1937 г. Т. XVII, вып. 2

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

Физический институт Академии наук СССР БИБЛИОТЕКА

# СВЕЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА

*И. А. Хвостиков, Ленинград*

## Введение

Свечение ночного неба, несмотря на свою очень малую яркость, принадлежит к числу великих явлений природы. Сущность этого явления состоит в следующем.

Примерно 35 лет назад было сделано интересное открытие: тщательные измерения яркости ночного неба показали, что только четверть всего света, посылаемого нам ночным небом, принадлежит звездам и туманностям. Чем же обусловлена остальная часть света?

В результате многолетних кропотливых исследований удалось установить, что светится сама земная атмосфера. Светятся атомы и молекулы кислорода, молекулы азота и других газов, входящих в состав земной атмосферы. На какой высоте сосредоточено это свечение, неизвестно до сих пор, но, повидимому, эта высота не меньше 100 *км*. Спектры свечения ночного неба во многом похожи на спектры северных сияний, но во многом они существенно от них отличаются. Мы имеем как бы непрерывное сияние неба, во многом похожее, но во многом и отличное от северных сияний.

Какова природа этого явления? Чем вызывается непрерывное свечение огромных воздушных масс на высоте 100—200 *км*? Окончательное решение этого вопроса еще не дано, — для этого само явление слишком сложно, а наши знания о физических свойствах высоких слоев атмосферы слишком ограничены. Но интенсивная исследовательская работа, которая ведется во всех странах для решения этого вопроса, дала и продолжает давать интересные и важные результаты, которые явятся существенным вкладом в науку о земной атмосфере.

Настоящая статья является попыткой систематически изложить весь основной материал по свечению ночного неба и осветить те проблемы, которые возникли в результате многолетнего изучения этого интересного явления.

## 1. Ньюкомб. Измерения яркости неба

Хотя известный американский астроном Симон Ньюкомб никогда не занимался вопросом о собственном свечении неба, тем не менее историю этого вопроса нужно бесспорно начинать от него.

В 1901 г. в американском „Астрономическом журнале“ была напечатана статья Ньюкомба[1] под названием „Грубая попытка определить полный свет от всех звезд“. В этой статье Ньюкомб впервые ставит следующий важный вопрос: может ли свет всех звезд, которые мы обнаруживаем простым глазом в телескоп, обусловить яркость ночного неба, наблюдаемую в действительности?

В результате собственных остроумных по методике измерений Ньюкомб приходит к неожиданному для себя заключению, что всех звезд, которые мы можем обнаружить на небе, совершенно недостаточно для оправдания истинной яркости ночного неба. Ньюкомб высказывает предположение, что существует множество звезд, не доступных нашему наблюдению, на счет которых и должна быть отнесена большая часть яркости ночного неба.

После Ньюкомба целый ряд лиц продолжали его наблюдения яркости ночного неба. Сюда относятся работы Бернса[2], Таунлея[3], Интэма[4], Фабри[5]. Однако данные разных авторов оказывались весьма противоречивыми, и хотя почти всегда получался недостаток звездного света для объяснения всей яркости ночного неба, тем не менее величина этого недостатка была у всех разной. 10 лет работы не могли решить этого вопроса, и еще в 1910 г. высказывалось предположение, что дело сводится к большой трудности измерений подобного рода и связанным с этим ошибкам измерения и что при более точных измерениях яркость неба и звездный свет сбалансируют друг друга. Между тем еще в 1901 г. была опубликована работа, которая, если бы она сразу обратила на себя должное внимание, могла бы направить мысль на правильный путь. Вихерт[6], работавший в Геттингене, обнаружил, что „в наших широтах (широта Геттингена 51°30′) северные сияния являются гораздо более частым явлением, чем это обычно думают“.

Напомним, что в спектре северных сияний, усиленно изучавшихся еще в конце прошлого века, самой яркой частью спектра является очень интенсивная зеленая линия, определяющая, как известно, зеленоватый цвет всего северного сияния. Эту зеленую линию Вихерт обнаружил при наблюдении в Геттингене.

Для своих наблюдений Вихерт построил светосильный спектроскоп прямого зрения. Этот спектроскоп имел фокусное расстояние 108 *мм* при диаметре линзы 27 *мм*. Таким образом относительное отверстие спектроскопа было 1 : 4, что по тем временам являлось очень большой величиной. Сам Вихерт называет свой спектроскоп „необыкновенно светосильным“.

С этим спектроскопом Вихерт отправился для наблюдений в окрестности Геттингена (чтобы не мешали огни и пыль города). „Первый ясный вечер, — пишет Вихерт[6], — когда я смог применить свой прибор, был 1 ноября 1901 г., и я испытал великую радость, когда при первом же взгляде в северной стороне неба я обнаружил линию полярного сияния (зеленую линию), которая была видна вполне отчетливо“. Зеленая линия обнаруживалась во всех частях неба, кроме западной части горизонта, где мешали огни города.

Вывод, к которому приходит Вихерт, состоит в том, что свет полярного сияния наблюдается на широте Геттингена гораздо чаще, чем это можно было бы думать: повидимому, каждый вечер. Вихерту не пришло в голову сопоставить свои наблюдения с результатами Ньюкомба, изложенными выше. Не сделали этого сопоставления и сам Ньюкомб и все остальные, повторявшие его измерения.

Голландский ученый Интэма [4] подошел к истине наиболее близко. Следуя за Ньюкомбом, он измерял яркость ночного неба и вычислял количество света, которое могут дать все звезды. Обсуждая свои результаты, он, в конце концов, высказывает гипотезу, которая позволяет по праву считать его основоположником учения о собственном свечении неба. Интэма приходит к заключению, что „свет неба ночью состоит из двух частей, из которых одна приходит к нам прямо от звезд, а другая возникает в результате некоторых процессов в атмосфере. Эта вторая часть, так называемый „зеленый свет", только частично является рассеянным светом звезд. Кажется вероятным, что избыток света полностью или частично обусловлен непрерывным сиянием". Эта гипотеза была высказана Интэма в 1909 г.

Гипотеза Интэма была встречена отрицательно [5]. Но 10 лет спустя обнаружилось, что эта гипотеза правильна.

## 2. Открытие Слайфера. Наблюдения Релея

В течение четырех лет, начиная с 1915 г., английский ученый Слайфер производил наблюдения, результат которых он решился опубликовать только в 1919 г.[7], когда он окончательно убедился в реальности открытого им факта и всесторонне изучил его.

В июне 1915 г. Слайфер, фотографируя в течение нескольких ночей подряд спектр млечного пути, обнаружил на негативе в желто-зеленой части спектра слабую линию. Взяв фотопластинки другого сорта, чувствительность которых была велика в данной области спектра, он смог получить эту линию за одну ночь. Измерения длины волны показали, что эта линия является той самой знаменитой зеленой линией, которая всегда присутствует в спектрах северных сияний. Легко можно было себе представить удивление Слайфера, если указать, что его наблюдения производились на широте 35°12′, где никогда до тех пор северное сияние никем не наблюдалось.

Слайфер начал производить съемку каждую ночь. Его удивление стало еще большим, когда оказалось, что зеленую линию можно сфотографировать на светосильном спектрографе каждую ночь. При этом свечение не было сосредоточено в какой-либо определенной области, каждую ночь оно заполняло все небо: спектрограф снимал зеленую линию независимо от того, в какую часть неба его направляли.

Слайфер понял истинный смысл своего открытия. Изучив литературу, он узнал о наблюдениях Вихерта и об измерениях яр-

кости неба, дававших всегда избыток света по сравнению со светом всех звезд, и о гипотезе Интэма. Его съемки показали, что, действительно, каждую ночь все небо излучает свет, напоминающий свет северных сияний. За $3^1/_2$ года съемок Слайфер получил свыше 100 снимков, и на каждом из них имелась зеленая линия.

Фотографируя в зените и ближе к горизонту, Слайфер заметил, что яркость зеленой линии получается тем большей, чем ближе к горизонту производится съемка. Это легко могло быть объяснено в предположении, что где-то на высоте в атмосфере имеется слой, в котором и возникает „непрерывное сияние", как его называл Слайфер („permanent aurora").

Имея в своем распоряжении большое число снимков с зеленой линией, Слайфер произвел тщательные измерения ее длины волны. Измерения дали $\lambda = 5578{,}05$ Å.

Что касается возможности приписать зеленую линию тому или иному газу, то здесь сразу же встретились непреодолимые препятствия: ни у одного из газов в спектре не было линии с такой длиной волны. Природа зеленой линии северных сияний и свечения ночного неба оставалась неизвестной.

Открытие Слайфера сразу привлекло всеобщее внимание. Уже в том же 1919 г., в котором была напечатана работа Слайфера, появились три работы, посвященные вопросу о свечении ночного неба. Было высказано предположение, что избыточная часть света ночного неба обусловлена рассеянием солнечных лучей очень разреженными газами, которые могут простираться очень далеко за пределы тени Земли. В связи с этим предположением Релей[8] предпринял исключительно интересные наблюдения, пытаясь определить цвет ночного неба и сравнить его с цветом Солнца и Луны, а также с цветом дневного неба. Дело в том, что рассеянный свет Солнца по спектральному составу сильно отличается от прямого солнечного света. Свет Солнца имеет максимум энергии при длине волны 5550 Å, а в синюю и красную стороны от этого максимума энергия заметно уменьшается, как это следует для температурного излучения при температуре около 6000° К (рис. 1, кривая *а*). Но при рассеянии солнечного света земной атмосферой получается перераспределение энергии по спектру. Это обусловлено тем, что рассеиваются не все длины волн одинаково: коэфициент рассеяния обратно пропорционален четвертой степени длины волны света, благодаря чему синие лучи рассеиваются сильней красных. В результате цвет неба оказывается не бело-желтым, как цвет Солнца, а голубым. На рис. 1 (кривая *б*) для сравнения приведено относительное распределение энергии

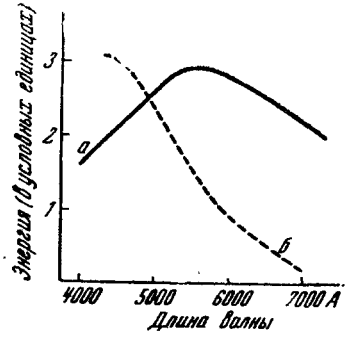

Рис. 1.

в спектре рассеянного света неба. Здесь нет уже спадания кривой в синей части, наоборот, энергия синих лучей очень велика.

Релей поставил себе задачей выяснить, в какой мере распределение энергии в свете ночного неба соответствует рассеянному солнечному свету.

Релей фотографировал небо сквозь специально подобранные светофильтры и мог судить о цвете ночного неба. Эти данные он сравнивал с цветом голубого дневного неба, а также с цветом Солнца и Луны.

На основании полученных данных Релей приходит к следующим исключительно важным выводам. Ночное небо является более желтым или менее голубым, чем ясное дневное небо. Сравнение с прямым солнечным или лунным светом показывает, что ночное небо по цвету близко к ним подходит.

Релей произвел также визуальные наблюдения. Он брал два светофильтра — один сине-голубой, другой желтый. Ночью они казались одинаково яркими. Но в сумерках синий фильтр казался более ярким. Это также подтвердило более желтый цвет неба ночью.

Релей указывает, что эти его результаты противоречат предположению, что происходит рассеяние солнечного света разреженными газами, простирающимися очень далеко за пределы тени Земли. В этом последнем случае цвет ночного неба должен был бы быть таким же голубым, как и у дневного неба.

### 3. Наблюдения зеленой линии интерференционным методом

Природа зеленой линии продолжала оставаться неясной. При попытках отнести эту линию к спектру того или иного газа особенно большое значение имел вопрос о точном значении ее длины волны, а также вопрос о структуре самой линии: о ее ширине, о наличии нескольких близких компонент (тонкая структура линии) и др. Но решение таких вопросов возможно только при применении спектральных приборов высокой разрешающей силы. Однако простое фотографирование на очень светосильных спектрографах требовало многих часов экспозиции, а предпринятая Слайфером попытка сфотографировать зеленую линию на спектрографе большой дисперсии потребовала свыше 100 час. экспозиции в течение десятков ночей подряд. При столь малой интенсивности казалось почти невозможным сфотографировать зеленую линию с помощью прибора высокой разрешающей силы, например с помощью интерферометра.

Однако известному американскому астроному Бэбкоку удалось решить эту задачу и притом удивительно простыми средствами. При осуществлении своего опыта Бэбкок исходил из общеизвестного, но часто упускаемого из виду соображения, что всякое увеличение дисперсии должно ослаблять яркость только для сплошного, но не для линейчатого спектра.

Схема опытов Бэбкока была необыкновенно проста[9]. Вся установка состояла всего лишь из двух частей: интерференционный аппарат, в качестве которого Бэбкок взял эталон Фабри-Перо, и фотографическая камера со светосильным объективом. Эталон Фабри-Перо попросту ставился под открытым небом в направлении на север, а за ним помещался объектив фотоаппарата, сфокусированный на параллельный пучок света и дававший в своей фокальной плоскости изображение интерференционных колец, которые и фотографировались.

Первая же попытка Бэбкока снять на своей установке зеленую линию при экспозиции 10 час. в ночь 25—26 февраля 1922 г.

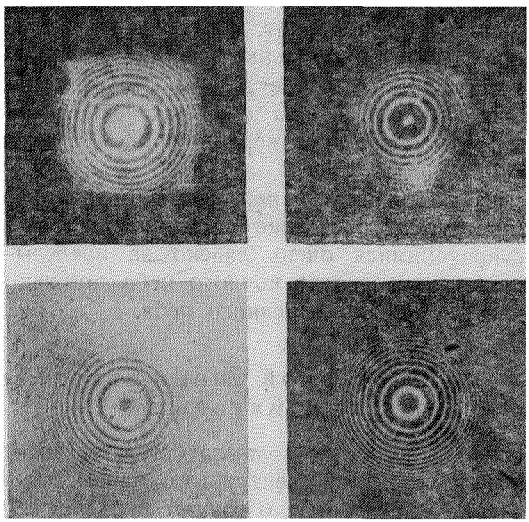

Рис. 2.

в Пассадене увенчалась полным успехом. В дальнейшем Бэбкок продолжал свои опыты в обсерватории Маунт-Вильсон в США. Ему удалось получить свыше десятка отличных фотографий с отчетливыми кольцами от зеленой линии, вполне пригодных для точных промеров (рис. 2). Первый вопрос, который нужно было решить, — это по возможности более точное определение длины волны зеленой линии свечения неба.

В результате сложной статистической обработки полученного материала Бэбкок вывел следующее значение для длины волны зеленой линии свечения ночного неба: $\lambda = 5577{,}350 \pm 0{,}005$ Å.

В дальнейшем эти данные Бэбкока были подтверждены с точностью до 0,003 Å (опытами Мак-Леннана[14] и измерениями Карио[15] с помощью вогнутой дифракционной решетки).

Определив длину волны, Бэбкок попытался измерить ширину зеленой линии. Дело в том, что даже если атомы излучали бы строго

монохроматический свет, то вследствие теплового движения атомов свет будет восприниматься как не вполне монохроматический (эффект Допплера). Допплерова ширина линии $\Delta$ определяется, как впервые вывели Фабри и Бюиссон, следующим образом:

$$\Delta = 0{,}82 \cdot 10^{-6} \lambda \sqrt{\frac{T}{M}}.$$

Здесь $\Delta$ — ширина линии, длина волны которой есть $\lambda$; $T$ — абсолютная температура излучающего газа; $M$ — атомный вес.

На основании точных промеров этих снимков интерференционных колец Бэбкок смог определить ширину зеленой линии. Она оказалась равной 0,035 Å. Если бы она была больше, то интерференционные кольца были бы менее резкими, чем это наблюдалось в действительности. Если принять это значение для $\Delta$ и считать в соответствии с часто высказываемым предположением, что температура в верхних слоях атмосферы, начиная от некоторой высоты, остается, примерно, постоянной и равной —55° С, или 218° К, то, подставив эти числа в написанную выше формулу, мы получим для зеленой линии $M = 3{,}8$. Ближе всего это подходит к массе атома гелия (атомный вес гелия 4). Для водорода ($M = 1$) мы должны были бы получить ширину $\Delta = 0{,}07$ Å, что явно больше наблюденной величины. Правда, уменьшения $\Delta$ в предположении о водороде можно было бы достигнуть понижением предполагаемой температуры $T$ верхних слоев атмосферы. Однако для получения нужной $\Delta$ пришлось бы $T$ (температура входит под корнем квадратным) уменьшить в 4 раза, т. е. положить $T = 54°$ К или же —219° С. Если предположить какой-то газ более тяжелый, чем гелий, то ширина линии должна была бы быть меньше наблюденной, и пришлось бы допустить, наоборот, очень высокие температуры для верхних слоев атмосферы.

Вопрос не может быть решен однозначно. Однако получаемые таким образом данные представляют, конечно, огромный интерес. Особую актуальность приобретает вопрос об отождествлении зеленой линии путем отыскания соответствующей линии в спектре какого-либо газа.

## 4. Гипотеза замерзшего азота и ее опровержение

В 1923 г. Вегард[10] высказал гипотезу, которой было суждено сыграть очень видную роль. Вегард предположил, исходя из большого процентного содержания азота в воздухе, что большинство линий северного сияния, в том числе зеленая линия, испускаются азотом. Однако в спектре излучения газообразного азота соответствующих линий нет. Для объяснения этого факта Вегард высказал гипотезу, что благодаря очень низкой температуре, господствующей на больших высотах, азот может там находиться в особом молекулярном состоянии в виде твердого тела или очень разреженного газа, который при бомбардировке его электронными лучами излучает ряд полос, отсутствующих в его спектре в обычных

условиях и являющихся как раз линиями спектра северных сияний. Основной вариант этой гипотезы предполагал, что очень размельченные частицы твердого азота в виде замерзшей азотной пыли во взвешенном состоянии находятся в слоях на высоте 100 *км* и выше (как раз там, где происходит большая часть северных сияний). Ниже этой высоты твердой азотной пыли почти вовсе нет, потому что в низших слоях температура оказывается более высокой. Именно поэтому ниже 100 *км* северные сияния почти вовсе не наблюдаются.

Вскоре гипотеза твердого азота как источника спектра северных сияний и зеленой линии приковала к себе всеобщее внимание благодаря тому, что Вегард обнаружил факты, которые были, казалось, неопровержимым доказательством правильности его гипотезы. Именно Вегард произвел в знаменитой лаборатории низких температур Каммерлинг Оннеса в Лейдене ряд опытов с азотом при низких температурах при бомбардировке азота электронными лучами. Вся часть опытов, касавшаяся непосредственно техники низких температур, осуществлялась самим Каммерлинг Оннесом. Оказалось, как опубликовал вскоре Вегард, что при очень низких температурах твердый азот при бомбардировке электронными лучами ярко светится и при этом в спектре этого свечения обнаруживается большинство линий северных сияний. Нетрудно представить себе, какое впечатление произвело это открытие на всех. Старая загадка северных сияний была, казалось, решена.

Однако открытие Вегарда оказалось ошибкой.

В Америке, в Канаде, при университете в Торонто имеется другая лаборатория низких температур, возглавляемая известным физиком Мак-Леннаном. Как только Вегард опубликовал свою гипотезу твердого азота, Мак-Леннан взялся за проверку этой гипотезы. Его исследования, произведенные им в 1923—1925 гг. совместно со Шрумом, дали существенно иные результаты.

Важнейшие выводы, к которым пришли Мак-Леннан и Шрум, были таковы[11]: когда пары азота при температуре —252° С облучаются быстрыми и медленными электронами, то пары флуоресцируют, и спектр свечения включает три зеленых линии: $\lambda = 5556$ Å, $\lambda = 5617$ Å и $\lambda = 5654$ Å. Одну из них Вегард ошибочно отождествил с зеленой линией северных сияний. Кроме флуоресценции, сильно охлажденный азот дает также яркую фосфоресценцию, содержащую линию $\lambda = 5231$ Å. Кроме азота, были проделаны такие же опыты с охлажденным аргоном и рядом других газов. У аргона оказались зеленые линии с длиной волны $\lambda = 5648{,}3$ Å и $\lambda = 5607{,}4$ Å.

Авторы приходят к заключению, что „на основании того факта, что линии спектров свечения охлажденных азота и аргона, возбуждаемых к свечению каналовыми лучами, по длине волны не совпадают даже отдаленно с зеленой линией $\lambda = 5577$ Å, приходится заключить, что природа зеленой линии полярных сияний не может быть связана с элементами азот или аргон“.

## 5. Решение вопроса о происхождении зеленой линии

В 1925 г. Мак-Леннан и Шрум опубликовали работу [12], в которой им удалось обнаружить новое, прежде неизвестное излучение кислорода в зеленой части спектра. Новая линия кислорода, как показали точные измерения, имела длину волны $\lambda = 5577{,}35 \pm 0{,}15$ Å, т. е. совершенно точно совпадающую с длиной волны таинственной зеленой линии полярных сияний и свечения неба.

Каким образом Мак-Леннану и Шруму удалось заставить кислород излучать зеленую линию, которую прежде никогда в лабораторных опытах он не изучал? Оказалось, что для появления в спектре свечения кислорода при прохождении сквозь него электрического разряда нового излучения в виде зеленой линии требуются некоторые весьма специальные условия.

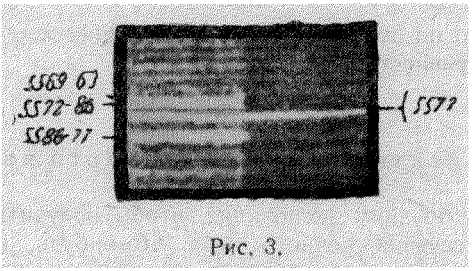

Рис. 3.

Мак-Леннан и Шрум поставили первоначально задачу чисто эмпирически. Они решили взять газовую смесь по возможности того же состава, что и в верхних слоях атмосферы, и пытаться возбуждать эту смесь к свечению, пропуская сквозь нее электрический разряд при разных условиях, и посмотреть, каков спектр этого свечения.

Каким может быть состав атмосферы на очень больших высотах (100 *км* и выше)? Если считать, что перемешивания атмосферы (во всяком случае в стратосфере) не происходит, то с высотой состав воздуха должен меняться в сторону увеличения относительного содержания легких газов. Убывание плотности данного газа с высотой происходит, согласно известной барометрической формуле, тем быстрее, чем тяжелее газ, т. е. чем больше его молекулярный вес. Таким образом на большой высоте кроме азота и кислорода в большом количестве должны присутствовать водород и гелий. Когда Мак-Леннан и Шрум осуществили электрический разряд в смеси кислорода и гелия с большим содержанием гелия, оказалось, что в излучении кислорода появляется зеленая линия $\lambda = 5577{,}35$ Å. При тех же условиях, но в отсутствии гелия зеленая линия в спектре кислорода исчезала.

На рис. 3 приведен спектр, снятый Мак-Леннаном и Шрумом, содержащий зеленую линию $\lambda = 5577$ Å. Слева — спектр сравнения (спектр железной дуги).

Усиление зеленой линии в присутствии примеси гелия заставило Мак-Леннана подробней исследовать это явление. Он изучил зависимость яркости зеленой линии от давления, от силы тока сквозь разрядную трубку и др. Кроме того, он попробовал в качестве примеси брать не только гелий, но и целый ряд других газов[13]. Оказалось, что усиливающим действием обладает не только неон, но и все инертные газы. Но совершенно удивительное по силе действие было обнаружено у аргона. Выяснилось, что для получения максимальной яркости зеленой линии кислорода разряд нужно собственно производить не в кислороде с примесью аргона, а в аргоне с примесью кислорода. При давлении аргона в разрядной трубке, соответствующем 10 *мм* ртутного столба, и при давлении кислорода в 1 *мм* яркость зеленой линии оказывалась примерно в 1000 раз большей, чем при самых благоприятных условиях в чистом кислороде. При этом аргон оказывает такое усиливающее действие именно по отношению к зеленой линии $\lambda = 5577$ Å, мало влияя на интенсивность других линий.

## 6. Спектры свечения ночного неба

Нужна очень большая экспозиция, чтобы получить на пластинке со спектром свечения ночного неба что-нибудь, кроме зеленой линии. Релей был первым, который обнаружил в спектре свечения ночного неба, кроме зеленой линии, еще другие линии. В период времени 1921—1923 гг. он производил съемки на специально им построенном спектрографе с призмой прямого зрения с относительным отверстием $f:0{,}9$. Он брал экспозицию от 100 до 200 час. (от 15 до 30 ночей подряд; если учесть, что обычно можно снимать только во время 4-й и 1-й четверти Луны, чтобы не мешал ее свет, то 30 ночей можно набрать только за два месяца). Дисперсия его спектрографа была ничтожной: длина видимого спектра составляла всего лишь 2,5 *мм*.

На полученных снимках Релей констатировал присутствие сплошного спектра с двумя фраунгоферовыми линиями — солнечными линиями поглощения $H$ и $K$[16]. Он наблюдал также две полосы излучения в синей части спектра с длинами волн 4435 и 4210 Å.

В это же самое время (зима 1922/1923 г.) Дюфей снял ряд спектров свечения ночного неба с помощью спектрографа с относительно большой дисперсией. Этот спектрограф, построенный Фабри и Бюиссоном для изучения спектров большой туманности Ориона, имел две кварцевые призмы и объектив с относительным отверстием $f:3{,}5$. Для получения следов почернения требовалась экспозиция 50—100 час. На этих снимках в области 4800—3100 Å

было обнаружено свыше 10 линий излучения. Кроме того, на ряде снимков с несомненностью присутствовал сплошной спектр с фраунгоферовыми линиями[17].

Две полосы излучения в синей части спектра, обнаруженные Релеем, на этих снимках Дюфея отсутствовали. Однако известный уже нам Слайфер, первый обнаруживший в спектре свечения ночного неба зеленую линию, подтвердил наличие двух полос излучения в синей части спектра. Он нашел для них следующие длины волн: 4450 и 4180 Å.

Несколько лет спустя Зоммер, снимая в Геттингене спектры свечения ночного неба, обнаружил очень большое число линий в сине-голубой и фиолетовой части спектра[18]. В интервале длин волн от 5130 до 3578 Å он измерил сорок полос и линий излучения, из которых около тридцати совпадало с линиями в спектре северных сияний (табл. 1) и двадцать две полосы были идентифицированы с полосами азота.

Необходимо, однако, отметить, что этот богатый линиями и полосами спектр был наблюден Зоммером только в одну ночь из числа 41 ночи, в течение которых производилась съемка. Из 41 снимка на 28 не было ничего, кроме зеленой линии, а на 18 снимках не было вообще ничего. Тот единственный снимок, на котором получилось так много линий и полос, снимался с той же экспозицией и в тех же условиях, как и остальные сорок пластинок. Это указывает на непостоянство свечения ночного неба от ночи к ночи и во всяком случае на наличие каких-то возмущений.

Весьма подробно спектры свечения ночного неба были изучены Дюфеем. В течение осени 1931 г. (сентябрь — ноябрь) Дюфей снимал спектры на спектрографе с двумя призмами из флинта с ребром в 11 *см*. Этот спектрограф имел объектив „Kinoplasmat" с фокусным расстоянием 80 *мм* и относительным отверстием $f$: 1,5; он давал спектр, длина которого от красной до ближней ультрафиолетовой области составляла 1 *см*, что позволяло достаточно точно производить измерения длин волн. Беря экспозицию от 22 до 85 час., Дюфей получил ряд хороших спектров с большим количеством линий и полос в сине-голубой части спектра[19]. Применяя более светосильный спектрограф с меньшей дисперсией ($f$: 1,25, фокусное расстояние 25 *мм*), Дюфей мог получать наиболее интенсивные полосы, экспонируя только одну ночь (8—9 час.). Однако благодаря малой дисперсии измерения длин волн были связаны с большими ошибками.

Дюфею удалось также снять на кварцевом спектрографе спектр в ультрафиолетовой области. Этот спектр весьма слаб, но на нем можно различить, кроме сплошного спектра с фраунгоферовыми линиями, также ряд линий и полос излучения[20].

Кроме Зоммера и Дюфея, спектр свечения ночного неба в сине-голубой части удалось снять также в Индии Раманазану (февраль 1932 г.), работавшему на однопризменном спектрографе[21]. Он обнаружил наличие большей части тех полос и линий, которые

Таблица 1

| Ночное небо | | | Полярные сияния |
|---|---|---|---|
| Зоммер | Дюфей * | Раманазан | Вегард |
| 5 130 | | | 5 139,0 |
| | 4 866 (2) | | 4 996,0 |
| 4 860 | 4 837 (3) | | [4 857,4] |
| | 4 780 (1) | | [4 779,2] |
| 4 709 | 4 708 (1) | | 4 708,8 |
| | | | 4 698,4 |
| | 4 679 (2) | | |
| 4 650 | | | 4 651,9 |
| | 4 615 (1) | | |
| | 4 576 (2) | | |
| 4 552 | 4 554 (3) | 4 555 | 4 552,1 |
| | 4 512 (1) | | |
| | 4 500 (1) | | |
| | 4 478 (1) | | 4 480,7 |
| 4 457 | 4 447 (3) | | |
| 4 422 | 4 421 (5) | 4 430 | 4 423,6 |
| | 4 382 (1) | | 4 375,8 |
| | 4 351 (1) | | 4 340,1 |
| | 4 330 (1) | | |
| 4 278 | 4 278 (1) | | 4 277,4 |
| 4 270 | 4 270 (1) | 4 270 | 4 269,4 |
| 4 238 | 4 237 (1) | | 4 236,2 |
| 4 209 | | | |
| 4 200 | | | 4 199,2 |
| 4 186 | 4 180 (4) | 4 180 | 4 182,5 |
| | 4 116 (3) | | 4 142,6 |
| | 4 100 (2) | 4 090 | |
| | 4 082 (3) | | [4 078,2] |
| 4 057 | | | 4 058,5 |
| | 4 044 (1) | 4 040 | |
| | 4 031 (1) | | |
| | 4 020 (1) | | |
| 3 999 | | | 3 998,5 |
| 3 976 | 3 980 (3) | 3 960 | [3 981,3] |
| 3 946 | 3 952 (1) | | |
| 3 941 | 3 941 (1) | | 3 941,3 |
| 3 916 | 3 915 (1) | | 3 914,4 |

* Интенсивности (даны в круглых скобках) оценены приблизительно по пятибальной системе.

были у Дюфея. Таким образом можно констатировать, что спектры свечения получаются сходными на весьма различных широтах (у Дюфея — Лион — широта 45°,42′; у Раманазана — Поона, Индия — 18°90′).

Результаты измерений длин волн в спектре свечения ночного неба в интервале от 5000 до 3800 Å Зоммером, Дюфеем и Раманазаном приведены в табл. 1. В последней графе для сравнения приведены данные для северных сияний (по Вегарду).

Забегая вперед, укажем, что большая часть полос в табл. 1 принадлежит к спектру азота. Однако интерпретация целого ряда других линий встретила большие затруднения, о чем будет речь впереди.

На рис. 4 приведена микрофотометрическая кривая, снятая с одной из спектрограмм Дюфея[22]. На этой микрофотограмме, кроме яркой зеленой линии 5577 Å, указано еще несколько линий и полос в синей части спектра.

Рис. 4.

Переходим теперь к длинноволновой области спектра. Изучение спектров в длинноволновой области имеет дополнительные трудности. Дело в том, что чувствительность фотографических пластинок мала в красной части спектра, и даже при съемке на панхроматических пластинках приходится экспонировать чрезвычайно долго. Кроме того, дисперсия спектрографа в красной части спектра гораздо меньше, чем в синей, что особенно чувствительно, так как и без того дисперсия светосильных спектрографов благодаря использованию короткофокусных объективов ничтожно мала. По этим причинам в течение 10 лет (до 1929 г.) не удавалось обнаружить в красно-оранжевой части спектра никакого излучения неба.

Но, с другой стороны, еще в 1921 г. Релей[8] при наблюдении сквозь фильтры установил, что свет ночного неба относительно очень богат красным светом. Этот свой вывод Релей получил и при визуальном и при фотографическом изучении состава света ночного неба сквозь фильтры, и, естественно, вставал вопрос о том, что в красной части спектра должно существовать излучение неба.

И действительно, это излучение было обнаружено в 1929 г. Его открыл Слайфер[23], который обнаружил в оранжево-красной части спектра целую группу линий со следующими длинами волн: 7270, 6870, 6530, 6315 и 5892 Å.

Несколько лет спустя две из этих линий обнаружил также Дюфей[20], который благодаря большой чувствительности своих пластинок в зеленой части нашел еще несколько слабых зеленых линий[24]. Длины волн линий, обнаруженных Дюфеем, были такими: 6315, 5892, 5662, 5478 и 5316 Å.

Но особенно богатый спектр в этой области получил Зоммер. В 1932 г. он опубликовал работу[25], в которой приводил около 30 линий в интервале длин волн от 5200 до 7300 Å. Он снимал

на очень светосильном спектрографе, который был построен для съемки спектров внегалактических туманностей в обсерватории Моунт Вильсон.

## 7. Новейшие данные о спектрах и их истолкование

Основные сведения о спектрах свечения ночного неба, изложенные в предыдущем параграфе, были получены, примерно, к 1932—1933 гг. Было выяснено, что спектры содержат огромное количество линий и полос (многие десятки) во всех частях спектра. Однако истолкование спектров свечения ночного неба встречало очень большие трудности. С несомненностью была установлена принадлежность яркой зеленой линии $\lambda = 5577{,}3$ Å (атомы кислорода, см. выше); вполне определенно можно было говорить о наличии полосатого спектра молекулярного азота. Но очень многие другие линии и полосы оставались неотождествленными.

В период времени 1933—1936 гг. изучение спектров свечения ночного неба пошло особенно быстрыми шагами. Были построены чрезвычайно светосильные спектрографы ($f$: 1,2; $f$: 0,7 и $f$: 0,55 — во Франции; $f$: 1 и $f$: 0,57; стеклянные и кварцфлуоритовые — в СССР). В исследование спектров свечения ночного неба включилось большое число работников, и в результате целый ряд кардинальных вопросов был решен. К изложению этих новейших данных мы и переходим. Мы начнем с длинноволновой области спектра: 8000—5000 Å.

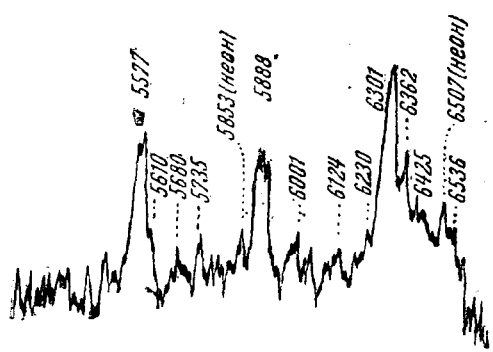


Рис. 5.

Первая отличительная черта спектров в этой области от спектров в синей части состоит в отсутствии сплошного спектра, всегда наблюдающегося в синей части. Это делает правдоподобным предположение, что сплошной спектр свечения ночного неба обусловлен солнечным светом, рассеянным высшими слоями атмосферы и, быть может, какими-то межпланетными частичками: рассеянный свет гораздо интенсивней в синей части спектра, чем в красной.

Второй особенностью является большое сходство со спектрами северных сияний в противоположность спектрам в синей части. В синей части спектра северных сияний имеются характерные полосы, отсутствующие в спектрах свечения ночного неба, что давало повод к подозрениям о неземном происхождении свечения ночного неба. Сходство спектров в длинноволновой части является очень убедительным доказательством того, что и свечение ночного неба, как и полярные сияния, возникает в верхних слоях земной атмосферы.

Общее количество линий, полос и отличительных максимумов достигает в рассматриваемой области 70, причем, кроме Зоммера, особенно много их обнаружил Кабанн [26, 27]. На рис. 5 показана микрофотометрическая кривая, снятая с одного из спектров, полученных Кабанном. На кривой отмечен ряд линий и полос в области 5500—6500 Å.

Главная часть эмиссионных групп в спектре свечения ночного неба в области 8000—5000 Å принадлежит к так называемой первой положительной системе полос азота. На рис. 6 представлена схема уровней молекулы азота $N_2$. По оси ординат отложена энергия возбуждения, выраженная в электронвольтах.

Нормальное состояние (отмечено буквой $X$) есть состояние, которое в современном учении о спектрах принято обозначать символом $^1\Sigma$. Требуется энергия в 6,1 eV, чтобы перевести молекулу $N_2$ в возбуждённое состояние $^3\Sigma$ (обозначено буквой $A$). Это состояние является метастабильным. Это означает, что молекула, попавшая в это состояние, не может сама выйти из него (вероятность перехода из метастабильного состояния в другое состояние близка к нулю). Переход осуществится только в случае внешнего воздействия, например, столкновения с другой частицей.

Следующим состоянием является состояние $^3\Pi$ с энергией 7,4 eV (обозначено буквой $B$).

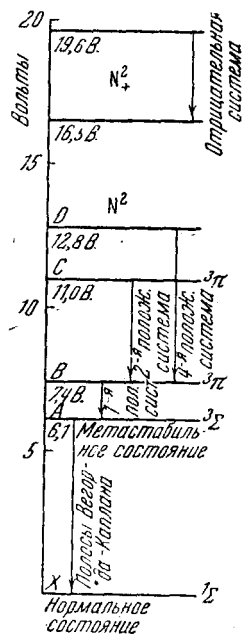


Рис. 6.

Каждое из состояний, указанных на рис. 6, соответствует возбуждению электронного уровня молекулы азота. Кроме того, имеется еще энергия колебательного и вращательного движения: это приводит к тому, что каждый из указанных электронных уровней распадается на большое число энергетических подуровней, и при соответствующих переходах из одного электронного состояния в другие в спектрах получаются не линии (как в случае атомов), а целые системы полос.

При переходе молекулы азота $N_2$ из состояния $B$ в состояние

$A$ ($^3\Pi \rightarrow {}^3\Sigma$) возникает система полос, которую называют первой положительной системой полос. Именно эти полосы наблюдаются в спектре свечения ночного неба, а также в спектрах северных сияний. Большая часть переходов происходит из состояния $^3\Pi$ с колебательными квантовыми числами, лежащими в области значений около 15 и около 7.

Особенно интересным является вопрос о наличии в спектрах излучения ночного неба ряда так называемых теллурических полос, присутствующих в виде полос поглощения в спектре рассеянного света неба днем. Соответствующие данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

| Наименование полосы | Пары воды | Свечение ночного неба | Полярные сияния |
|---|---|---|---|
| | Å | Å | Å |
| $a$ | 7330—7160 | 7278—7200 | 7243 |
| | 7020—6920 | 6966—6877 | |
| $C$ | 6600—6430 | 6607—6468 | 6608—6440 |
| $D$ | 6000—5850 | 5990—5861 | 5975—5867 |

По данным Зоммера в спектре свечения ночного неба присутствует еще целый ряд теллурических полос ($A$, $B$, $\alpha$, $\alpha'$ и $\alpha''$), обусловленных поглощением кислорода в земной атмосфере и появляющихся в излучении ночного неба. К такому же выводу приходит и Кабанн.

Наконец, было также установлено, что в спектрах свечения неба имеются, кроме зеленой линии, еще 2 красных линии, излучаемые атомным кислородом. Что касается спектроскопической систематики для линий кислорода, то было выяснено, что эти три кислородных линии обусловлены переходами между следующими уровнями [28]:

$$\lambda = 5577\ \text{Å} \ldots\ldots\ 2p^1S_0 \rightarrow 2p^1D_2$$

$$\lambda = 6300\ \text{Å} \ldots\ldots\ 2p^1D_2 \rightarrow 2p^3P_2$$

$$\lambda = 6363\ \text{Å} \ldots\ldots\ 2p^1D_2 \rightarrow 2p^3P_1$$

Схема энергетических уровней в атоме кислорода приведена на рис. 7.

Переходим к коротковолновой области 5000—3800 Å. Исследования последних лет, особенно работы Дюфея и Кабанна [29, 30, 31], показали наличие в этой области свыше 100 линий и полос. За исключением немногих из них, принадлежность которых до сих пор остается неясной, большую область линий и полос можно разделить на следующие группы.

Во-первых, несколько полос первой отрицательной системы азота (рис. 6) — длины волн максимумов: 4708, 4278, 4236, 4199 и

3914 Å — и второй положительной системы азота: 4574, 4059 и 3998 Å. Все эти полосы очень слабы, даже полоса 3914 Å, интенсивность которой в спектрах сияний чрезвычайно велика и может сравниться даже с интенсивностью зеленой линии [28].

Во-вторых, несколько слабых линий из спектра аргона. В спектрах свечения ночного неба присутствуют линии: 4700, 4632, 4592, 4345, 4337, 4301, 4259, 4193, 4181 и 4160 Å.

В-третьих, целый ряд линий, природа которых неизвестна до сих пор и которые являются типичными для спектров кометных ядер. Среди них особенно интенсивны линии: 4719, 4328, 4299, 4052, 4021, 4014 и 4002 Å. По измерениям Бальде [32] в спектрах кометных ядер присутствуют линии с длинами волн: 4724, 4329, 4301, 4052, 4021, 4014 и 4002 Å.

Все три указанные группы линий и полос далеко не исчерпывают спектра свечения ночного неба в области 5000—3800 Å. Сюда не вошло большинство как раз самых ярких и типичных линий и полос, в том числе 2 знаменитые синие полосы, открытые Релеем еще в 1922 г. Эти две полосы с максимумами у 4220 и 4433 Å в спектрах свечения ночного неба отличаются очень большой интенсивностью, но их вовсе нет в спектрах северных сияний (эти две полосы принято специально обозначать символами $X_1$ и $X_2$).

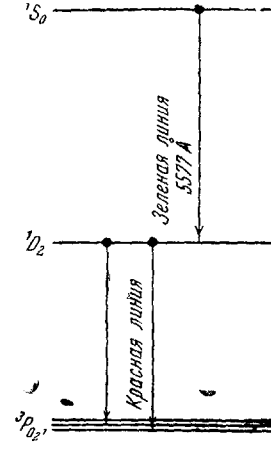

Рис. 7.

Вопрос о происхождении этих полос, остававшийся долгое время открытым, совсем недавно подвергся очень живому обсуждению. В 1934 г. Каплан [33] сообщил, что ему удалось возбудить в свечении азота новую систему полос, к которой и принадлежат две полосы $X_1$ и $X_2$. Несмотря на некоторые количественные расхождения, эти новые полосы, открытые Капланом, можно считать совпадающими с полосами, которые удалось наблюдать Вегарду при бомбардировке катодными лучами твердой смеси (при очень низких температурах) двуокиси азота и аргона [28]. Полосы Вегарда—Каплана были классифицированы Герцбергом: их частоты в обратных сантиметрах даются формулой:

$$\nu = 49\,774{,}4 + (1446{,}46\,\nu' - 13{,}93\,\nu'^2) - \\ - (2345{,}16\,\nu'' - 14{,}445\,\nu''^2).$$

Первая скобка показывает, что исходное состояние является (рис. 6) метастабильным состоянием $A$ ($^3\Sigma$). С другой стороны, если мы положим во второй скобке $\nu = 1$, мы получим число

2331 $см^{-1}$, которое является рамановской частотой (энергия колебательного движения) молекулы азота. Следовательно, конечное состояние есть нормальное состояние $X$ ($^1\Sigma$) молекулы азота. Частота, соответствующая $\nu' = \nu'' = 0$, показывает, что энергия метастабильного уровня $A$ равна 6,1 V вместо 8,2 V, принимавшихся до сих пор. Благодаря этой ошибке, существовавшей в определении энергии уровня $A$ до сих пор, длины волн полос Вегарда — Каплана, вычисленные прежде, были неверны, и их обнаружить не удавалось. Впрочем, для возникновения системы полос Вегарда — Каплана нужны специфические условия, так как исходное состояние является метастабильным.

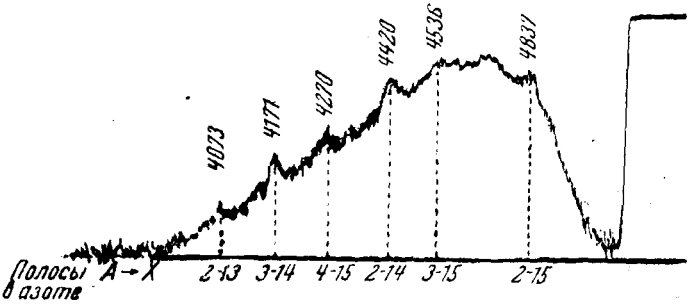


Рис. 8.

Кабанн и Дюфей попытались проверить предположение Каплана; они произвели специальные промеры спектрограмм свечения ночного неба и сравнили их с вычислениями по формуле, приведенной выше. Обнаружилось полное соответствие. Большое число полос в спектрах свечения ночного неба оказались очень близкими по длине волны к полосам Вегарда — Каплана [31]. Правда, чтобы получить большое соответствие, нужно отнять 21 $см^{-1}$ от постоянного терма в формуле Герцберга. В этом случае все главные полосы в спектре свечения ночного неба находили себе в интервале от 3400 до 5400 Å несомненное толкование с этой точки зрения. Выяснилось, что в спектре свечения ночного неба присутствуют все полосы Вегарда — Каплана, для которых квантовое число $\nu$ исходного состояния близко к 2, причем $\nu'' = \nu' = 10, 11, 12, 13$.

На рис. 8 приведена микрофотограмма с одного из спектров Дюфея и Кабанна. Для основных полос указаны длины волн, а под ними приведены значения квантовых чисел $\nu'$ и $\nu''$ при переходе, обусловливающем данную полосу.

## 8. Общая характеристика спектров свечения неба. Сравнение со спектрами северных сияний

Резюмируя результаты 15-летних исследований спектров свечения ночного неба, можно сказать следующее.

Кроме сплошного спектра (в синей и ультрафиолетовой части спектра) с фраунгоферовыми линиями поглощения, в излучении обнаружено свыше 200 линий и полос. Путем длительных лабораторных опытов и вычислений установлено, что эти линии и полосы излучаются следующими газами:

а) Атомарный кислород: знаменитая яркая зеленая линия $\lambda = 5577{,}3$ Å $(2p^1S_0 \rightarrow 2p^1D_2)$ и две красные линии $\lambda = 6300$ Å $(2p^1D_2 \rightarrow 2p^3P_2)$, $\lambda = 6363$ Å $(2p^1D_2 \rightarrow 2p^3P_1)$.

б) Несколько серий молекулярного спектра азота. В порядке убывающей интенсивности эти серии можно расположить так: полосы Вегарда — Каплана $A \rightarrow X$ (рис. 7); полосы первой и второй положительной системы; отрицательная система.

в) Теллурические полосы кислорода и паров воды (полосы, соответствующие колебательному движению молекулы воды).

г) Большое число линий совпадает с линиями спектров кометных ядер. Природа их неизвестна.

д) Несколько линий спектра аргона.

Существует предположение, впрочем весьма сомнительное, о наличии линий атомов азота и гелия.

В какой степени спектры свечения ночного неба соответствуют спектрам северных сияний? Эти спектры во многом похожи друг на друга, что вполне естественно, так как среда, дающая начало спектрам, одна и та же в обоих случаях: этой средой являются высшие слои атмосферы. Но во многом эти спектры отличаются друг от друга. Так, например, отрицательная система полос азота является очень яркой в спектрах северных сияний, но в спектрах свечения ночного неба эти полосы крайне слабы. Как раз обратное мы имеем для второй положительной системы азота: она очень ярка в спектрах свечения ночного неба и слаба в северных сияниях.

Это различие указывает на разницу в условиях, при которых возникают оба эти свечения. Эту разницу можно охарактеризовать как разницу в степени возбуждения. Из схемы энергетических уровней молекулы азота (рис. 6) видно, что для возбуждения той или иной серии полос нужны следующие энергии:

| | |
|---|---|
| Полосы Вегарда — Каплана | 6,1 eV |
| Первая положительная система азота | 7,4 eV |
| Вторая положительная система азота | 11,0 eV |
| Отрицательная система полос азота | 19,6 eV |

Замечательно то, что этот ряд, расположенный в порядке возрастания энергии возбуждения молекулы азота, в то же время дает последовательность в отношении интенсивности этих полос в спектрах свечения ночного неба: интенсивность полос, указанных в первой строке, — наибольшая, а указанных в последней строке, — наименьшая. Чем больше энергия уровня, являющегося исходным для данной системы полос, тем меньше интенсивность этих полос в спектрах свечения ночного неба.

Еще более замечательно, что этот же ряд справедлив и для спектров северных сияний, но только прямо в обратном смысле: в спектрах северных сияний полосы Вегарда — Каплана являются очень слабыми, а яркость отрицательной системы полос азота особенно велика. В спектрах северных сияний: чем больше энергия уровня, являющегося исходным для данных полос, тем больше их яркость.

## 9. Попытки воспроизведения в лабораторных условиях спектров свечения ночного неба

Попытка Вегарда (1923 г.) отождествить зеленую линию $\lambda = 5577$ Å, ярко выступающую в спектрах северных сияний и свечения ночного неба, со свечением твердого замерзшего азота, подвергаемого бомбардировке катодными лучами, заслуживает упоминания только ради ее исторического интереса. Как мы уже знаем (§ 4), гипотеза Вегарда оказалась неправильной: Мак-Леннан и Шрум вскоре после опубликования работы Вегарда обнаружили, что желто-зеленое излучение азота при низких температурах, принимавшееся Вегардом за зеленую линию $\lambda = 5577$ Å, в действительности состоит из трех компонент с совсем другими длинами волн: 5556, 5619 и 5654 Å. Так, оказалась опровергнутой знаменитая гипотеза, согласно которой Земля окружена замерзшим азотом. Как мы знаем, Мак-Леннан и его сотрудники установили, что зеленая линия 5577 Å принадлежит к спектру атомарного кислорода и появляется только в присутствии большого количества инертных газов.

Начиная с 1928 г., Каплан предпринял ряд опытов с электрическим разрядом в атмосфере азота в смеси с кислородом (состав земной атмосферы). Оказалось, что свечение газа в разрядной трубке продолжается и после выключения электрического тока, т. е. имеет место послесвечение. Спектр этого послесвечения отличался от спектра свечения газа при прохождении разряда. Для выделения послесвечения Каплан пользовался фосфороскопической установкой, в которой электрический ток прерывался через определенные промежутки времени, и в тот момент, когда шел ток, свечение было закрыто: оно открывалось только на промежутки времени, когда не шел электрический ток через разрядную трубку. Этим методом оказалось возможным возбуждать к свечению зеленую линию $\lambda = 5577{,}3$ Å, причем для этого нужно было производить разряд в азоте с небольшой примесью (несколько процентов) кислорода [34]. В 1932 г. Каплан смог „активировать“ азот, — он получил свечение азота в неконденсированном разряде, после того как разрядная трубка предварительно подверглась действию электрического разряда, продолжавшегося в течение нескольких дней [35]. В этих условиях он обнаружил в спектре послесвечения

при относительно высоком давлении газа (несколько миллиметров ртутного столба) полосы ионизованных молекул азота (отрицательная система полос), не сопровождавшиеся появлением линий ионизованных атомов азота, которые, наоборот, всегда присутствуют, когда полосы ионизованных молекул азота возбуждаются при низком давлении. Каплан пришел к заключению о наличии в смеси, дающей послесвечение, метастабильных молекул $A$ ($^3\Sigma$), которые путем электронных ударов прямо возбуждаются к интенсивному свечению полос отрицательной системы. В связи с этим Каплан высказал предположение, что свечение полярных сияний можно трактовать как результат электрического разряда в смеси азота и кислорода, содержащей большое количество метастабильных молекул. Спектр северных сияний с этой точки зрения может представлять собою результат наложения послесвечения и свечения разряда. Каплан изучил условия разряда, при которых появляется слабое свечение, по виду напоминающее северное сияние и содержащее в своем спектре полосы отрицательной, а также первой и второй положительных систем азота. Характер спектров, полученных при этом Капланом, не очень отличался от спектра северных сияний [36].

Продолжая работать этим методом, Каплан получил в 1934 г. в послесвечении азота (наиболее подходящее давление 0,1 *мм*) новую систему полос, которая оказалась тождественной с системой полос, обнаруженной Вегардом в спектре свечения твердого азота. Новая система полос была, как это уже указывалось раньше, классифицирована Герцбергом. Уровень, являющийся исходным для этой системы полос, безусловно, соответствует метастабильному состоянию, которое мы (рис. 6) обозначили символом $A$ ($^3\Sigma$). Следовательно, появление этой системы полос является безусловным доказательством существования в активированном азоте метастабильных молекул $A$. Вскоре после этого Каплан высказал предположение, что ряд полос в спектре свечения ночного неба лучше всего может быть истолкован как совокупность полос, принадлежащих к первой и второй положительным системам азота и также к незадолго до этого открытой новой системе полос $A \rightarrow X$. Наличие активированного азота делает возможным возбуждение спектра этого типа, который получается в соответствующих условиях в послесвечении.

Таким образом мы можем рассматривать эту часть излучения ночного неба, как обусловленную очень слабым послесвечением в разреженном азоте в высших слоях атмосферы.

В 1935 г. Каплан сообщил о новых экспериментах, в результате которых было выяснено, что зеленая линия и полосы молекулярного азота возбуждаются одновременно при условиях, которые воспроизводят (во всяком случае в принципиальном отношении) условия свечения ночного неба. Вместо того, чтобы пытаться отделить свечение разряда от послесвечения, Каплан просто фотографировал спектр свечения разрядной трубки, электрический ток в которой периодически и настолько часто прерывался, что сила тока не могла достигнуть своего максимального значения. При

этих условиях в спектре излучения появляются вместе зеленая линия, новая система полос $A \rightarrow X$ (полосы Вегарда — Каплана) и вторая положительная система азота.

Вся совокупность наблюдения ясно показывала, что излучение, получающееся при этих условиях, напоминает по своим свойствам свечение ночного неба [37,38].

В 1934 г. Дежарден и Швеглер исследовали [39] свечение, возбуждаемое при вращении капель ртути по внутренней стенке стеклянного сосуда, содержащего неочищенные инертные газы (триболюминесценция, т. е. свечение от трения). Если в трубке находился неон со следами азота (а возможно также и гелия), то получающийся спектр очень похож на спектр полярных сияний как в отношении спектрального состава, так и в смысле отношения интенсивностей для отдельных компонент спектра. Спектр при этом включал главные полосы отрицательной и второй положительной систем азота, а также несколько слабых линий неизвестного происхождения, которые, быть может, можно было бы приписать ионизованным атомам азота или атомам гелия. Однако по сравнению со свечением ночного неба сходство спектров гораздо меньше. Если при тех же условиях возбуждать свечение аргона, то получающиеся при этом спектры, кроме линий атомов аргона, содержат большое число линий, принадлежащих ионам аргона; это обстоятельство дает представление о степени возбуждения, достижимой этим методом. Такие же самые спектры получаются и без ртути если производить непрерывное трение (с помощью шерстяной тряпки или картона) по наружной стенке стеклянного сосуда, вращаемого с помощью электрического мотора. Более тщательное изучение спектров свечения неочищенного неона показало наличие ряда полос, которые, быть может, являются полосами Вегарда — Каплана (измеренные длины волн: 4540, 4218, 3981, 3845, 3772 Å, вычисленные: 4535, 4219, 3979, 3844, 3768 Å). За исключением последней из этих полос, все они, повидимому, присутствуют в спектрах северных сияний (согласно данным Вегарда). На спектрограммах, соответствующих неочищенному аргону, также обнаруживаются три полосы, очень близких к полосам Вегарда — Каплана (измеренные длины волн: 4317, 4220, 3981 Å).

С другой стороны, в физической лаборатории Лионского университета Бернард исследовал свечение, получающееся при бомбардировке электронами газовой смеси, заключенной в трехэлектродный сосуд [40]: газовая смесь состояла из аргона и очень малых количеств азота или воздуха (полное давление газа в сосуде между 0,1 и 0,6 *мм*; доля азота менялась от $10^{-1}$ до $10^{-5}$ от полного давления). Свечение, получающееся при этих условиях, при величине ускоряющего потенциала между 15 и 20 V оказывается весьма похожим по своему спектральному составу на свечение ночного неба (за исключением возбуждения ярких линий аргона) Кроме полос первой и второй положительных систем азота, в спектрах получается большое число полос Вегарда — Каплана, часть кото-

рых принадлежит к последовательностям, которым соответствуют следующие разности квантовых чисел: $\nu' - \nu'' = 10$, 11, 12 и 13. В табл. 3 приведены результаты измерений длин волн, полученных на этих спектрограммах. В этой же таблице для сравнения приведены данные, вычисленные по формуле Герцберга.

Таблица 3

| Измерен. | Вычисл. | Измерен. | Вычисл. | Измерен. | Вычисл. |
|---|---|---|---|---|---|
| 5326 | 5327 | 4495 | 4495 | 3885 | 3956 |
| 5060 | 5061 | 4320 | 4320 | 3769 | 3768 |
| 4960 | 4962 | 4219 | 4219 | 3750 | 3753 |
| 4837 | 4838 | 4171 | 4171 | 3683 | 3684 |
| 4718 | 4718 | 4144 | 4147 | 3664 | 3666 |
| 4650 | 4651 | 4072 | 4073 | 3603 | 3603 |
| 4616 | 4614 | 3979 | 3979 | 3582 | 3582 |
| 4605 | 4605 | 3940 | 3940 | 3503 | 3502 |
| 4535 | 4535 | 3884 | 3889 | | |

Наличие в свечении полос первой положительной системы указывает на присутствие молекул, находящихся в метастабильном состоянии $A$ ($^3\Sigma$). По мере уменьшения парциального давления азота относительная интенсивность полос Вегарда — Каплана возрастает, а интенсивность второй положительной системы полос, наоборот, убывает. Уменьшение давления азота увеличивает, следовательно, вероятность переходов $A \to X$, соответствующих излучению полос Вегарда — Каплана.

## 10. Измерение яркости неба

В полюсе мира (Полярная звезда) плотность звезд наименьшая, поэтому именно там обычно изучается свечение ночного неба. При этом весьма удобно брать Полярную звезду в качестве эталона яркости. К сожалению, яркость Полярной звезды несколько варьирует с течением времени. Амплитуда этих вариаций, однако, невелика: Дюфей нашел[22], что яркость меняется визуально на 0,11 звездной величины, а фотографически на 0,20 звездной величины. Период колебаний яркости несколько больше четырех дней. Эти вариации яркости можно учесть соответствующими поправками.

При сравнении яркости двух звезд результат сравнения зависит от способа сравнения. Обычно для сравнения служат или глаз (визуальные измерения) или же фотографическая пластинка. Обычная ортохроматическая фотопластинка особо чувствительна к синим лучам и мало чувствительна в зеленой части спектра. Человеческий глаз весьма чувствителен в зеленой части спектра, но очень мало чувствителен к синим лучам. Поэтому если две звезды имеют раз-

ный спектральный состав, то определение их яркости друг относительно друга дает разные результаты в зависимости от метода определения. Если данная звезда богаче синими лучами, то ее фотографическая величина будет меньше, чем ее визуальная величина (фотографически ее яркость будет измерена большей). Таким образом сравнение фотографической и визуальной яркости может дать указание о спектральном составе излучения.

Полярная звезда согласно определениям Гарвардской обсерватории имеет яркость, визуально равную 2,12 звездных величин, а фотографически — 2,62 звездных величин.

За период времени с 1923 по 1926 г. Дюфей произвел большое количество определений яркости неба визуальным и фотографическим методами. Эти измерения, сделанные в течение 120 ночей, производились по большей части в Монпелье, а также в Верхнем Провенсе и в Лионской обсерватории. Согласно измерениям Дюфея в среднем 1 квадратный градус неба близ Полярной звезды дает количество света, эквивалентное свету от звезды, величина которой равна: визуально $\mu = 4{,}60$ звездной величины (35 ясных ночей), фотографически $\mu = 4{,}36$ звездной величины (55 ясных ночей).

Если измерения отнести к звезде, величина которой равна 1,00, то 1 квадратный градус неба эквивалентен: 0,036 звезды, визуальная яркость которой равна 1,00 вел. и 0,045 звезд, фотографическая яркость которой равна 1,00 вел.

Измерения, сделанные другими исследователями, собраны в табл. 4 (визуальные измерения) и 5 (фотографические измерения).

Таблица 4

Визуальные измерения

| Автор | Годы | Место наблюдения | $\mu$ | $N_1$ * |
|---|---|---|---|---|
| Ньюкомб | 1901 | Исландия . . . . . | 4,84 | 0,029[1] |
| Бернс . . | 1902 | Англия . . . . . | 4,28 | 0,050[2] |
| Интэма . | 1907/8 | Голландия . . . . . | 3,13 | 0,140[4] |
| Аббот . . | 1909/10 | Калифорния (Моунт-Витней) . . . . . | 3,81 | 0,075[57] |
| Ван-Рийн | 1913 | Моунт-Вильсон . . . | 3,21 | 0,130[58] |
| Бернс . . | 1914 | Англия . . . . . | 4,81 | 0,030[59—60] |

Можно еще указать на измерения Эльвея, сделанные около 1932 г. с помощью фотоэлементов [22a]. Он нашел $\mu = 4{,}5$. При фотоэлектрическом измерении используемая спектральная область (спектральная чувствительность фотоэлемента) являлась промежуточной между фотографическими и визуальными измерениями.

* $N_1$ — число звезд первой величины, эквивалентное 1 квадратному градусу неба.

Таблица 5

Фотографические измерения

| Автор | Годы | Место наблюдения | $\mu$ | $N_1$ |
|---|---|---|---|---|
| Таунлей . . . . | 1902 | Ликкская обсерватория . . . . | 4,06 | 0,06[3] |
| Интэма . . . . | 1908 | Голландия . . . | 3,35 | 0,115[4] |
| Фабри . . . . . | 1909 | Франция . . . . | 5,09 | 0,023[5] |
| Бурже . . . . . | 1917 | „ . . . . | 4,48 | 0,041[61] |
| Бауер, Данжон и Жан Ланжевен . . . . . | 1923 | Монблан . . . . | 4,27 | 0,049[62] |
| Дюфей . . . . | 1923—1926 | Монпелье . . . . | 4,36 | 0,045[27] |

Исходя из цифр Дюфея, как из наиболее надежных, можно сделать следующие подсчеты[41]. Если предположить, что небо имеет равномерную яркость в обоих полушариях и если пренебречь влиянием Млечного Пути, то можно подсчитать, что небо в целом имеет визуальную яркость 6,9 величины. Свет от всего неба в целом эквивалентен 1460 звездам первой величины; он в 200 раз слабее, чем свет полной Луны.

Если перевести эти данные на язык обычных фотометрических единиц, то можно сказать, что небо имеет яркость, примерно равную $10^{-8}$ свечи на 1 *см*$^2$. На горизонтальной плоскости такое равномерно-светящееся небо должно дать освещенность, равную $3 \cdot 10^{-4}$ люкс. Следовательно, освещенность от ночного неба такая же, как от лампы в 25 свечей на расстоянии 335 *м*. Если выставить на свет ночного неба фотографическую пластинку, то заметное почернение получится при экспозиции в 1—2 мин.

Используя данные звездной статистики, можно подсчитать, что освещенность, даваемая одними звездами, равнялась бы $6 \cdot 10^{-5}$ люкс. Это в 5 раз меньше истинной освещенности. Таким образом только 20% всего света ночного неба принадлежит звездам.

## 11. Наблюдения свечения неба методом гашения

В 1928 г. Мак-Леннан вместе со своими сотрудниками обнаружил следующий очень важный факт[42]: интенсивность зеленой линии в первой половине ночи не убывает, как это следовало бы ожидать, а возрастает, достигая максимума около полуночи. Во второй половине ночи интенсивность зеленой линии убывает.

К сожалению, наблюдения Мак-Леннана с сотрудниками носили весьма качественный и ориентировочный характер. Применявшийся ими фотографический метод требовал больших экспозиций, и ни более точный ход интенсивности в течение ночи ни степень возрастания интенсивности к середине ночи установлены ими не были.

Чтобы исследовать вопрос до конца, необходимо было применение каких-то особенно чувствительных методов фотометрирования.

Такой весьма чувствительный метод фотометрирования удалось применить к изучению свечения ночного неба в 1934 г. Речь идет о разработанном С. И. Вавиловым фотометрическом „методе гашения", являющемся наиболее чувствительным методом из числа всех существующих.

После некоторого (30—50 мин.) пребывания в темноте чувствительность глаза, как известно, сильно повышается: происходит так называемая адаптация глаза на темноту. Если произвести соответствующий подсчет, то оказывается, что глаз, адаптированный на темноту, способен получать зрительное впечатление от ничтожно малых количеств света, на которое никакой физический прибор реагировать не будет. Так, согласно измерениям Вавилова и его сотрудников в соответствующих условиях глаз может чувствовать световой поток столь малой интенсивности, что за каждую секунду в глаз попадает всего лишь 10—20 световых квантов. Для фотографирования столь слабого пучка понадобилась бы огромная экспозиция. Спрашивается, нельзя ли использовать глаз в качестве прибора для измерения яркости предельнослабых пучков света?

Разработанный С. И. Вавиловым[43] метод гашения позволяет это делать. Метод использует наличие у глаза определенного порога зрительного раздражения — некоторого минимума яркости, меньше которого глаз вовсе „не видит". С помощью того или иного приспособления будем ослаблять исследуемый пучок света до тех пор, пока он не перестанет быть виден глазу, т. е. ослаблять ровно до порога зрения. Предположим, что для этого исследуемый пучок пришлось ослабить в $n$ раз. Если при этом некоторый другой пучок, интенсивность которого известна и равна $I$, пришлось для доведения его до порога зрения ослабить в $N$ раз, то искомая интенсивность $x$ исследуемого пучка будет найдена из простого соотношения.

$$x = \frac{n}{N} I.$$

В настоящее время этот чрезвычайно простой и удобный в обращении метод получил широкое распространение.

В 1934 г. большая группа научных работников отправилась на высочайшую гору Кавказа — Эльбрус — с целью проведения там ряда наблюдений. Попытка оказалась весьма успешной, и в настоящее время на Эльбрусе развернулась систематическая научная работа.

Вследствие большой запыленности нижних слоев атмосферы очень существенно производить наблюдения свечения ночного неба с высоты нескольких тысяч метров. В связи с этим, начиная с 1934 г. на Эльбрусе каждым летом производятся наблюдения свечения ночного неба вышеуказанным методом гашения. В первую очередь была сделана попытка изучить более точно вариации интенсивности зеленой линии в течение ночи.

Работа производилась независимо двумя группами наблюдателей (Физическим институтом Академии наук СССР [44] и Государственным оптическим институтом [45]).

Результаты, полученные при наблюдении зеленой линии сквозь монохроматор, представлены на рис. 9. Виден отчетливо выраженный максимум в 1 час ночи.

Эти измерения доказывают наличие упоминавшегося выше явления — весьма резкого возрастания яркости зеленой линии после наступления ночи. Этот факт представляет огромные трудности для своего теоретического истолкования. Если бы максимум яркости приходился на полночь, его объяснение могло бы быть сделано более естественно, так как в полночь Солнце про-

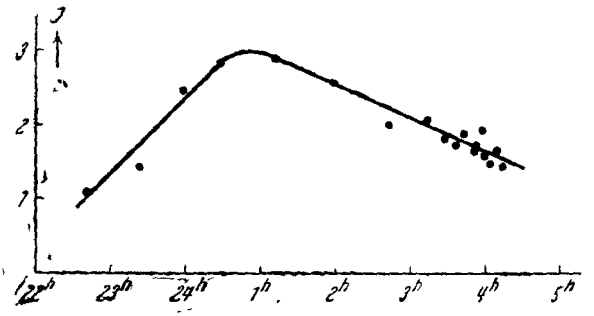


Рис. 9.

ходит через свое наинизшее положение под горизонтом, и этот максимум яркости указывал бы на прямую связь интенсивности зеленой линии с положением Солнца. Однако максимум имеет место не в полночь, а на час позже. После полуночи яркость зеленой линии продолжает столь же быстро возрастать и к часу ночи на несколько десятков процентов превосходит яркость в полночь. Это „запаздывание" указывает на наличие каких-то особых, нам пока неизвестных процессов.

К этому вопросу нам придется вернуться позже. Является ли резко выраженный максимум яркости в 1 час ночи характерным только для зеленой линии, или же он свойственен и другим компонентам свечения ночного неба? Решение этого вопроса является весьма существенным для понимания природы свечения ночного неба. Еще в 1934 г. автором было установлено [45], что область спектра, доступная при применении метода гашения наблюдению сквозь монохроматор, простирается от 4500 до 6000 Å, охватывая почти весь видимый спектр, за исключением крайней красной области, где уже весьма мала чувствительность глаза.

В связи с этим в экспедиции на Эльбрус летом 1935 г. Оптическим институтом были поставлены соответствующие наблюдения [46]. На „Кругозоре" Эльбруса, на высоте 3000 *м* над уровнем

моря была смонтирована большая оптическая установка, схематическое устройство которой показано на рис. 10.

Монохроматор *M* установлен на большом каменном фундаменте. Перед его входной щелью укреплена откидная призма полного внутреннего отражения *P*. Когда призма приставлена вплотную к щели (это положение призмы указано пунктиром), то в монохроматор попадает свет от эталонной лампы *E*. Эталонная лампа представляет собой специальную лампочку накаливания на 2,5 V

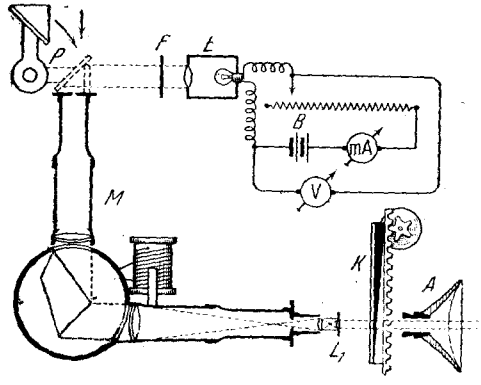


Рис. 10.

и 0,5 A, для которой для разных токов накала была известна цветовая температура, т. е. та температура, которую должно иметь абсолютно черное тело, чтобы его распределение энергии по спектру было бы таким же, как и у данной лампы. Эталонная лампа питалась током от аккумуляторной батареи *B*, и ее электрический режим регулировался с помощью миллиамперметра mA и вольтметра V. Свет от лампочки ослаблялся в нужное число раз нейтрально-серым фильтром *F*.

Если призма полного внутреннего отражения *P* была откинута, то в монохроматор попадал свет непосредственно от фотометрируемого участка неба. За выходной щелью монохроматора устанавливается объектив $Z_1$. Глаз располагался так, чтобы объектив $Z_1$ был виден весь, залитый светом, выходящим из монохроматора. Нейтрально-серый клин *K* служил для ослабления света до порога чувствительности глаза.

Ширина щелей монохроматора была такой, что наблюдаемый одновременно спектральный участок составлял 150 Å в синей части спектра и 300 Å в желтой части.

На этой установке удалось измерить распределение энергии в спектре свечения ночного неба в области длин волн 4550—5900 Å. Измерения можно было производить настолько быстро, что за одну ночь удавалось снимать 5—7 полных кривых. Оказалось, что

спектральный состав свечения ночного неба резко изменяется в течение ночи. Детальное изучение этих изменений дало много существенных результатов.

На рис. 11 приведены кривые, показывающие распределение энергии по спектру свечения ночного неба в разные часы ночи. По оси абсцисс отложены длины волн в Å, а по оси ординат — величина энергии, заключенной в интервале 1 Å в каждом данном

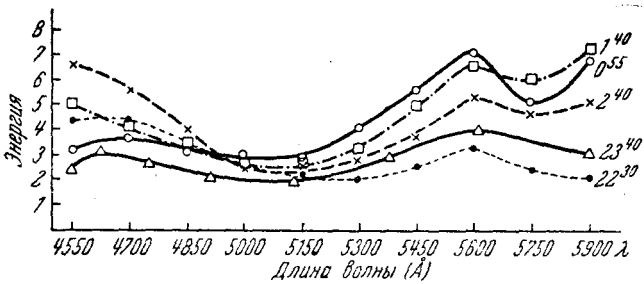


Рис. 11.

месте спектра. На рисунке приведено пять кривых: для $22^h30'$; $23^h40'$; $0^h55'$; $1^h40'$ и $2^h40'$.

Благодаря широким щелям монохроматора полученная картина распределения энергии по спектру является соответственно сглаженной (усредненной). Например, при установке монохроматора на $\lambda = 5600$ Å при нашей ширине щели пропускается интервал длин волн, примерно, в 300 Å, и мы считаем измеренную при этом энергию как бы распределенной по всему этому интервалу, хотя на самом деле в этом интервале почти вся энергия обусловлена монохроматическим излучением — яркой зеленой линии $\lambda = 5577{,}3$ Å. Наши кривые вовсе не дают деталей спектра, но показывают усредненное содержание энергии по участку спектра, пропускаемому щелью.

Из этих кривых видно, насколько меняется спектральный состав в течение ночи. Если для примера сравнить кривую для $21^h30'$ (точечный пунктир) и для $0^h55'$ (сплошная линия), то в зеленой части спектра первая из этих двух кривых имеет вдвое меньшие ординаты, но в синей части эта кривая не только делается равной второй кривой, но и поднимается выше ее.

Обратимся, однако, к более точному количественному анализу этих кривых.

На основании кривых рис. 11 можно подсчитать, как изменяется интенсивность свечения ночного неба в течение ночи. Эти подсчеты дают для $\lambda = 5600$ Å следующие интенсивности в разные

часы ночи (в условных единицах):

| | |
|---|---|
| $22^h30'$—3,3; | $1^h40'$—6,5; |
| $23^h40'$—4,0; | $2^h40'$—5,2; |
| $0^h55'$—7,1; | |

Таким образом в зеленой части спектра имеет место уже известный нам ночной ход интенсивности: крутое нарастание в первой половине ночи, максимум, примерно, в 1 час ночи и затем более медленный спад. Но изменение за время ночи формы спектральных кривых показывает, что в других частях спектра ночной ход иной. И действительно, если взять соответствующие данные для синей части спектра 4550 Å, то получается следующая картина:

| | |
|---|---|
| $22^h30'$—4,3; | $1^h40'$—5,0; |
| $23^h40'$—2,4; | $2^h40'$—6,6. |
| $0^h55'$—3,2; | |

Здесь вовсе нет нарастания интенсивности в первой половине ночи, наоборот, сначала интенсивность убывает, а потом увеличивается. Получается такое впечатление, что ночной ход интенсивности в синей части спектра имеет минимум в полночь.

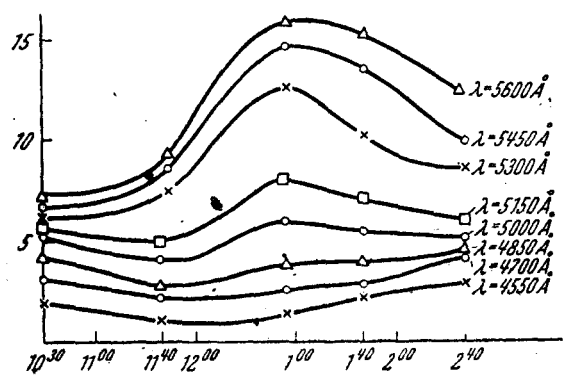


Рис. 12.

Чтобы проверить это заключение, можно построить аналогичным образом (по кривым рис. 11) ночной ход яркости для всех длин волн. Получающиеся при этом результаты представлены на рис. 12. Кривые для $\lambda = 5600$, 5450 и 5300 Å все имеют хорошо выраженный максимум около 1 часа ночи. Но для $\lambda = 5150$ и 5000 Å максимум в 1 час ночи хотя и имеет еще место, но он уже очень слабо выражен, а, кроме того, на кривых появляется провал около

24 час. Наконец, для $\lambda = 4850$, 4700 и 4550 Å максимума в 1 час ночи нет вовсе, но провал около полуночи выявляется с несомненностью.

Анализ этих кривых показывает, что имеет место наложение друг на друга двух свечений: одного, имеющего минимум интенсивности около полуночи и преобладающего в синей части спектра, и другого, имеющего максимум в 1 час ночи и преобладающего в зеленой части спектра. Кривые на рис. 12 дают постепенный переход от резкого максимума в 1 час ночи к минимуму в полночь.

Что касается свечения второго типа, преобладающего в зеленой части спектра и имеющего максимум в 1 час ночи, то мы знаем природу этого свечения: это собственное свечение, для которого (во всяком случае для яркой зеленой линии) установлен аналогичный ночной ход яркости. Но какова природа свечения первого типа, имеющего минимум яркости около полуночи и преобладающего в сине-голубой части спектра?

Повидимому, и для этого свечения можно дать правдоподобное толкование. Это должен быть рассеянный свет Солнца. Действительно, рассеяние света газами подчиняется, как мы знаем, закону Релея, согласно которому свет рассеивается тем интенсивней, чем меньше его длина волны (обратно пропорционально четвертой степени длины волны). Благодаря этому в рассеянном свете преобладают сине-голубые лучи (голубой цвет неба). Кроме того, Солнце до полуночи опускается под горизонт все ниже и ниже, но после полуночи оно, наоборот, поднимается, приближаясь к горизонту, поэтому в первой половине ночи интенсивность должна убывать, а во второй половине ночи — возрастать. В полночь рассеянного света либо не должно быть вовсе (Солнце находится настолько низко под горизонтом, что солнечные лучи не освещают даже самых верхних слоев атмосферы), либо во всяком случае его интенсивность должна иметь минимум.

Такое истолкование двух составных частей света ночного неба кажется нам вполне правдоподобным. Возникает вопрос, нельзя ли воспользоваться этими кривыми для решения вопроса о том, какую долю всего света составляет рассеянный свет, а какую долю — собственное свечение ночного неба. Попытка произвести такое разделение была нами сделана [47].

При попытке разделить кривые рис. 11 на составляющие для рассеянного света и собственного свечения неба нужно помнить о наличии еще третьего вида излучения в ночном небе — о свете слабых звезд. Свет звезд, как мы это знаем, составляет, примерно, 20% всего света, т. е. вполне заметную величину, которую нужно учитывать. Таким образом поставленная нами задача требует разделения всей энергии свечения ночного неба на три части — свет звезд, рассеянный свет и собственное свечение неба.

Задача эта содержит, следовательно, три неизвестных, для которых известна только их сумма. Другими словами, мы имеем только

одно уравнение с тремя неизвестными, и для решения задачи нужно сделать какие-либо предположения, которые сузили бы круг возможных решений.

Что касается света звезд, то относительно него мы вполне можем считать, что его интенсивность остается одной и той же в течение всей ночи. Более того, мы можем сделать вполне правдоподобное допущение, что интегральное излучение всех звезд в среднем соответствует по своему цвету излучению абсолютно черного тела с температурой 5500 К. Это непосредственно относится к звездам спектрального типа *G*, и благодаря большому распространению этого класса (большинство туманностей, Млечный Путь) можно, не делая очень большой ошибки, это отнести ко всему звездному интегральному излучению.

Что касается рассеянного света, то мы можем достаточно точно указать его спектральный состав. Этот спектральный состав рассеянного света определяется факторами, нам известными: он зависит от спектрального состава „исходного материала" для рассеяния — самих солнечных лучей, а также от закона рассеяния света газами — закона обратной пропорциональности четвертой степени длины волны (закон Релея). Поскольку и то и другое известно, можно подсчитать кривую распределения энергии в рассеянном свете неба. Именно так объясняется голубой цвет неба, причем вычисления в основном достаточно хорошо соответствуют измеренным величинам.

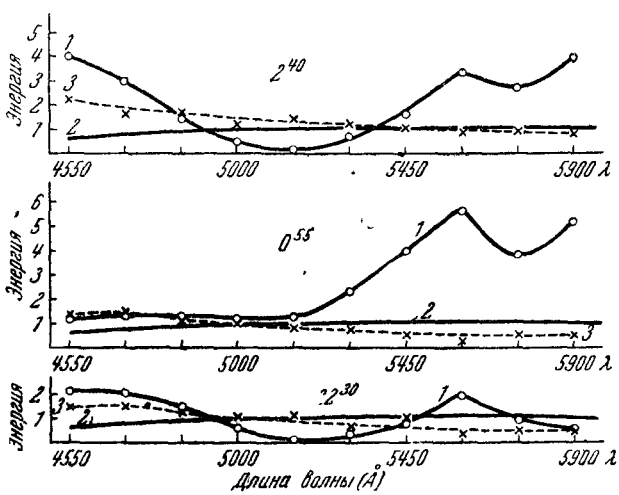


Рис. 13.

Для наших целей лучше всего воспользоваться кривой, вычисленной Кингом с учетом вторичного рассеяния [48]. Эту кривую мы считали неизменной по форме в течение всей ночи.

Наконец, существенную помощь в интересующем нас разложении кривых может оказать следующее обстоятельство. Зеленая

линия свечения ночного неба имеет характерный ход яркости в течение ночи с максимумом в 1 час ночи. Зеленая линия является преобладающей по количеству света во всей зеленой части спектра свечения ночного неба, и поэтому для тех кривых, которые будут получены при выделении собственного свечения неба из кривых рис. 11 в зеленой части, можно положить для проверки полученных кривых такой же ночной ход с максимумом в 1 час ночи. Полученные кривые можно дополнительно контролировать тем, чтобы в 1 час ночи интенсивность в зеленой части была в 2,5—3 раза больше, чем в 10 час. вечера, и в 1,5 раз больше, чем в 3 часа утра.

Результаты произведенных вычислений представлены на рис. 13. Разделение кривых сделано для трех моментов: начало ночи (вернее начало ночных измерений на Эльбрусе, которые обычно нельзя было начинать раньше 10 час. вечера, так как до этого часа почти всегда склоны Эльбруса окутаны туманом)—10 ч. 30 м. вечера; примерный момент максимума интенсивности зеленой линии—0 ч. 55 м., и конец ночи—2 ч. 40 м. утра. Каждая тройка кривых в сумме дает одну из кривых рис. 11. Из этих трех кривых одна соответствует собственному свечению ночного неба $L$, вторая—свету звезд $Ef$ и третья—рассеянному свету $D$.

Эти кривые показывают, насколько различна относительная доля каждого сорта излучения в разные моменты ночи.

Площадь каждой кривой пропорциональна энергии данного вида излучения в данный момент времени (в интервале длин волн от 4550 до 5900 Å, для которого произведены все измерения). Таким образом, если измерить площади всех кривых, то можно получить процентный состав света ночного неба в разные часы ночи.

Для того чтобы сделать получающиеся при этом величины абсолютными, мы произвели дополнительные измерения, сравнив энергию того эталонного источника света, с которым сравнивалось на Эльбрусе свечение ночного неба с абсолютно черным телом, поддерживавшимся при температуре 850° К.

Результаты вычислений представлены в табл. 6. Энергия дана в *эрг/см² сек*, и каждая цифра дает величину энергии, приходящейся на 1 *см²* за 1 сек. для излучения неба в интервале длин волн 4550—5900 Å.

Из таблицы 6 видно, что энергия всего излучения неба больше процентов на 40 во вторую половину ночи, чем в первую, но в общем меняется сравнительно мало. Что касается отдельных компонент, то их относительная доля меняется в течение ночи в очень большой степени. Это делается особенно явственным, если, приняв энергию всего излучения за 100, долю отдельных компонент выражать в процентах. Соответственные данные приведены в табл. 7. Из этой таблицы видно, что если в начале ночи все три компоненты излучения присутствуют, примерно, поровну, то в 1 час ночи состав излучения неба оказывается совсем иным: больше

Таблица 6

| Часы ночи | Энергия всего излучения (1) | В том числе рассеянный свет (1) | В том числе свет слабых звезд (1) | В том числе собственного свечения неба (1) | Примечание |
|---|---|---|---|---|---|
| $22^h30'$ | $1{,}14\cdot10^{-3}$ | $0{,}36\cdot10^{-3}$ | $0{,}38\cdot10^{-3}$ | $0{,}40\cdot10^{-3}$ | 1) Энергия излучения дана в *эрг/см²·сек* (см. объясн. в тексте). 2) Разделение кривых сделано только для моментов ночи: $10^h40'$, $0^h55'$ и $2^h40'$. |
| 23 40 | $1{,}17\cdot10^{-3}$ | (2) | (2) | (2) | |
| 0 45 | $1{,}72\cdot10^{-3}$ | $0{,}30\cdot10^{-3}$ | $0{,}38\cdot10^{-3}$ | $1{,}04\cdot10^{-3}$ | |
| 1 40 | $1{,}68\cdot10^{-3}$ | (2) | (2) | (2) | |
| 2 40 | $1{,}63\cdot10^{-3}$ | $0{,}49\cdot10^{-3}$ | $0{,}38\cdot10^{-3}$ | $0{,}76\cdot10^{-3}$ | |

Таблица 7

| Часы ночи | Весь свет ночного неба в % | В том числе рассеянного света в % | В том числе света слабых звезд в % | В том числе свет собственного свечения неба в % |
|---|---|---|---|---|
| $22^h30'$ | 100 | 32 | 33 | 35 |
| $0^h55'$ | 100 | 18 | 22 | 60 |
| $2^h40'$ | 100 | 30 | 24 | 46 |

половины (60%) приходится на собственное излучение неба, а на рассеянный свет остается только 18%. Под утро рассеянный свет делается более интенсивным, и самым слабым оказывается свет звезд (24%).

Представляется интересным определить энергию излучения зеленой линии в абсолютной мере.

Мы произвели соответствующие измерения [47]. При этом были получены следующие цифры, дающие число квант с длиной волны 5577,3 Å, приходящих с неба за 1 сек. на 1 *см*²:

$$22^h30' — 8\cdot10^7;$$
$$0^h55' — 20\cdot10^7;$$
$$2^h40' — 12\cdot10^7.$$

Абсолютное значение энергии зеленой линии еще несколько лет назад определял также Релей [49].

Релей получил число $18\cdot10^7$ квант, т. е. практически совпадающее с нашими данными.

## 12. Изучение поляризации

Летом 1935 г. под руководством автора этих строк оптической группой Эльбрусской экспедиции Академии наук СССР было проведено исследование состояния поляризации свечения ночного неба со склонов Эльбруса. Большая высота места наблюдения (3000 *м* над уровнем моря) обеспечивала большую прозрачность воздуха в отсутствие всяких загрязнений воздуха, делающих мутными нижние слои (2—3 *км*) атмосферы.

Цель работы состояла в следующем. Еще Релей и Дюфей обнаружили наличие небольшой поляризации света ночного неба. Если поляризация свечения ночного неба существует, то это должно указывать на наличие рассеянного света. В этом случае плоскость поляризации света должна все время поворачиваться вслед за движением Солнца. Была поставлена задача — определить положение плоскости поляризации в разные часы ночи.

Метод, с помощью которого производились наблюдения, был в отличие от прежних исследований не фотографическим, а визуальным. Мы уже описывали разработанный С. И. Вавиловым фотометрический метод гашения, использующий большую чувствительность глаза, адаптированного на темноту. Этим методом мы воспользовались для измерения поляризации.

Двоякопреломляющая кристаллическая пластинка давала два взаимно перпендикулярно поляризованных изображений квадратного отверстия, ограничивавшего вход в трубу прибора. Отверстие было расположено на таком расстоянии, что два его изображения располагались рядом друг с другом.

Весь прибор можно было поворачивать вокруг луча зрения. Если свет частично поляризован, то два квадратика кажутся не вполне одинаковой яркости. Но, поворачивая прибор, мы можем менять яркость одного квадратика относительно другого. При повороте на 90° тот квадратик, который был менее ярким, станет более ярким. Постепенно поворачивая трубу, можно установить ее так, что даже при наличии сколь угодно большой поляризации оба квадратика будут казаться совершенно одинаково яркими. Это будет в том случае, когда направление световых колебаний составляет угол в 45° с направлением поляризации в каждом из квадратиков. Отсчитав по специальному кругу с делениями угол поворота прибора, можно вычислить направление световых колебаний.

Таким образом наш метод позволял определять направление плоскости поляризации свечения ночного неба в каждый данный момент.

Результаты измерений для трех безлунных ночей в июле, августе и сентябре 1935 г. представлены на рис. 14 (сплошная кривая). По оси абсцисс отложены часы ночи, а по оси ординат—угол, образованный электрическим вектором световых колебаний частично поляризованного света ночного неба относительно плоскости, проходящей через луч зрения и через Солнце.

Плоскость поляризации рассеянного света должна составлять всегда 90° с плоскостью, проходящей через луч зрения и через Солнце. По мере того как Солнце двигается под горизонтом в течение ночи, плоскость поляризации также должна поворачиваться с той же скоростью: на 15° в час (Солнце за 24 часа проходит 360°, т. е. 15° в час).

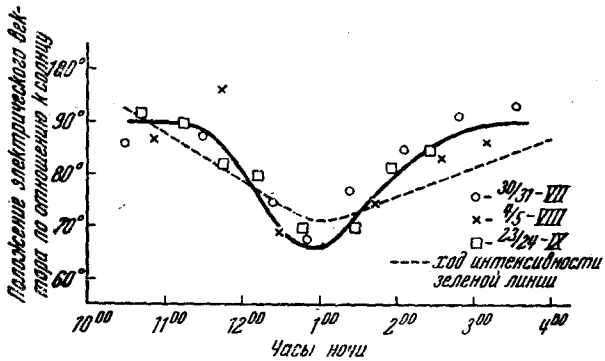


Рис. 14.

Если бы угол между плоскостью поляризации света ночного неба и плоскостью, проведенной через луч зрения и через Солнце, в течение всей ночи оставался равным 90°, то кривая на рис. 14 должна была бы быть прямой, параллельной оси абсцисс. На самом же деле на кривой имеется провал, максимум которого относится к 1 часу ночи. Но при этом в начале и в конце ночи точки дают угол 90°, т. е. так, как это требуется для рассеянного света. От 11 до 1 часа ночи плоскость поляризации поворачивается „слишком быстро" — больше, чем на 15° в час, в результате чего угол между направлением плоскости поляризации и плоскостью, проведенной через Солнце, делается меньше 90°. Плоскость поляризации „обгоняет" Солнце. Но после 1 часа ночи вращение плоскости поляризации замедляется, и к 2 ч. 30 м. утра угол опять принимает значение 90°.

Можно сказать, что кривая на рис. 14 свидетельствует о наличии двух разных явлений, накладывающихся друг на друга: во-первых, эта кривая показывает, что всю ночь происходит рассеяние света, несмотря на то, что в середине ночи Солнце находится глубоко под горизонтом. Благодаря этому всю ночь имеется частичная поляризация света ночного неба, причем плоскость поляризации все время поворачивается вслед за Солнцем.

На это основное явление, о котором свидетельствует кривая рис. 14, накладывается какое-то другое явление неизвестной природы, искажающее закономерный ход поляризации рассеянного света и обусловливающее провал на кривой.

Наличие рассеянного света глубокой ночью, даже в полночь является фактом исключительной важности. Оно свидетельствуе

или о наличии в мировом пространстве на больших расстояниях вокруг Земли какой-то разреженной материи или же о том, что земная атмосфера простирается гораздо выше, чем это было принято думать до сих пор, и что еще практически заметные плотности газа имеются на громадной высоте 2000—3000 *км* над земной поверхностью.

Что касается второго из упоминавшихся эффектов (провал на кривой), то его природа до сих пор остается неясной.

## 13. Замечание о теории свечения неба

Каково происхождение излучения, посылаемого нам ночным небом? Ясно, что в данном случае мы имеем свечение атмосферных газов, возникающее, повидимому, на весьма большой высоте.

В лабораторных условиях мы часто наблюдаем свечение газов, например, в гейслеровой трубке, в которой сквозь разреженный газ (упругость газа меньше 1 *мм* ртутного столба) пропускается электрический ток высокого напряжения. Но откуда в земной атмосфере могут появиться постоянно действующие электрические токи огромной силы и высокого напряжения? Этот вопрос представляется весьма неясным.

Свечение газов может возникнуть и при совсем других обстоятельствах. Многие газы начинают светиться, если их освещать ультрафиолетовыми лучами. Это есть так называемая фотолюминесценция газов. Но откуда в атмосфере ночью могут взяться ультрафиолетовые лучи? И на этот вопрос можно дать скорее отрицательный ответ.

Но, быть может, свечение неба возбуждается совсем другим агентом, именно — космическими лучами? Известно, что космические лучи, попадая в ядра газовых молекул, могут выбивать из ядер электроны, обладающие определенными скоростями. Эти электроны, встречая на своем пути атомы и молекулы газа, могут, вообще говоря, возбуждать их к свечению. Но хватит ли мощности космических лучей для возбуждения всего свечения ночного неба? В столбе воздуха, основание которого равно 1 $см^2$, за каждую секунду в атмосфере ночью излучается около $10^9$ световых квантов. Кроме того, космические лучи, если они в конечном счете и возбуждают свечение, будут давать очень малый коэфициент светового выхода, так как, кроме свечения, космические лучи вызывают еще ионизацию, а также другие явления, не связанные со свечением. И даже та часть, которая вызовет свечение, даст свечение не только в видимой области спектра, но также в ультрафиолетовой и в рентгеновой областях, для глаза не доступных и до земли вовсе не доходящих благодаря интенсивному поглощению в земной атмосфере.

Кроме того, имеет место хорошо установленный максимум интенсивности зеленой линии в 1 час ночи; — почему космические лучи или их действие могут обладать максимумом в 1 час ночи?

Таким образом мы видим, что любая гипотеза о происхождении свечения ночного неба вызывает сразу же весьма существенные возражения. Вопрос о природе собственного свечения неба до сих пор остается открытым. Причиной этому является, во-первых, трудность (благодаря малой интенсивности) экспериментального изучения свечения ночного неба, а потому отсутствие целого ряда важных данных (например, вопрос о вариации интенсивности в течение ночи для синих полос и для красных линий в спектре свечения ночного неба); второй причиной является недоступность для прямых опытов слоев, где возникает свечение ночного неба. Мы даже не знаем, на какой высоте возникает это свечение: быть может, на высоте 20 *км*, но быть может на высоте 100, а то и 1000 *км*. Можно только сказать, что это где-то „очень высоко". Физические свойства этих высоких слоев нам почти неизвестны, известно только, что они во многом отличны от слоев, близких к земной поверхности.

Однако о природе свечения ночного неба было высказано много гипотез. Здесь можно встретить и электрическое, и световое, и химическое, и космическое возбуждение свечения газов. Что имеет место в действительности, сейчас неизвестно никому, но какая-то из этих гипотез все же верна, может быть даже, что все они верны и что свечение ночного неба вызывается одновременно целым комплексом различных по природе причин.

## 14. Гипотеза электронного возбуждения свечения ночного неба

Весьма распространенным взглядом на природу свечения ночного неба является представление, согласно которому свечение неба возбуждается электронами. Эта точка зрения имеет своих сторонников среди французских исследователей (Кабанн, Дюфей, Дежарден и др.). В основе этого взгляда лежит предположение, высказанное в 1932 г. Довийе [50].

Гипотеза Довийе считает общей причиной всех геокосмических явлений (северные сияния, свечение ночного неба, зодиакальный свет, магнитные явления, образование озона и др.) электронное излучение Солнца. С этой же точки зрения Довийе объясняет солнечную корону. Электроны, вылетающие из Солнца, имеют громадные скорости, близкие к скорости света (их скорость соответствует ускоряющему действию электрического поля в $10^{10}$ V), и обусловливают по Довийе главную часть факелов в районах, близких к экваториальной плоскости Солнца. Их путь, который делается видимым благодаря рассеянию солнечного света, образует солнечную корону и зодиакальный свет. С этой точки зрения зодиакальный свет трактуется как результат вытягивания короны в области орбиты Земли (зодиакальный свет, как известно, можно наблюдать весной вскоре после захода Солнца и осенью перед восходом Солнца в виде конуса света, расположенного вдоль зодиакальных созвездий),

Когда электроны от Солнца приближаются к земному шару, их траектории загибаются вокруг силовых линий магнитного поля Земли. Радиусы орбит имеют в районе полюсов величины порядка земного радиуса. Таким образом Земля оказывается окруженной сферообразным „слоем", образованным перекрещивающимися траекториями электронов, расположенными на высоте, равной, примерно, радиусу Земли.

Эти быстрые электроны обусловливают ионизацию газов и тем самым появление вторичных электронов, обладающих гораздо меньшими скоростями. Эти вторичные электроны и рассматриваются как агент, возбуждающий свечение ночного неба. Так, например, Кабанн [51] на основании изложенных представлений рисует следующую картину процессов, происходящих в верхних слоях атмосферы.

Энергия вторичных электронов по Кабанну должна соответствовать примерно 7 eV. Эти электроны могут возбудить молекулы азота, переводя их в метастабильное состояние $A$ (см. схему энергетических уровней молекулы азота на рис. 6) с одновременным возбуждением колебательного движения молекулы, соответствующим квантовому числу 2 или 3 (именно эти частоты встречаются в системе полос Вегарда — Каплана). На это требуется 6,49 или 6,66 eV. Кроме того, такой вторичный электрон может диссоциировать молекулу кислорода на два нормальных атома (5,09 eV) или на два атома, из которых один нормальный, а другой находится на метастабильном уровне $^1D_2$ (7,05 eV, см. схему уровней кислорода на рис. 7). Переходами с этих уровней и обусловливаются излучение полос азота системы Вегарда — Каплана и зеленая линия кислорода. При излучении зеленой линии $\lambda = 5577$ Å атом кислорода переходит из одного метастабильного состояния $^1D_2$ в другое, тоже метастабильное состояние $^1S_0$.

Энергия возбужденных молекул азота $N_2(A)$ и атомов кислорода $O(^1S_0)$ или $O(^1D_2)$ может передаваться путем столкновения другим частицам. Так как оба эти состояния являются метастабильными, то вероятность того, что энергия будет отдаваться путем столкновений другим частицам, достаточно велика. При столкновении возбужденной молекулы азота $N_2(A_2)$ или $N_2(A_3)$ (индекс при $A$ показывает, что квантовые числа колебательной энергии равны соответственно 2 или 3) с возбужденным атомом кислорода $O(^1D_2)$ или $O(^1S_0)$ молекула азота может переходить на еще более высокий уровень $B$ с квантовым числом колебаний около 18 или около 7 (именно эти частоты встречаются в первой положительной системе полос азота). При столкновении возбужденного атома кислорода с молекулой воды может возбуждаться свечение этой последней. Энергии возбужденного атома кислорода достаточно, чтобы возбудить к свечению все полосы молекулы воды.

Таков ход мыслей, изложенных в работе Кабанна [51] (1935 г.). Что касается соотношений между энергетическими уровнями разных атомов и молекул, то они бесспорны, но эти соотношения никак не связаны с вопросом о том, можно ли вообще считать, что

свечение ночного неба возбуждается электронными лучами Солнца. Сама же эта гипотеза встречает ряд возражений.

Во-первых, наблюдения показали отсутствие сколько-нибудь значительного влияния широты места наблюдения на яркость свечения ночного неба. Даже под экватором яркость свечения неба, примерно, та же, как и на умеренных широтах (Релей). Между тем, загибание электронов в магнитном поле происходит так, что мы должны иметь очень большой широтный эффект.

Во-вторых, хорошо теперь известно наличие максимума яркости зеленой линии свечения неба в 1 час ночи. Этот максимум очень отчетливо выражен, и он никак не может быть объяснен с точки зрения возбуждения свечения электронными лучами Солнца. А между тем именно такого рода явления, как суточные вариации яркости свечения, должны будут в первую очередь явиться ключом к пониманию природы свечения.

Наконец, сама исходная гипотеза Довийе является сомнительной. Объяснение ряда геофизических явлений корпускулярным излучением Солнца предлагалось уже давно и многими лицами, в частности Штермером, для объяснения явления полярных сияний. Корпускулярное излучение, повидимому, играет определенную роль в образовании северных сияний. Об этом говорит хотя бы установленная тесная связь между магнитными бурями, северными сияниями и солнечными пятнами и другими явлениями на Солнце. Но если самый характер северных сияний соответствует возмущениям, имеющим место от времени до времени и при особых обстоятельствах, то свечение ночного неба, наоборот, есть явление установившееся. Если факторы, о которых идет речь, и принимают участие в возбуждении свечения ночного неба, то тоже в виде каких-то возмущений, обусловливающих те неожиданные усиления яркости ночного неба, которые от времени до времени имеют место. Они, быть может, создают только некоторую, подверженную возмущениям часть свечения неба.

С этой точки зрения особого внимания заслуживают различия в спектрах северных сияний и свечения ночного неба. И там и здесь основными являются линии и полосы, принадлежащие азоту и кислороду. Это совершенно естественно, так как и то и другое свечение возникает в одной и той же среде — в атмосфере, состоящей, главным образом, из азота и кислорода. Но характер спектров совершенно различен в отношении интенсивности компонент спектра: в спектрах северных сияний из всех полос азота самыми слабыми являются полосы Вегарда — Каплана, а самыми яркими — полосы отрицательной системы; в спектрах свечения неба, наоборот, полосы Вегарда — Каплана являются наиболее интенсивными, а полосы отрицательной системы — наиболее слабыми. Весь характер спектров оказывается „перевернутым“. Кроме того, в спектре ночного неба есть десятки линий, вовсе отсутствующих в спектре северных сияний.

Гипотеза Довийе, лежащая в основе теории, о которой идет речь, объясняет, как указывалось выше, зодиакальный свет как

рассеяние солнечного света на электронном облаке вокруг Солнца, вытянутом в плоскости земной орбиты. В этом отношении также нужно сделать некоторые замечания. Уже очень давно (несколько сот лет) высказываются две точки зрения на природу зодиакального света. Одна из них (как и у Довийе) считает, что зодиакальный свет обязан своим происхождением кольцеобразному облаку разреженной материи вокруг Солнца, а другая полагает, что зодиакальный свет связан с самыми высокими слоями земной атмосферы. Но за самое последнее время получены новые данные, которые позволяют заключить о том, что зодиакальный свет нужно рассматривать как явление, связанное с земной атмосферой.

Наконец, представление о мощном корпускулярном излучении Солнца, приходящем, якобы, на Землю, вообще имеет ряд неясных мест. Так, например, во время полного солнечного затмения 31 августа 1932 г. производились наблюдения с целью обнаружить не только „световую тень" Луны, но также и „корпускулярную тень", т. е. закрывание корпускулярных лучей Солнца телом Луны. Наблюдения показали отсутствие корпускулярной тени. Кроме того, неясно, каким образом корпускулярные лучи достигают мощным пучком Земли, не рассеиваясь на громадном пути от Солнца в мировое пространство (отталкивание одноименно заряженных частиц друг от друга).

Все это заставляет с очень большой осторожностью подходить к гипотезе возбуждения свечения ночного неба электронными лучами Солнца. Если эти лучи и возбуждают свечение, то, как показывает наличие максимума яркости в 1 час ночи, вовсе не все свечение, а только некоторую его часть, обусловливая незакономерные скачки общей яркости ночного света, которые имеют место в некоторые ночи. Основная же часть свечения, своей устойчивостью в корне отличающегося от северных сияний, возникающих вспышками, имеет, повидимому, другое происхождение, существенно отличное от происхождения северных сияний.

## 15. Диссоциирующее действие ультрафиолетовых лучей Солнца

Есть все основания считать, что энергию свечения ночного неба поставляют ультрафиолетовые лучи Солнца. Эти лучи производят диссоциацию и ионизацию газов и таким путем аккумулируют свою энергию в атмосфере. Рассмотрим процессы, связанные с диссоциацией, несколько подробней.

В атмосфере кислород существует в молекулярном состоянии. Однако мы видели, что яркая зеленая линия $\lambda = 5577{,}3$ Å принадлежит атомному кислороду. Это заставляет предположить, что в верхних слоях атмосферы часть молекул кислорода диссоциирована на атомы. Эта диссоциация вполне может иметь место, так как она обязательно происходит, когда молекула кислорода поглощает ультрафиолетовый свет с длиной волны от 1300 до 1800 Å

и, как известно, есть все основания предполагать наличие ультрафиолетовых лучей этой длины волны в спектре Солнца.

Кроме того, мысль о наличии в верхних слоях атмосферы атомного кислорода подтверждается наличием в атмосфере трехатомного кислорода $O_3$, т. е. озона. Для образования молекул $O_3$ необходима, повидимому, реакция $O_2 + O = O_3$.

Ультрафиолетовое излучение Солнца с еще меньшей длиной волны (меньше 1000 Å) должно производить ионизацию молекул. Поэтому в верхних слоях атмосферы следует ожидать также наличия ионов. И действительно, установлено наличие ионизованных слоев в верхних областях атмосферы (слой Хивисайда и др.).

Процессы диссоциации и ионизации газов солнечными лучами происходит так, что эти процессы сосредоточиваются в атмосфере на некоторой определенной высоте. Теория этого очень важного для нас явления была разработана Чепменом, и мы ее сейчас вкратце рассмотрим.

Предположим, что плотность газа, поглощение лучей которым нас интересует, убывает с высотой по показательному закону.

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{h}{H}}, \tag{1}$$

где $\rho$ есть плотность газа на высоте $h$, $\rho_0$ — на уровне земли, а

$$H = \frac{RT}{gM}.$$

Здесь $R$ — газовая постоянная, $T$ — абсолютная температура газа, $g$ — ускорение силы тяжести, $M$ — молекулярный вес газа *. Рассмотрим поглощение в атмосфере монохроматического излучения Солнца, интенсивность которого за пределами атмосферы обозначим через $I_\infty$. Пусть пучок лучей сечением в 1 $см^2$ проходит через слой между $h$ и $h - dh$ под углом $\chi$ к вертикали. Объем этого элемента будет

$$\frac{dh}{\cos\chi},$$

а масса газа в этом объеме

$$\rho_0 \frac{dh}{\cos\chi} e^{-\frac{h}{H}}.$$

Можно считать, что количество света $dI$, поглощенного в каждом данном объеме газа, пропорционально трем факторам: коэфициен

* При $h = H$ получаем $\rho = \frac{\rho_0}{e}$, т. е. $H$ соответствует высоте атмосферы, на которой плотность газа уменьшалась в $e$ раз. Поэтому $H$ получило звание высоты однородной атмосферы.

поглощения света $A$, плотности газа и интенсивности света $I$, пришедшего к рассматриваемому объему. На основании этого мы можем написать:

$$dI = AI\rho_0 \frac{dh}{\cos \chi} e^{-\frac{h}{H}}. \tag{2}$$

Решение этого диференциального уравнения дает:

$$I = I_\infty e^{-\frac{A\rho_0 H \alpha}{\cos \chi}}, \tag{3}$$

где

$$\alpha = e^{-\frac{h}{H}}.$$

Этот результат получится при интегрировании от высоты, где свет только что вступает в атмосферу (т. е. $I = I_\infty$), до высоты $h$. Следовательно, $I$ является мерой энергии, поглощенной при проникновении луча до высоты $h$.

Если поглощенная в объеме $\frac{dh}{\cos \chi}$ энергии равна $dI$, то поглощение, отнесенное на 1 *см*³, будет

$$dI \frac{\cos \chi}{dh}.$$

На основании формулы (2) можем написать:

$$dI \frac{\cos \chi}{dh} = AI\rho_0 e^{-\frac{h}{H}}.$$

Для $I$ подставим его значение из формулы (3):

$$dI \frac{\cos \chi}{dh} = AI_\infty \rho_0 e^{-\frac{h}{H} - \frac{A\rho_0 H \alpha}{\cos \chi}}.$$

Число частиц, диссоциированных или ионизированных излучением, энергия которого равна единице, обозначим через $\beta$. Тогда число диссоциированных или ионизированных частиц в нашем случае мы получим, если умножим обе части последнего равенства на $\beta$. Это число обозначим через $f$:

$$f = \beta AI_\infty \rho_0 e^{-\frac{h}{H} - \frac{A\rho_0 H \alpha}{\cos \chi}}. \tag{4}$$

Это есть, таким образом, число частиц, возникающих в 1 *см*³ за 1 сек.

В этой формуле отношение $\frac{h}{H}$ входит как „двухэтажный“ показатель степени при $e$, так как согласно нашему обозначению

$\alpha = e^{-\frac{h}{H}}$. Это обстоятельство обусловливает специфическую зависимость от высоты числа частиц, возникающих в 1 *см*³ за 1 сек. При заданном $\chi$ в формуле (4) переменной величиной является только $h$. Выразим это явно:

$$f(h) = Be^{-\frac{h}{H}} - Ce^{-\frac{h}{H}}, \tag{5}$$

где $B$ и $C$ — постоянные величины, значение которых видно из формулы (4).

Как будет изменяться $f(h)$ в зивисимости от высоты?

Рассмотрим показатель степени:

$$-\frac{h}{H} - Ce^{-\frac{h}{H}} = -\left(\frac{h}{H} + Ce^{-\frac{h}{H}}\right).$$

При очень малых $h$ в скобке мало первое слагаемое, но второе слагаемое будет иметь максимальную величину: при $h = 0$ оно будет равно $C$. По мере увеличения $h$ второе слагаемое будет уменьшаться, но зато первое слагаемое будет возрастать, но возрастание первого слагаемого будет происходить медленнее, чем убывание второго, так как второе слагаемое имеет $h$ в показателе степени, а первое является простым множителем. Следовательно, $f(h)$ при $h = 0$ будет

$$f(0) = Be^{-C}, \tag{6}$$

но по мере возрастания $h$ будем иметь возрастание $f(h)$. При $h = \infty$ мы получим $f(\infty) = 0$. Следовательно, $f(h)$ по мере возрастания $h$ сначала возрастает, но при больших $h$ оно убывает, стремясь к нулю при $h = \infty$. Для какого-то промежуточного $h$ функция $f(h)$ должна иметь максимум.

Какова величина $C$? Нетрудно подсчитать, что $C$ есть очень большое число, если $A$ (коэфициент поглощения) достаточно велико. Следовательно, на малых высотах $f(h)$ очень мало.

На какой высоте $f(h)$ имеет максимум? Для отыскания максимума нужно приравнять нулю первую производную:

$$\frac{df}{dh} = 0,$$

откуда получаем, что:

$$e^{-\frac{h}{H}} = A\rho_0 \frac{H}{\cos\chi},$$

или

$$h_{\max} = H \ln A\rho_0 \frac{H}{\cos\chi}. \tag{7}$$

Таким образом диссоциирующее и ионизирующее действие солнечного излучения должно иметь максимум на некоторой высоте, определяемой по формуле (7).

Выше этого максимума поглощение света (а значит и диссоциация и ионизация) уменьшается, потому что уменьшается плотность газа. В более же низкие слои свет доходит уже сильно ослабленным.

Таким образом диссоциирующее и ионизирующее действие солнечных лучей будет сосредоточено в некотором слое, эффективная высота которого определяется формулой (7). Так, повидимому, возникает в атмосфере ионизованный слой Кеннели-Хивисайда на высоте 100 *км*, второй более высокий ионизованный слой на высоте порядка 250 *км*, а также слой озона на высоте 25 *км*.

Что касается формы слоя, то ее можно вычислить по формуле (4). На рис. 15 приведена кривая, вычисленная для $\chi = 0$ (Солнце в зените) для экватора. По оси абсцисс отложено количество поглощаемого света, а по оси ординат — высота (за единицу принята высота однородной атмосферы $H$ — см. выше).

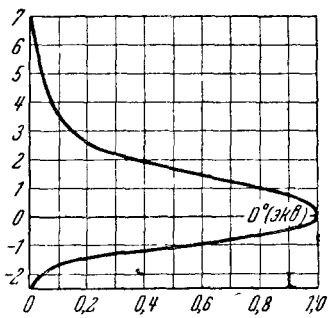

Рис. 15.

Для воздуха $H = 8$ *км*. Если принять для толщины поглощающего слоя расстояние от максимума, на которое кривая опустится в $e$ раз, то по рис. 15 это должно составлять от 1,2 до $2H$, т. е. 10 — 15 *км*.

Заметим, что все вышеизложенные рассуждения относятся к количеству ионов, образующихся в 1 *см*³ за 1 сек. на той или иной высоте. Если интересоваться вопросом о числе ионов, содержащихся в 1 *см*³, то нужно учитывать еще процессы рекомбинации атомов и ионов.

## 16. Фотохимическая теория свечения ночного неба

Вся солнечная радиация, начиная от длины волны 2900 Å и короче, поглощается в земной атмосфере, вызывая диссоциацию и ионизацию атмосферных газов. В результате за день в атмосфере накопляется громадная энергия. Не из этих ли запасов черпается энергия для собственного свечения атмосферных газов ночью?

Именно такую гипотезу выдвинул еще в 1931 г. известный английский геофизик Чепмен [52]. Эта гипотеза Чепмена принадлежит, по нашему мнению, к числу наиболее вероятных гипотез.

Чепмен в своих рассуждениях имеет в виду испускание зеленой линии $\lambda = 5577{,}3$ Å, принадлежащей к спектру атомного кислорода. Чепмен считает, что энергия должна накапливаться днем как энергия диссоциации молекул $O_2$ на атомы O. Эта энергия может

быть преобразована в световую только при посредстве какой-либо реакции (например, рекомбинации), в которой принимает участие диссоциированная частица и которая предполагает столкновение диссоциированной частицы с другими частицами. В результате этой реакции одним из продуктов должен быть возбужденный атом кислорода.

Частицы, вовлеченные в подобные реакции, Чепмен называет производящей субстанцией метастабильных атомов.

Одной из возможных реакций этого типа Чепмен считает реакцию соединения двух атомов кислорода в молекулу $O_2$:

$$O + O = O_2. \qquad (+)$$

Энергия диссоциации молекулы $O_2$ на атомы равна, примерно, 6,5 eV. Именно эта энергия должна освободиться в реакции (+). Эта реакция имеет своим результатом образование только одной частицы, поэтому для выполнения законов сохранения энергии и количества движения реакция будет иметь место только в присутствии какой-либо третьей частицы, т. е. должен произойти тройной удар. Третьей частицей может быть или $N_2$, или $O_2$, или O. Энергия, выделяющаяся при реакции (+), с избытком достаточна для возбуждения атома кислорода (4,18 eV). Этот возбужденный атом потом и высветится.

Однако вероятность тройных ударов очень мала, особенно в условиях разреженного газа. Чепмен рассматривает другую возможную реакцию, происходящую между ионами:

$$N_2^+ + O^- = N_2 + O_{возб.} \qquad (++)$$

Энергия, выделяющаяся при этой реакции, составляет около 14 eV. Она имеет своим продуктом две частицы и поэтому не требует тройных ударов. В этом отношении ей соответствует гораздо большая вероятность, чем реакции (+). Кроме того, в результате реакции (++) может быть возбужденным не только атом кислорода, но и молекула азота с излучением почти всех полос азота. Действительно, для возбуждения молекулы азота нужны следующие энергии:

| | |
|---|---|
| Полосы Вегарда — Каплана . . . . . | 6,1 eV |
| Первая положительная система азота . . . . . | 7,4 „ |
| Вторая положительная система азота . . . . . | 11,0 „ |

Что касается наличия в атмосфере ионов, то они там обязательно существуют, сосредоточиваясь в ионизованных слоях Кеннели-Хивисайда, Элиаса-Эпплтона и др.

Фотохимическая гипотеза Чепмена кажется нам наиболее естественной и правдоподобной. Особенно следует отметить, что

с точки зрения этой гипотезы возможно, как нам кажется, объяснить максимум яркости зеленой линии свечения ночного неба в 1 час ночи. К этому вопросу мы сейчас и перейдем.

## 17. Объяснение вариаций интенсивности зеленой линии

Наличие хорошо выраженного максимума яркости зеленой линии свечения ночного неба должно, безусловно, представлять пробный камень для всякой теории этого свечения. С этой точки зрения нам кажется, что на первое место должна быть поставлена фотохимическая теория, в рамках которой мыслимо объяснение ночного максимума.

Мы видели, что всю первую половину ночи яркость зеленой линии круто возрастает и это возрастание продолжается до 1 часа ночи. В 1 час ночи яркость зеленой линии в 2,5 — 3 раза больше, чем в 9 — 10 час. вечера.

Это явление носит характер некоторого „запаздывания". Должно пройти некоторое время, чтобы энергия, запасенная в атмосфере, смогла наиболее интенсивно расходоваться в виде энергии свечения ночного неба. Это запаздывание происходит на несколько часов. Какие могут быть причины такого большого запаздывания?

Нам кажется, что причины этого запаздывания могут заключаться в диффузии активных атомов из одного слоя в другой. Действительно, согласно всем теоретическим расчетам, накопление атомов кислорода, к спектру которых принадлежит зеленая линия, должно происходить преимущественно в некотором определенном слое (рис. 15). Для того чтобы возникло свечение кислородных атомов, нужно, чтобы произошла некоторая реакция (рекомбинация) между атомом (или ионом) кислорода и какой-либо другой частицей, например, реакции типа (+) и (+ +), указанные в предыдущем разделе. Таким образом для возникновения свечения атомов кислорода обязательно присутствие каких-либо других (как их назвал Чепмен, „производящих") частиц. Но этих „производящих" частиц может быть как раз очень мало в том слое, где образуется атомный кислород, и реакция сможет осуществляться только по мере проникновения атомов (или ионов) кислорода в слои, богатые этими „производящими" частицами. Другими словами, реакция будет осуществляться по мере диффузии атомов (или ионов) кислорода из одного слоя в другой.

Можно ли количественно с этой точки зрения объяснить возрастание яркости зеленой линии за промежуток времени от 9 час. вечера до 1 часа ночи (т. е. за 4 часа) в 2,5 — 3 раза? Чтобы ответить на этот вопрос, нужно решить соответствующую задачу о диффузии. Строгое решение такой задачи неизбежно наталкивается на непреодолимые трудности, но если не стремиться к полной строгости (чего вовсе и не нужно), а ограничиться определением порядка величин, то такой подсчет вполне можно сдела

Излучение зеленой линии дает $2 \cdot 10^8$ квантов в секунду из атмосферного столба, основанием в 1 *см*². За всю ночь (примерно, $4 \cdot 10^4$ сек.) излучается, примерно, $8 \cdot 10^{12}$ квантов. Свечение продолжается всю ночь, и, следовательно, запасы атомов к началу ночи должны быть не меньше этого числа. По подсчетам Чепмена, чтобы обеспечить устойчивое свечение на всю ночь, нужно иметь по крайней мере 50-кратный запас атомов — Чепмен указывает [52] число $5 \cdot 10^{14}$ атомов (или ионов) в столбе атмосферы с основанием в 1 *см*². Из этого числа мы и будем исходить.

Предположим, что слой, заключающий основную часть атомного кислорода, лежит на высоте $h = 120$ *км* (слой Кеннели—Хивисайда). Пусть распределение кислорода в этом слое по высоте задается некоторой функцией $f(h, t)$, зависящей от высоты и от времени. Коэфициент диффузии для кислорода обозначим через $D$. Задача ставится следующим образом.

Если распределение абсолютных концентраций кислорода (число атомов в 1 *см*³) к началу процесса диффузии ($t = 0$) дается функцией $f(h, 0)$, то каким будет распределение концентрации кислорода $f(h, t)$ через $t$ сек.?

Строгое решение соответствующей диффузионной задачи дает следующее решение:

$$f(h,t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(h,0) \frac{1}{2\sqrt{\pi t D}} e^{-\frac{(h_0-h)^2}{4Dt}} dh .$$

Здесь $h_0$ есть высота слоя, от которой отсчитываются все высоты. Если искать строгое решение поставленной задачи, то за функцию $f(h, 0)$ нужно было бы подставить теоретическую функцию (4) из раздела 15. Но в этом случае решение задачи весьма затруднилось бы, а кроме того, функция (4) на самом деле искажена вторичными эффектами, не учтенными при ее выводе (обратная рекомбинация образующихся атомов, отступление от барометрической формулы, немонохроматичность поглощаемого излучения). Поэтому мы просто будем считать, и этого нам для примерного расчета будет достаточно, что образующийся атомный кислород собран в некотором слое на высоте $h_0$, толщина которого, как это мы видели выше (раздел 15, рис. 15), составляет 10—15 *км*.

Мы будем считать, что заметная (для проникновения в слой богатый „производящими" частицами) диффузия произошла, если кислород продиффундировал на расстояние не меньшее толщины слоя, т. е. на расстояние 10—15 *км*. Другими словами, ста вится задача о числе атомов, которые успеют продиффундиро вать за данное время на расстояние 10—15 *км*. Будет ли эт число достаточно большим, чтобы повлиять на интенсивность зе леной линии, т. е. будет ли оно сравнимо с числом $5 \cdot 10^{14}$, вз тым нами за основу?

Что касается отсчета времени, то его правильнее всего вести от полудня. Действительно, диссоциирующее и ионизирующее действие солнечных лучей резко зависит от высоты Солнца, — оно наибольшее в полдень. Поэтому можно считать, что к середине дня образовалось полное количество атомов и ионов и процессы диффузии от полудня уже идут полностью. Мы будем считать, что в поглощающем слое имеет место полная диссоциация (или ионизация).

Для получения ответа на наш вопрос подсчитаем, какое число атомов (или ионов) продиффундирует на расстояние 10 *км*, во-первых от полудня к 9 час. вечера и, во-вторых, от полудня к 1 часу ночи.

При вычислении мы считаем высоту слоя, откуда начинается диффузия, равной 120 *км*, и общее давление на этих высотах вычисляем по барометрической формуле. Величина давления имеет существенное значение, так как от него зависит (обратно пропорционально) коэфициент диффузии.

Решение дало следующие результаты: 1) к 9 час. вечера на расстояние 10 *км* продиффундирует $10^{15}$ атомов, 2) к 1 часу ночи продиффундирует $10^{16}$ атомов.

Таким образом результаты подсчета оказываются весьма обнадеживающими во всех отношениях: 1) чисто диффузионный эффект может обусловить проникновение из поглощающего слоя в места, где может происходить свечение количеств кислорода, достаточных для объяснения наблюдаемой яркости зеленой линии; 2) чисто диффузионный эффект может объяснить резкое возрастание свечения в течение ночи. К 1 часу ночи продиффундирует в 10 раз больше атомов, чем к 9 час. вечера, но благодаря убыли числа частиц в результате рекомбинации возрастание яркости будет несколько меньшим. Эта убыль общего числа частиц благодаря рекомбинации и замедление процессов диффузии вследствие выравнивания концентраций делает понятным некоторое ослабление зеленой линии в конце ночи.

Наши подсчеты были сделаны для высоты 120 *км*. Результаты будут существенно иными, если взять другую высоту, главным образом, благодаря тому, что коэфициент диффузии убывает при увеличении давления. Эти результаты оказываются весьма поучительными.

Если сделать аналогичный подсчет для $h_0 = 100$ *км*, то оказывается, что на расстояние 10 *км* к 9 час. вечера продиффундирует всего лишь $5 \cdot 10^2$ атомов, т. е. совершенно недостаточно. Для $h = 80$ *км* подсчет показывает, что к 9 час. ночи на расстояние 10 *км* не продиффундирует ни один атом. Наоборот, для $h = 140$ *км* получается $10^{27}$ атомов. Для этой высоты к 9 час. вечера $10^{15}$ атомов продиффундируют на 15 *км*. Для $h = 160$ *км* получается, что к 9 час. вечера $10^{15}$ атомов успеют продиффундировать на расстояние 50 *км*, а для высоты $h = 180$ *км* к 9 час. вечера уже успеет произойти почти полное перемешивание.

Эти результаты означают, что если исходить из фотохимической теории и считаться с влиянием диффузии, то можно весьма хорошо определить высоту светящегося слоя Действительно, в этом случае светящийся слой не может быть ниже 120 *км*, так как уже для 100 *км* влияние диффузии будет ничтожно малым, и нарастание яркости зеленой линии останется необъясненным. Выше 180 *км*, наоборот, еще до наступления ночи произойдет полное перемешивание, и мы должны будем иметь непрерывное убывание яркости зеленой линии в течение ночи, чего нет в действительности. Таким образом оказывается возможным указать границы светящегося слоя.

Подобного рода подсчет является первым случаем, когда оказалось возможным теоретически подойти к вопросу о высоте светящегося слоя. Уже благодаря одному этому самая мысль об учете влияния диффузии заслуживает всяческого развития.

## 18. Фотолюминесценция неба. Обнаружение свечения в сумерках

В 1936 г. было обнаружено очень интересное явление, связанное с собственным свечением неба. Кабанн и Гарик[53] обнаружили интенсивное свечение неба в сумерках.

Когда Солнце в сумерках садится все ниже и ниже под горизонт, нижние слои воздуха входят в тень, в то время как верхние слои продолжают освещаться прямыми солнечными лучами. По мере того как граница солнечных лучей поднимается все выше, яркость неба убывает (сумерки), пока не наступит ночь.

Уже давно возникал вопрос, не возбуждаются ли атомы кислорода и других газов к свечению прямыми солнечными лучами? Известно, что газы, облучаемые ультрафиолетовыми лучами, могут сами светиться (фотолюминесценция). Не светится ли само небо и днем помимо того, что оно рассеивает солнечный свет?

Наличие такого свечения было бы весьма важным фактом для понимания многих процессов, имеющих место в атмосфере. Однако долгое время попытки обнаружить это свечение оставались безрезультатными. Автор этих строк даже совершил в марте в 1936 г. в поисках собственного излучения неба днем, два полета на суб стратостатах на высоту 9—10 *км*. Ожидалось, что яркий фо рассеянного света неба будет настолько ослаблен при подъеме н большую высоту (благодаря тому, что значительная часть воз духа, рассеивающего солнечные лучи, остается уже внизу), чт удастся выявить собственное излучение неба, которое в обычны условиях забивается ярким рассеянным светом. Однако наши по иски окончились безрезультатно — ослабление рассеянного света н высоте 10 *км* было недостаточным.

Одновременно в нескольких местах возникла следующая мысл фотографировать спектр неба в сумерках, когда яркость не ослаблена в сотни раз, но высокие слои воздуха, в которых

должно быть по всем ожиданиям сосредоточено свечение, будут еще освещены прямыми лучами Солнца. Эти наблюдения дали положительные результаты.

Дюфей и Гарик, фотографируя на светосильных спектрографах спектр сумерек, обнаружили излучение красной линии кислорода $\lambda = 6300$, происходящее в течение всех сумерек. Им удалось получить целый ряд спектров в течение сумерек и тем самым прослудить изменение яркости красной линии кислорода в зависимости от высоты освещенного слоя. Оказалось, что главную часть излучения дают слои на высоте 120—140 *км*.

Это находится в хорошем согласии с нашими подсчетами, сделанными для явления диффузии в предыдущем параграфе.

Независимо от Дюфея и Гарика свечение неба в сумерках было открыто и в СССР М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым на Эльбрусе.

Дальнейшее изучение этого интересного явления представляется очень важным и, начиная с лета 1937 г., оно будет систематически проводиться на одной из южных обсерваторий в СССР.

## 19. Другие возможные гипотезы

Мы исчерпали список сколько-нибудь обоснованных гипотез о происхождении собственного свечения неба. И только ради полноты мы упоминаем еще несколько гипотез, которые пока не фигурируют в числе ходовых гипотез, но которые тем не менее представляют определенный интерес.

Одна из таких возможностей заключается в том, что свечение ночного неба может быть просто фотолюминесценцией неба, т. е. свечением, возникающим под непосредственным действием солнечных лучей. Такая возможность исключается почти наверное (Солнце находится глубоко под горизонтом), но не полностью. Прежде всего неизвестно, до какой высоты простираются заметные количества воздуха. Не является невероятным предположение, что следы газа имеются до высоты в несколько тысяч километров. Одним из доводов за это является установленное нами наличие в течение всей ночи поляризованного рассеянного солнечного света, составляющего не менее 20% всего света ночного неба (см. главу о поляризации). Для объяснения присутствия этого рассеянного света нужно предположить, что рассеяние света происходит выше 2000—3000 *км* (граница солнечных лучей в полночь на широтах, где производились наши наблюдения). Для объяснения всего рассеянного солнечного света ночью нужно предположить, что на высотах в 2000—4000 *км* плотность газа равна примерно $10^5$ *мм* ртутного столба (весьма хороший вакуум). Существование таких плотностей до высоты в 4000 *км* не является невозможным.

Не исключена возможность, что те же газы, которые производят рассеяние солнечного света, сами светятся под действием солнечных лучей. Для объяснения с этой точки зрения всей яркости свечения ночного неба совершенно достаточно того же количества

газа, которое нужно допустить (не вдаваясь в причину его появления) в наиболее высоких слоях для объяснения наблюденных количеств рассеянного света.

Наконец, не исключена и совсем другая возможность, именно, что даже глубокой ночью солнечные лучи проникают и в более низкие слои атмосферы. Дело в том, что обычные законы преломления света резко нарушаются для света, длина волны которого мало отличается от длины волны, поглощаемой преломляющим веществом. Вблизи линий и полос поглощения показатель преломления резко возрастает — это есть явление так называемой аномальной дисперсии. При большом показателе преломление рефракция свет в атмосфере может быть гораздо больше 1°, наблюдаемого обычно. Достаточно, чтобы рефракция достигала 3°. Тогда, как это можно показать, луч уже не покинет земной атмосферы: благодаря полному внутреннему отражению он обогнет Землю.

Известное участие в возбуждении собственного свечения неба могут принимать и космические лучи. Если экстраполировать кривую Регенера для интенсивности космических лучей на разной высоте за пределы атмосферы, то можно подсчитать полную энергию космических лучей, поглощаемых в атмосфере. Эта энергия равна $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ *эрг/см*$^2 \cdot$ *сек* Между тем, полная энергия свечения ночного неба составляет как раз $3 \cdot 10^{-3}$ *эрг/см*$^2 \cdot$ *сек.* Наконец, не исключена возможность того, что ночью возникает вертикальное движение электрических зарядов. Действительно, за день в атмосфере под действием ультрафиолетовых лучей Солнца образуются в большом числе ионы. Ночью эти поляризованные слои могут приходить в движение, стремясь к некоторому перераспределению по высоте для установления равновесного состояния. Эти ночные электрические токи могут возбуждать газы к свечению, подобно тому, как это происходит в Гейслеровой трубке. Однако эта точка зрения встречает некоторые количественные трудности. Чтобы дать наблюдаемую яркость ночного неба по всему небесному своду, этот вертикальный ток должен был бы развить очень большую мощность: подсчеты дают мощность в 10 млн. kW. Столь большие токи должны были бы обнаруживаться по целому ряду признаков, в частности, они должны были бы сопровождаться заметными магнитными полями. В действительности же такие магнитные поля не обнаруживаются.

## Заключение

На этом мы заканчиваем статью о свечении ночного неба. Если у человека, прочитавшего эту статью, останется впечатление, что совокупность всего материала по свечению неба, несмотря на безусловный интерес многих открытий в этой области, в целом производит все же впечатление чего-то сырого, подчас несистематизированного и незаконченного, то мы должны будем признать, что так в действительности дело и обстоит. Целый ряд основных проблем здесь еще только поставлен и вовсе не решен. Автор не

хотел сглаживать шероховатостей там, где они есть на самом деле. Его целью было, наоборот, дать такое изложение материала, при котором все незаконченное имело бы вид незаконченного, чтобы было отчетливо видно, в каких именно направлениях нужно в первую очередь направить усилия исследователя, желающего придать проблемам, связанным со свечением ночного неба, наиболее разработанный вид. Полное завершение всех этих проблем — дело будущего.

---

## ЛИТЕРАТУРА


1. S. Newcomb, A Rude Attempt to Determine the Total Light of All the Stars, Astrophys. Journ., **14**, 297—312, 1901.
2. G. J. Burns, The Total Light of All the Stars, Astrophys. Journ., **16**, 66, 1902.
3. Townley, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, **15**, 13, 1903.
4. Yntema, On the Brightness of the Sky and Total Amount of Starlight, Publications of the Astronomical Observatory at Groningen, № 22, 1909.
5. Fabry, The Intrinsic Brightness of the Starlit Sky, Astrophys. Journ., **31**, 394, 1910.
6. E. Wichert, Polarlichtbeobachtungen in Göttingen, Phys. Z., **3**, 365, 366, 1902.
7. V. M. Slipher, On the General Auroral Illumination of the Sky and the Wave-Length of the Chief Aurora Line, Astrophys. Journ. **49**, 266—275, 1919.
8. Lord Rayleigh, The Colour of the Light from the Night Sky, Proc. Roy. Soc., **99**, 10—18, 1921.
9. H. D. Babcock, A Study of the Green Auroral Line by the Interference Method, Astrophys. Journ, 57, 209—221, 1923.
10. Vegard, Phil. Mag. (6), **46**, 577—604, 1923.
11. J. C. Mc Lennan a. G. M. Shrum, On the Luminescence of Nitrogen, Argon and other Condenced Gases at very Low Temperatures, Proc. Roy, Soc., **106**, 138—149, 1924.
12. J. C. Mc Lennan a. G. M. Shrum, On the Origin of the Auroral Green Line 5577 Å, and other Spectra Associated with the Aurora Borealis, Proc. Roy. Soc., **108**, 501—512, 1925.
13. J. C. Mc Lennan, J. H. Mc Leod a. Mc Quarrie, An Investigation into the Nature and Occurence of the Auroral Green Line 5577 Å, Proc. Roy. Soc., **114**, 1—22, 1927; Nature, **118**, 441, 1926.
14. J. C. Mc Lennan a. J. H. Mc Leod, On the Wave-Length of the Green Auroral Line in the Oxigen Spectrum, Proc. Roy. Soc., **115**, 515—527 1927.
15. G. Cario, Die Wellenlänge der grünen Nordlichtlinie, Z. Physik, **42**, 15—21, 1927.
16. Lord Rayleigh, Further Observations on the Spectrum of the Night Sky, Proc. Roy. Soc. (A), **45**, 52, 1923.
17. J. Dufay, C. R., **176**, 1290, 1923.
18. L. A. Sommer, Z Physik, **57**, 58, 1929.
19. J. Dufay, C. R. **193** 1106, 1931.
20. J. Dufay, Journ. Phys., sér. 7, 221, 1933.
21. K. R. Ramanathan, Ind. Journ. Phys., **7**, 405, 1932.
22. L. Vegard, Geofys. Publ. Oslo, N 2, 1932.

22a J. Dufay, Intensité, polarisation et composition spectrale de la lumière du ciel nocturne, Réunions de l'Institut d'optique, 5-ième Réunion (13. VI), 1933, pp. 118—155.
23. V. M. Slipher, Publ. astron. Soc. Pacific, 41, 262, 1929.
24. J. Dufay, C. R., 194, 1897, 1932.
25. L. A. Sommer, Z. Physik, 77, 374, 1932.
26. J. Cabannes, C. R., 198, 2132, 1934.
27. J. Cabannes, Journ. de phys. et rad., 5, 603, 1934.
28. G. Déjardin, Light of the Night Sky, Rev. Mod, Phys., 8, 1—21, 1936.
29, J. Cabannes et J. Dufay, Analyse spectrale de la lumière du ciel nocturne au Pic du Midi, C. R., 198, 306, 1934.
30. J. Cabannes et J. Dufay, Communication au Congrès des Sociétés Savantes, Lyon, 1935.
31. J. Cabannes et J. Dufay, Les bandes de Vegard — Kaplan dans le spectre du ciel nocturne, C. R., 200, 1504—1507, 1935.
32. F. Baldet, Recherces sur la constitution des comètes et les spectres du carbone, Thèse, Paris, 1926, p. 58.
33. J. Kaplan, Nature, 135, 229, 1935.
34. J. Kaplan, Nature, 121 711, 1928; Phys. Rev., 33, 154, 1929.
35. J. Kaplan, Phys. Rev., 42, 807, 1932.
36. J. Kaplan, Phys. Rev., 45, 671, 1934.
37. J. Kaplan, Nature, 135, 229, 1935.
38. J. Kaplan, Nature. 135, 1034, 1935.
39. G. Déjardin et R. Schwégler, C. R., 199, 110, 1934; Journ. de phys. et rad,, 6, 110, 1935.
40. R. Bernard, C. R., 200, 2074, 1935.
41. Ch Fabry, La lumière du ciel nocturne, Annuaire du Bureau des Longitudes, 1936, p. 4.
42. J. C. Mc Lennan, J. H. Mc Leod a. J. C. Ireton, Trans. Roy. Soc. canada, 22, 397, 1928.
43. С. И. Вавилов. Фотометрический метод гашения и его применения, Природа, №12, 1935 г.
44. Н. Добротин, И. Франк и П. Черенков, Наблюдения свечения ночного неба методом гашения, Доклады Академии наук СССР, т. I № 2—3, 110—117, 1935.
45. А. Лебедев и И. Хвостиков, Вариации интенсивности зеленой линии свечения ночного неба, Доклад Акад. наук СССР, т. I, № 2—3, 118—127, 1935.
46. К. Б. Паншин, И. А. Хвостиков и В. И. Черняев. Распределение энергии в спектре свечения ночного неба в разные часы ночи, Труды Эльбрусской экспедиции 1934 и 1935 гг.
47. V. J. Cerniaev, I. A. Chvostikov et K. B. Panschin, Répartion de l'énergie dans le spectre de la lumière du ciel nocturne. Journ. de Physique et le Radium (VII), т. VII, N 3, 149—152, 1936.
48. King, Proc. Roy. Soc., London (A), 88, 1913; Phil. Trans., 212, 1913.
49. Rayleigh, Proc. Roy. Soc. London (A), 129, 458, 1930.
50. A. Dauvillier, Rev. gén. de l'électricité, 31, 303, 443, 447, 1932.
51. J. Cabannes, La lumière du ciel nocturne, Helvetica Physica acta VIII, N 5, 405—420. 1935.
52. S. Chapman, Some Phenomena of the Upper Atmosphere, Proc Roy. Soc. London (A), 132, 1931.
53. J. Cabannes et Hubert Garrique, C. R., 203, 484, 1936.