в *Reports on Progress in Physics* XIV, 121 (1952) называет все инфракрасные полосы спектра ночного неба полосами Мейнела. Такая терминология вызывает серьезные возражения. В действительности Мейнел не обнаружил никаких новых полос излучения ночного неба. В 1950 г. им опубликована высококачественная репродукция со спектра ночного неба до 8500 Å. Однако на ней воспроизведены все полосы в этой области, открытые Слайфером ещё в 1933 г., хотя и не отождествленные им до конца [см. *Mon. Not. P. A. S.* 93, 657 (1933)]. К сожалению, из-за широкой рекламы в США неверных работ Стеббинса, Уайтфорда и Свингса [см. *Phys. Rev.* 66, 255 (1944); *Astrophys. Journ.* 101, 39 (1945)] работа Слайфера была предана забвению. Спектр Мейнела отличается от спектра Слайфера большей дисперсией. Заслугой Мейнела является отождествление им некоторых полос этого излучения как колебательно-вращательного спектра гидроксила, что и было отмечено своевременно в советской печати. Однако изучение инфракрасного излучения ночного неба, начатое в СССР ещё в 1939 г. [см. УФН 33, 572 (1947)], проводилось независимо от Мейнела и не являлось продолжением его исследований. Полученные в результате советских работ спектры ночного неба до 12 000 Å не только полностью подтвердили результат Слайфера, но и привели к открытию ранее совершенно не известных и не предполагаемых полос. Весьма характерно, что Мейнел в статье, указанной в начале, отмечает, что для получения фотографии спектра ночного неба около 10 000 Å с помощью самых лучших современных фотографических материалов потребовалась бы тысячасовая экспозиция. В работах же, выполненных в СССР, выдержки не превышали нескольких часов.

Приоритет, уникальность и значимость советских исследований инфракрасного спектра излучения ночного неба за пределами 8500 Å признаются Дюфе [см. *Ann. de Geophys.* 7, 1 (1951)], Пендорфом [см. *Landolt-Bornstein Zahlenwerte und Funktionen III, 774* (Springer-Verlag, 1952)] и даже Мейнелом, хотя последний сообщает об этом только в примечании при корректуре к статье, указанной в начале. Из этого примечания следует, что он знаком лишь с первыми советскими работами в ДАН 66, № 1 (1949); 70, № 6 (1950). Дюфе и Пендорф также называют все инфракрасные полосы излучения ночного неба полосами Мейнела и сообщают, что работы, выполненные в СССР, являются хорошим подтверждением работ Мейнела. В статье, указанной в начале, ещё сообщается о непостоянстве интенсивности полосы кислорода в излучении ночного неба у 8600 Å, также называемой Мейнелом полосой Мейнела-Каплана, хотя её существование предполагалось Слайфером ещё в 1933 г. В отличие от своих ранее опубликованных работ, Мейнел сообщает, что по сравнению с соседними излучениями эта полоса кислорода иногда достигает преобладающей интенсивности. Однако в советской печати об этом сообщалось до Мейнела [см. ДАН 81, № 5 (1951)] и новыми являются лишь несколько слов Мейнела, что полоса у 8600 Å усиливается в спектре ранней зари. Там же Мейнел высказывает предположение о природе диффузного излучения в инфракрасном спектре ночного неба, пока нигде не описанного, кроме советских работ [см. ДАН 79, № 2 (1951); 80, № 5 (1951); 81, № 5 (1951)]. Предполагается, что оно создается при рекомбинации молекул гидроксила из атомов кислорода и водорода в двойных соударениях. В работах, опубликованных в СССР, сообщалось, что инфракрасное излучение ночного неба (диффузное или в виде полос) не исчерпывается только колебательно-вращательными полосами гидроксила [см. ДАН 79, № 2 (1951); 80, № 5 (1951); 81, № 5 (1951)]. Повидимому, Мейнел не может не принимать во внимание такие фактические данные.