

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ АТМОСФЕРЫ***И. А. Хвостиков***ТИПЫ АТМОСФЕРНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ**

В земной атмосфере постоянно происходит свечение газов, входящих в её состав. Типы свечения многообразны. Один тип люминесценции атмосферы известен давно: это северные сияния, люминесценция воздуха на высоте 100 км и выше.

Ещё М. В. Ломоносов в своём «Слове о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих» дал подробное описание северного сияния, бывшего 23 января 1750 г., сопроводив его собственной зарисовкой, выгравированной на медной доске. М. В. Ломоносов на полтора столетия опередил науку своего времени в понимании значения исследований высоких слоёв атмосферы, в частности, путём изучения соответствующих оптических явлений. Его интерес к северным сияниям был глубоким и постоянным. Каждое сколько-нибудь выдающееся сияние Ломоносов зарисовывал. Он начал писать большую работу «Испытание причины северного сияния и других подобных явлений» (1763 г.). Его взгляды на происхождение северных сияний, связывающие свечение воздуха с электрическими процессами в атмосфере, правильно схватывают главное и не уступают теориям северных сияний второй половины XIX века. Только ещё позже, полвека тому назад, после открытия «южных» сияний и успехов гелиофизики и учения о магнитном поле Земли, стало ясным и другое важное обстоятельство: электрические атмосферные процессы, возбуждающие полярные сияния, вызываются солнечным излучением. Сейчас вряд ли можно сомневаться в том, что причиной полярных сияний являются корпускулярные потоки, извергаемые отдельными участками поверхности Солнца. В своё время эта гипотеза встретила с большими трудностями: высказывалось даже предположение о возбуждении полярных сияний мощными кратковременными вспышками ультрафиолетовой радиации Солнца. Теория корпускулярного возбуждения преодолела основные трудности, хотя и до сих пор не является вполне законченной и беспорной¹.

Уже в XX веке было открыто несколько других типов атмосферного свечения. Это — светимость ночного неба (1919), сумеречная

люминесценция атмосферы (1936) и искусственно возбуждаемая флюоресценция атмосферы (1947).

Указанные четыре типа свечения существенно отличаются друг от друга. Их исследованию посвящены сотни работ, многие из которых принадлежат перу выдающихся физиков, геофизиков и астрономов. Полученные результаты имеют большое научное и практическое значение, в частности, для изучения состава воздуха на разной высоте, общего строения атмосферы и понимания ряда замечательных физических явлений в высоких слоях атмосферы. Подробное изложение фактических данных можно найти в другом месте¹. Здесь же мы попытаемся дать общую характеристику современного состояния проблемы люминесценции атмосферы в целом и выявить те главные моменты, на которые, по нашему мнению, следует обратить особое внимание при дальнейшей разработке этой интересной проблемы.

НОЧНОЕ И СУМЕРЕЧНОЕ СВЕЧЕНИЕ

47 лет тому назад Ньюкомб обнаружил «избыток» яркости ночного неба². Зная освещённость, создаваемую на земной поверхности звездой определённой величины и подсчитав число звёзд различной величины, можно вычислить освещённость, создаваемую всеми звёздами и сравнить её с фактической освещённостью ночью. Эта последняя в несколько раз больше той освещённости, которая может быть объяснена звёздным светом. За последнее время успехи звёздной статистики сделали подсчёты звёздного света весьма достоверными и вполне подтверждают наличие указанного избытка света¹. Возникла гипотеза о непрерывном свечении атмосферы³. Ряд открытий, начиная с 1919 г., подтвердил эту гипотезу. В спектре ночного неба была открыта зелёная линия $\lambda = 5577 \text{ \AA}$, та самая, которая всегда присутствует в спектре полярных сияний⁴. Вскоре было доказано, что она излучается атомным кислородом при запрещённых переходах между двумя метастабильными состояниями. Это излучение ночного неба, в отличие от полярных сияний, наблюдается в любой момент каждой ночи и в любом географическом пункте. Интенсивность зелёной линии, соответствующая излучению примерно 10^8 квант за 1 сек. в вертикальном атмосферном столбе сечением 1 см^2 , почти одинакова на всех широтах. В спектре ночного неба в дальнейшем были обнаружены другие линии атомного кислорода и многочисленные полосы молекулярного азота¹. Земное происхождение этих линий и полос излучения доказывается закономерным возрастанием их яркости от зенита к горизонту (в 2—3 раза); для свечения внеатмосферного происхождения такой зависимости быть не может. Из отношения яркости в зените и у горизонта можно даже примерно определить высоту светящегося слоя: она получается между 50 и 500 км; по наиболее строго обработанным измерениям академика В. Г. Фесенкова — это 250 км для зелёной линии⁵. Из чисто теоре-

9 УФН, т. XXXVI, вып. 3

тических соображений следует, что слой, излучающий кислородные линии, заключён между высотами 130 — 180 км¹. Механизм возбуждения светимости ночного неба остаётся пока во многом неясным, как мы увидим это дальше.

В 1936 — 1937 гг. была открыта сумеречная люминесценция неба. Сначала во Франции было открыто⁶ наличие весьма яркого кислородного излучения $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ при погружении Солнца под горизонт на $9^\circ - 14^\circ$. Но наиболее замечательный случай был открыт советскими физиками М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым в 1937 г.: это яркая вспышка жёлтой натриевой линии (дублет $D_1 - D_2$) при погружении Солнца под горизонт на $6^\circ - 7^\circ$ ⁷. За последние 10 лет было опубликовано более полусотни работ, посвящённых изучению этого интересного свечения⁸. Установлено, что содержание натрия составляет не менее $10^{10} - 10^{11}$ атомов в вертикальном столбе воздуха сечением 1 см², причём почти всё это количество натрия содержится в сравнительно тонком слое воздуха, который простирается, повидимому, от 50 — 60 км до 80 — 85 км над земной поверхностью. Свечение возбуждается солнечными лучами и представляет собой резонансную флуоресценцию паров натрия⁸.

СВЕЧЕНИЕ НАТРИЯ В ТРОПОСФЕРЕ

Изучение описанных выше атмосферных свечений — полярных сияний, светимости ночного неба и сумеречного свечения — дало много интересного и важного для физики, астрономии и особенно для геофизики (исследование состава и строения высоких слоёв атмосферы). Но при всём большом значении этих результатов они все отличаются тем, что связаны со свечением, происходящим в атмосфере «само собой», без вмешательства экспериментатора, вследствие чего исследование свечения сводится к наблюдению «готовых» явлений. В указанных исследованиях нет эксперимента в точном смысле этого слова, а есть лишь наблюдение, хотя и выполняемое подчас посредством тонких и совершенных экспериментальных средств. Конечно, гораздо более далеко идущие возможности открылись бы, если бы можно было возбуждать атмосферное свечение по усмотрению экспериментатора. С этой точки зрения принципиальный интерес представляет новый тип свечения свободной атмосферы, который был открыт в 1947 году и продолжает изучаться в 1948 году под Москвой.

Поиски этого свечения продолжались ряд лет и только теперь увенчались успехом. Речь идёт о флуоресценции паров натрия в нижних слоях атмосферы.

Откуда берётся натрий, наблюдаемый в слое 60 — 80 км? Ш.Фабри полагает, что натрий попадает в атмосферу из межзвёздного пространства. Ряд французских авторов стоит на точке зрения метеорного происхождения натрия в стратосфере и ионосфере. Некоторые связывают попадание натрия в атмосферу с вулканической деятель-

ностью. Но на основании критического анализа имеющихся данных, который известен читателю по недавно опубликованному в «Успехах физических наук» обзору 8, следует считать наиболее вероятным, что главным источником натрия является морская соль, попадающая в атмосферу вместе с капельками, 'разбрызгиваемыми волнами. Самые мелкие капли уносятся с поверхности океана вверх восходящими потоками воздуха и испаряются, оставляя в воздухе крупинки соли. Вряд ли можно сомневаться в том, что по крайней мере до высоты 85 км происходит постоянное перемешивание воздуха с разных уровней, поэтому частички натрия или соли могут проникать до 85 км. Повидимому, слой 85 — 120 км, отличающийся мощной температурной инверсией, играет роль задерживающего слоя, сквозь который обмен воздухом между стратосферой и ионосферой может происходить лишь весьма замедленно. Яркость сумеречного свечения натрия внезапно убывает в десятки раз при погружении Солнца под горизонт на $6^\circ - 7^\circ$, откуда следует, что натрий содержится преимущественно в слое, ограниченном сверху высотой 80 — 90 км. Этот факт сам по себе наводит на мысль о том, что натрий попадает в слой 60 — 80 км снизу, а не сверху. Известно, например, что серебристые облака появляются после сильных вулканических извержений, сопровождающихся выбросом большого количества пылевидного вещества до высоты 20 — 30 км, причём облака всегда регистрируются на высоте 80 — 85 км, но выше уровня 85 км эта вулканическая пыль никогда и никак себя не обнаруживает.

Свечение стратосферного натрия в сумерках становится заметным при погружении Солнца под горизонт h_\odot не меньше, чем на угол $4^\circ - 5^\circ$, когда тень Земли проходит на высоте 50 км. Означает ли отсутствие *D*-линий натрия в спектрах сумеречного неба при $h_\odot < 4^\circ$, что натрий отсутствует в слоях воздуха ниже 50 км? Многие ошибочно так считают. Но предположим, что число атомов натрия в 1 см³ одно и то же на высоте 30 км и 50 км. Изменению высоты тени Земли во время сумерек на 20 км соответствует изменение яркости рассеянного света сумеречного неба в 10 раз. Следовательно, *D*-линии натрия, обусловленные свечением натрия на уровне 30 км, будут сопровождаться непрерывным спектром рассеянного света неба в 10 раз большей яркости, чем, соответственно, на уровне 50 км, хотя яркость *D*-линий изменится мало. Но непрерывный спектр как раз и является главной помехой для обнаружения *D*-линий. Ясно, что и ниже 50 км может находиться немалое количество натрия, который, однако, остаётся незамеченным при сумеречных наблюдениях. Если натрий идёт в стратосферу из тропосферы, а не из ионосферы, то можно пытаться обнаружить его непосредственно в нижних слоях атмосферы. Такие поиски, по совету С. И. Вавилова, мы предприняли ещё в 1939 г.

Сначала мы попытались обнаружить натрий по поглощению. Для этого спектр лампы накаливания фотографировался с расстояния 4,5 км.

Один раз — это было на берегу Чёрного моря около Симеиза — мы заметили на фоне сплошного спектра лампы линию поглощения, по положению совпадающую с D -линией (нашим светосильным спектрографом, из-за малой его дисперсии, мы не могли разделить жёлтый дублет). Но ряд других аналогичных съёмок ни разу не дал нам повторения указанного результата. Ясно было, что если натрий и содержится в нижних слоях воздуха, то в настолько малых количествах, что обнаружить его по поглощению на пути 4,5 км крайне трудно.

Однако можно пытаться обнаружить малые количества натрия не по поглощению, а по его флюоресценции. Долгое время и эти попытки оставались безрезультатными. Но в 1947 г. удалось, наконец, получить уверенный результат. Теперь ясно, что в наших прежних опытах нехватало яркости возбуждающего пучка. Натровая лампа достаточной мощности неизбежно имеет большие размеры светящегося объёма. Для получения направленного пучка нужна длиннофокусная оптика. Если при этом диаметр оптики (линзы или зеркала) невелик, то используется ничтожная доля излучаемого лампой света. Лишь в 1945 — 1946 гг., когда развернулись работы Геофизического института Академии Наук СССР по прожекторному зондированию атмосферы, в обиход наших исследований вошла оптика максимально больших габаритов. Флюоресценция паров натрия в приземном воздухе была нами обнаружена после того, как для возбуждения флюоресценции был использован пучок, создаваемый параболическим зеркалом 150 см в поперечнике, в фокусе которого установлена натровая лампа большой мощности.

Нашими опытами теперь доказано частое присутствие паров натрия не только в приземном воздухе, но и в воздухе до высоты 800 — 1000 м над землей. Опыты по выявлению натрия в ещё более высоких слоях продолжают. Суть опытов кратко заключается в следующем.

При освещении воздуха монохроматическим светом $\lambda = 5890 - 96 \text{ \AA}$ (жёлтый дублет натрия) и при фотографировании освещённого объёма сбоку, в спектре будет получен жёлтый дублет и при отсутствии паров натрия: просто вследствие рассеяния. Но нами обнаружен избыток яркости по сравнению с той, которая может быть создана одним рассеянием. Находить эту последнюю теоретически — невозможно, поскольку рассеивающая способность приземного воздуха подвержена быстрым и большим колебаниям. Мы определяем её каждый раз путём измерений, для чего воздух одновременно освещается светом ртутной линии $\lambda = 5769 - 90 \text{ \AA}$. Если яркость D -линий натрия B_1 обусловлена только рассеянием в воздухе, то яркость B_2 линий 5769 — 90 \AA должна быть связана с B_1 соотношением: $\frac{B_1}{B_2} = \left(\frac{5780}{5892}\right)^n$, где n , вообще говоря, может изменяться от нуля (нейтральное рассеяние крупными пылинками и каплями в воздухе) до 4 (релеевское рассеяние чистым воздухом). Таким образом, B_1

всегда должно быть меньше B_2 , если нет других источников яркости B_1 и B_2 , кроме рассеяния по закону $\frac{1}{\lambda^n}$.

Измерения И. М. Михайлина и автора показали, что в некоторые дни B_1 заметно превосходит B_2 . Этот избыток яркости B_1 , достигающий иногда 50 — 100% и больше, прямо указывает на присутствие в воздухе вещества, которое флюоресцирует при освещении его светом $\lambda = 5890 - 96 \text{ \AA}$.

При наблюдении под углом 90° к возбуждающему пучку рассеянный свет сильно поляризован (до 90%). Что же касается резонансной флюоресценции паров натрия, то она, как известно, поляризована незначительно (менее 10%). Это даёт хороший добавочный способ отличить флюоресценцию от рассеянного света. Предварительные опыты показали, что чем больше B_1 по отношению к B_2 , тем меньше степень поляризации при освещении воздуха светом натрия. В некоторые дни (вернее, ночи) поляризация падает с 90% до 10%.

Это новое для атмосферной оптики явление — искусственно возбуждаемая флюоресценция воздуха в свободной атмосфере — открывает возможность проведения большой программы новых исследований атмосферных процессов оптическими методами. В частности, можно пытаться исследовать распределение натрия по высоте не только в тропосфере, но и в стратосфере и тем самым решить вопрос о происхождении натрия в слое 60 — 80 км. Соответствующие опыты осуществляются в настоящее время.

ПРИРОДА СВЕТИМОСТИ НОЧНОГО НЕБА

Что заставляет воздух на высоте 120 — 250 км непрерывно излучать свет? Этот вопрос до сих пор остаётся открытым, хотя нет недостатка в предположениях на этот счёт. Существуют три разных взгляда на природу свечения: фотохимическая теория, гипотеза возбуждения солнечными корпускулярными потоками и гипотеза оптического возбуждения.

Согласно фотохимической гипотезе, источником энергии для непрерывного излучения света атмосферой служит энергия диссоциации молекул кислорода и, быть может, азота. Выше 100 км кислород практически нацело диссоциирован. Диссоциация происходит днём в результате поглощения солнечной радиации: $O_2 + h\nu = O + O$. Диссоциирующим действием обладает радиация с длиной волны $\lambda \leq 1750 \text{ \AA}$. Днём и ночью происходит рекомбинация, которая может иметь место лишь при тройных ударах: $O + O + M = O_2 + M^*$, где M означает какую-нибудь третью частицу, обеспечивающую выполнение законов сохранения. Энергия диссоциации 5,1 эл.-в. частично передаётся третьей частице, переходящей в возбуждённое состояние: $M \rightarrow M^*$. Затем возбуждённая частица M^* спонтанно высвечивается.

Могут рекомбинировать атомы азота $N + N + M = N_2 + M^*$, а также ионы $N + N^+ + M = N_2^+ + M^*$ или $N_2 + O = N_2^* + O^*$ и т. д.

Последняя реакция сопровождается выделением большой энергии порядка 12,5—13,4 э.в., достаточной для возбуждения всех наблюдаемых в спектрах светимости ночного неба полос N_2 и линий O.

Фотохимическая теория просто и ясно объясняет источники происхождения энергии светимости ночного неба. Вряд ли можно сомневаться в том, что свечение атмосферы, возбуждаемое указанным способом, постоянно имеет место, притом не только ночью, но и днём. Было бы очень интересно обнаружить и исследовать это дневное свечение, но попытки такого рода пока остаются безрезультатными: слишком велика днём яркость сплошного спектра рассеянного атмосферой солнечного света.

Но одним лишь фотохимическим механизмом невозможно, повидимому, объяснить все свойства светимости ночного неба.

За последние годы накапливается всё больше фактов, свидетельствующих о постоянном наличии нерегулярных и кратковременных вспышек яркости ночного неба в отдельных, произвольно выбранных его участках. Это уже наводит на мысль о свечении типа полярных сияний. Вспышки наблюдаются на разных широтах, вплоть до близких к экватору. Нет оснований отрицать возможность постоянного воздействия корпускулярных солнечных потоков на верхние слои атмосферы на всех широтах. Свечение типа полярных сияний, в известном смысле, может и не быть привилегией только полярных районов. Следует принять во внимание мощность сияний. Яркие сияния наблюдаются, как правило, именно в полярных областях и редко на средних широтах. Но не может ли быть так, что слабые сияния происходят всё время, а не только в период значительных извержений на Солнце, сопровождаемых такими пертурбациями на нашей планете, как магнитные бури, нарушение радиосвязи и т. д.? И не может ли быть и так, что эти постоянные и слабые, в отличие от эпизодических и сильных, воздействия потоков солнечных корпускул на нашу атмосферу обладают лишь небольшим широтным эффектом и охватывают почти одинаково весь земной шар, а не только его полярные и около-полярные области? Нужно считаться с тем, насколько возможно обнаружить слабые полярные сияния. Дело в том, что контрастная чувствительность глаза в ночных условиях резко падает. Если бы ночное небо имело одинаковую яркость во всех своих точках, то ночью «на глаз» можно было бы измерить только те сияния, яркость которых превосходит яркость ночного неба по крайней мере на 10—20%. Но ночное небо—весьма неоднородный фон: обнаружению слабых светлых пятен мешают яркие звёзды, звёздные скопления, туманности, темные пятна и т. д. Чтобы на таком «пёстром» фоне можно было заметить отдельное светлое пятно (полярное сияние), его яркость должна отличаться от яркости фона неба на 40—60%, если угловые размеры пятна и продолжительность свечения достаточно большие.

Но наблюдение в ещё большей степени затрудняется и усложняется, если мы имеем дело с множеством кратковременных вспышек, каждая из которых в отдельности занимает небольшую площадь на небе. Если суммарно все такие вспышки полярных сияний создавали бы 30 — 40% общей яркости неба (а это уже есть почти вся яркость светимости ночного неба!), то мы их не обнаружим «на-глаз». Их можно было бы обнаружить не визуально, а фотоэлектрически, поскольку в ночных условиях «контрастная чувствительность» фотоэлемента может быть сделана на целый порядок больше, чем у глаза.

И действительно, нечто в этом роде можно наблюдать с помощью простых средств: чувствительный фотоэлемент, на который спроектировано изображение отдельного участка неба, часто показывает быстрые изменения яркости, амплитуда которых возрастает по мере уменьшения угловых размеров визируемого участка. Очень важно, что интенсивность этих флуктуаций яркости меняется от ночи к ночи. Иногда (редко) ночи бывают «спокойными», флуктуации незаметны. Изучение подобных флуктуаций интересно не только для выяснения природы светимости ночного неба, но и для дальнейшего исследования механизма воздействия корпускулярного и ультрафиолетового излучения Солнца на верхние слои земной атмосферы (проблема «Земля—Солнце»).

Из сопоставления указанных выше фактов с данными о свойствах ионосферы (например, быстро перемещающиеся ионные «облака») и с возможными соображениями о способах воздействия солнечного излучения на ионосферные слои, в которых возникает светимость ночного неба, можно принять некоторую рабочую гипотезу, помогающую лучше представить себе программу ряда дальнейших исследований. Кратко говоря, эта программа посвящена выяснению существования постоянных слабых полярных сияний на всех широтах. Представим себе киносъёмку ночного неба сквозь узкие светофильтры, пропускающие $\lambda\lambda = 5577, 5892$ и 6300 \AA : это длины волн основных эмиссионных линий ночного неба земного происхождения. Возможно, что на фильмах было бы обнаружено наличие пульсирующих и быстро меняющих своё место на небе сияний. Зелёная и другие линии ночного неба, возможно, вовсе не излучаются равномерно всем небом, но возникают преимущественно из отдельных непостоянных зон неба. Здесь уместно вспомнить о дискуссии по поводу атомного азота в верхних слоях атмосферы, изложенной недавно на страницах «Успехов физических наук»⁹. Азотные линии 5200 и 3466 \AA присутствуют, как это было показано несколько лет тому назад, в спектрах полярных сияний, причём линия 5200 \AA обнаруживается в ярких полярных сияниях умеренных широт в периоды сильных солнечных извержений. Большая подверженность азота солнечным воздействиям может быть обусловлена и вероятным более высоким (на 100 км по порядку величины) расположением области диссоциации азота над областью диссоциации кислорода: большая часть солнечной (корпускулярной и

коротковолновой ультрафиолетовой) радиации поглощается в более высоких атмосферных слоях. Если инфракрасная линия азота 10400 \AA действительно присутствует в спектре ночного неба, то весьма возможно, что именно она больше других может помочь обнаружить постоянные слабые полярные сияния на всех широтах, и её интенсивность может оказаться особенно флукутуирующей.

Указанная «киносъёмка» ночного неба неосуществима, если её понимать в буквальном смысле: чувствительность фотоматериалов меньше необходимой более чем на 3 порядка. Даже если рассматриваемые полярные сияния могут быть фиксированы снимками с необходимой большой экспозицией, то фотометрическая интерпретация снимков связана с громадной работой из-за «пестроты» фона ночного неба. В осуществлении указанной программы необходимо широко использовать малоинерционные фотоэлектрические приборы и применять другие современные методы, обладающие высокой чувствительностью к свету.

Если существуют «полярные» сияния указанного типа, то свечение ночного неба, возможно, представляет собой рекомбинационное свечение (фотохимический механизм), постоянно возмущаемое вспышками слабых полярных сияний.

ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ НЕБА

В 1938—1939 гг. было установлено, что некоторые эмиссионные линии светимости ночного неба частично поляризованы (степень поляризации порядка 10%), причём имеет место поворот плоскости поляризации, соответствующий движению Солнца под горизонтом^{10, 11}, что наводит на мысль о чисто оптическом возбуждении свечения. Каким может быть механизм этого возбуждения? Общая идея была высказана академиком С. И. Вавиловым ещё в 1935 г.: это сильное загибание (рефракция) лучей той длины волны, для которой показатель преломления воздуха имеет избирательно большую величину вследствие аномальной дисперсии. Рефракция таких лучей могла бы, вообще говоря, достигать 20° — 30° . В этом случае лучи могут освещать верхние слои атмосферы даже ночью, когда Солнце опустилось под горизонт на 20° — 30° .

Подобный эффект может быть заметным вблизи резонансных линий. Но таковые есть в спектре ночного неба и даже в относительно большом количестве: 2 линии из общего числа трех постоянно наблюдаемых. Это кислородная линия 6300 \AA и натриевая линия 5892 \AA . Они имеют указанные выше поляризационные свойства.

Замечательно, что в дальнейшем обе эти линии были обнаружены в спектрах сумеречного неба, причём оптическое их возбуждение прямым солнечным светом в этом случае вряд ли может подвергаться сомнению. Более того, уже в 1939 г. для одной из этих двух линий (для 6300 \AA) было показано, что объяснить своеобразную зави-

симось яркости линии от угла погружения Солнца под горизонт удаётся только в предположении о механизме, связанном с избирательной рефракцией в области аномальной дисперсии¹⁴. За последнее время Эльви и Фарнсворт в США выполнили тщательные измерения ночного хода яркости этой линии 6300 Å. Ход яркости весьма своеобразен и указанные авторы считают его загадочным. Коротко говоря, «загадочность» состоит в том, что яркость линии, обнаруживая отчётливый минимум в полночь (что естественно), к утру сильно возрастает, причём значительное возрастание яркости имеет место задолго (за 1 час и более) до момента астрономических сумерек.

С точки зрения теории оптического возбуждения в результате избирательной рефракции такой ночной ход получает естественную не только качественную, но и количественную интерпретацию. В общих чертах, дело заключается в следующем.

Можно предполагать, что основная доля излучения линии 6300 Å атомного кислорода должна возникать указанным способом в тонком атмосферном слое на высоте 110 — 130 км. Все известные данные сходятся на том, что ниже уровня 100 — 110 км кислород почти не диссоциирован, а выше — диссоциирован практически полностью. Таким образом избирательная рефракция солнечных лучей с длиной волны близкой к 6300 Å, вызываемая присутствием в воздухе атомного кислорода, не может иметь места ниже уровня 100 — 110 км. Но показатель преломления кислорода зависит от плотности, которая быстро убывает с высотой (в 5—10 раз на каждые 20 км). Таким образом достаточно сильная избирательная рефракция может иметь место лишь для лучей, распространяющихся не выше 20—30 км над уровнем 100—110 км. Поэтому в первом приближении можно полагать, что существует достаточно тонкий «эффективный» слой рефракции (рис. 1), в котором и возникает свечение. В этом случае легко рассчитать суточный ход яркости линии 6300 Å.

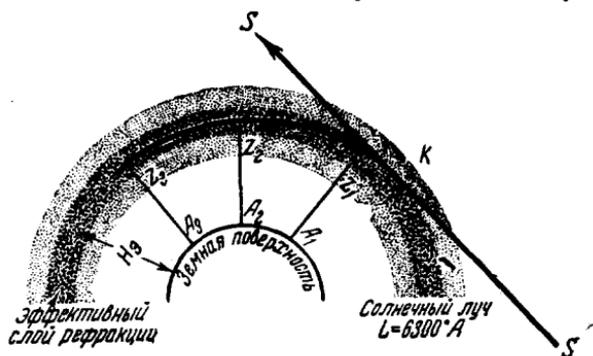


Рис. 1. Схема оптического возбуждения красной кислородной линии ночью и в сумерках (избирательная рефракция).

Если измерения производятся наблюдателем A_1 в какой-либо точке неба, например в зените Z_1 , то увеличение угла погружения Солнца под горизонт наблюдателя A_1 эквивалентно тому, что сам наблюдатель постепенно перемещается по земной поверхности последовательно

в точки A_2, A_3, \dots . Легко видеть, что для положения наблюдателя в любой из точек A_1, A_2, A_3, \dots путь солнечных лучей до «эффективного» слоя, т. е. путь на отрезке Sk , остаётся неизменным, но путь внутри «эффективного» слоя меняется: изменяется длина отрезков пути kZ_1, kZ_2, kZ_3, \dots . Длина этих отрезков, представляющих собой дуги одной и той же окружности с центром в центре Земли, пропорциональна углу погружения Солнца под горизонт; точнее говоря, длина любого такого отрезка kZ_i линейно связана с углом погружения Солнца под горизонт φ_i : $kZ_i = m + n\varphi_i$, где m и n — постоянные числа.

Если бы свечение возникало только в указанном «эффективном» слое, то теоретическое вычисление ожидаемого хода яркости красной кислородной линии было бы крайне простым: логарифм яркости должен изменяться линейно с увеличением угла погружения Солнца под горизонт φ . Действительно, в этом случае убывание яркости красной линии по мере увеличения угла вызывалось бы только увеличением поглощения возбуждающих солнечных лучей на пути в «эффективном» слое, но поглощение возрастает с увеличением пути kZ по показательному закону. Таким образом, отложив по оси абсцисс величину углов погружения Солнца под горизонт для различных моментов наблюдения, а по оси ординат $\lg \frac{1}{B}$, где B — яркость линии 6300 \AA , мы получили бы прямую линию. Наклон этой прямой дал бы величину коэффициента поглощения радиации $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ в «эффективном» кислородном слое.

В действительности же геометрическая картина возбуждения свечения должна быть несколько сложнее. В самом деле, свечение должно возникать не только в эффективном слое, но и под ним и над ним. Кроме того, в возбуждении свечения участвуют солнечные лучи, более преломляющиеся и менее преломляющиеся, чем те, для которых рефракция даёт радиус кривизны траектории, точно равный $R + H_0$ (R — радиус Земли). Достаточно незначительного перемещения по шкале длин волн λ в области аномальной дисперсии, чтобы получить заметное изменение показателя преломления n , поскольку в этой области кривая дисперсии $n = f(\lambda)$ имеет крутой ход. Лучи, сильнее преломляющиеся, будут оказывать малое влияние, так как они очень ослаблены поглощением в атмосфере (для них велик коэффициент поглощения) и, главное, они быстро уйдут под эффективный слой, где нет атомного кислорода. Лучи менее преломляющиеся находятся, наоборот, в более выгодном положении в отношении поглощения, поэтому их необходимо принять во внимание. Для вычисления их доли в общем свечении упростим задачу, предположив, что их преломляемость мало отличается от преломляемости «обычных лучей», т. е. не испытывающих влияния аномальной дисперсии. В этом случае такие лучи могут освещать только те слои атмосферы, которые лежат над тенью Земли. Если бы красная линия возбуждалась только такими лучами, то

её яркость B в любой момент сумерек определялась бы выражением

$$B = C \int_{H_m}^{\infty} I(H) \rho(H) dH, \quad (1)$$

где $\rho(H)$ —плотность атомного кислорода на высоте H , $I(H)$ —интенсивность солнечных лучей 6300 \AA , освещающих атмосферный слой на высоте H , C —яркость свечения слоя атомного кислорода единичной толщины и единичной плотности, освещаемого лучами 6300 \AA единичной интенсивности, H_m —высота тени Земли.

Если бы мы не принимали во внимание явлений, связанных с селективной рефракцией солнечных лучей, то интенсивность B , определяемая интегралом (1), изменялась бы при изменении H_m примерно пропорционально давлению атомного кислорода, т. е. яркость красной линии, а следовательно и её убывание по мере увеличения высоты тени Земли, определялись бы только законом убывания плотности с высотой. В действительности убывание яркости происходило бы по мере опускания Солнца даже ещё быстрее из-за прогрессивно нарастающего поглощения солнечных лучей в атмосфере (влияние функции $I(H)$). Но подсчет показывает ¹⁴, что на самом деле яркость красной линии во время сумерек убывает гораздо медленнее, чем это соответствует скорости убывания плотности воздуха с высотой.

По мере опускания Солнца под горизонт во всё возрастающей степени сказывается влияние добавочной яркости красной линии другого происхождения. Таким образом, мы получаем следующую общую картину явления:

1. В начале сумерек, когда $H_m \leq H_0$, яркость красной линии практически целиком определяется возбуждением резонансной флуоресценции кислорода «обычными» солнечными лучами, т. е. не испытывающими «селективной» рефракции из-за аномальной дисперсии. Яркость красной линии, возбуждаемой такими лучами, обозначим B_0 .

2. При $H_m > H_0$ заметное участие в возбуждении свечения начинают принимать солнечные лучи, идущие вдоль «эффективного» слоя рефракции (испытывшие «избирательную» рефракцию). Долю яркости красной линии, обусловленную действием этих лучей, обозначим B_a .

3. По мере увеличения H_m (т. е. угла погружения Солнца под горизонт φ) доля B_a в общем свечении $B_0 + B_a$ увеличивается, а доля B_0 уменьшается, так как B_0 убывает по мере увеличения φ быстрее, чем B_a . При больших φ яркость красной линии должна почти целиком определяться долей B_a .

Из сказанного следует, что, откладывая по оси абсцисс угол φ , а по оси ординат $\lg B$, где B —измеренная яркость красной линии,

мы должны получить не прямую, но линию которая при малых φ должна более круто идти вниз; при больших φ она должна приближаться к прямой, поскольку, как мы показали, $\lg B_a$ должен быть линейной функцией φ . Указанный график должен тем меньше отличаться от прямолинейного, чем больше доля R_a в суммарной яркости $B = B_0 + B_a$.

Мы обработали таким способом все опубликованные измерения, а именно: кривую, опубликованную в 1939 г. Кабанном и Гарригом¹⁵, и кривые, опубликованные Эльви и Фарнсвортом в 1942 г.¹⁶. Последняя кривая—осреднённая из многих кривых, измеренных этими

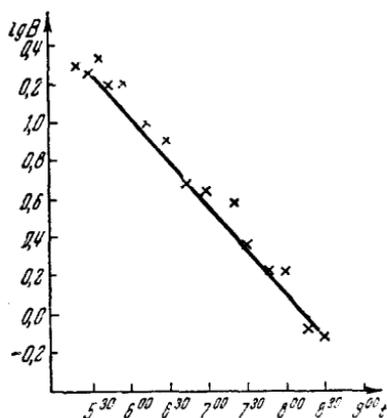


Рис. 2. Сопоставление данных Кабанна и Гаррига (крестики) с теорией избирательной рефракции (прямая).

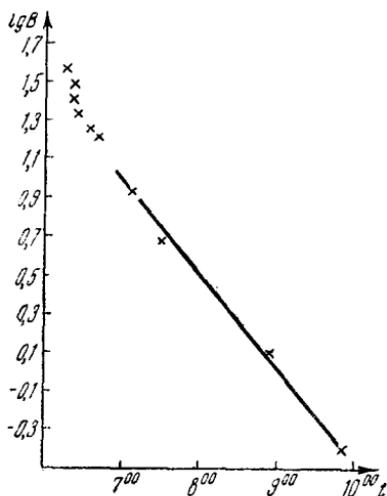


Рис. 3. Сопоставление данных Эльви и Фарнсворта (вечерние сумерки и начало ночи) с теорией избирательной рефракции.

авторами. Кроме того, эта кривая по существу содержит две кривые: для утренних и вечерних сумерек отдельно.

Во всех трёх случаях кривые к полуночи «стабилизируются», асимптотически приближаясь к некоторому постоянному значению. Вероятнее всего, что большая часть этой полуночной яркости соответствует другому механизму возбуждения свечения, а именно тому, который указывается фотохимической теорией светимости ночного неба. Поэтому мы вычитали эту долю яркости (которая, впрочем, является малой) из всех значений яркости для различных моментов сумерек и ночи.

В указанных работах Кабанна, Гаррига, Эльви и Фарнсворта не указаны зенитные расстояния Солнца для отдельных измеренных

интенсивностей, но эти последние даны в функции времени. Не имея данных об углах, мы откладывали поэтому $\lg B$ в зависимости от времени, а не от углов. Это, конечно, несколько искажает ход кривых, но незначительно.

Пересчитанные таким образом кривые представлены на рис. 2—4. Во всех случаях кривые имеют вид, предсказанный изложенной выше теорией.

Как указывалось, из наклона прямой (т. е. из производной $d \lg B/dt$) можно определить коэффициент поглощения солнечных лучей $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ атомным кислородом в «эффективном» слое.

Найденные из наклона прямых на рис. 2—4 абсолютные значения коэффициента поглощения атомного кислорода для линии 6300 \AA хорошо согласуются по порядку величины с теоретическими значениями коэффициента поглощения. На подробностях мы здесь не останавливаемся.

Изложенная теория нуждается в дальнейшей проверке и уточнениях. Но приведенные выше факты вместе с обнаруженными свойствами светимости ночного неба в ультрафиолетовой части спектра¹³, на которых мы здесь для краткости не останавливаемся, по совокупности заставляют считать, что оптическое возбуждение, наряду с фотохимическим и электронным, участвует в создании светимости ночного неба.

Для уточнения оптического механизма возбуждения было бы интересным исследовать поляризацию красной кислородной и желтой натриевой линий во время сумерек и проследить состояние поляризации непрерывно до ночи и в течение ночи. Из-за сильных помех, создаваемых ярким рассеянным светом сумеречного неба, такое исследование оказывается весьма трудным, но осуществить его можно.

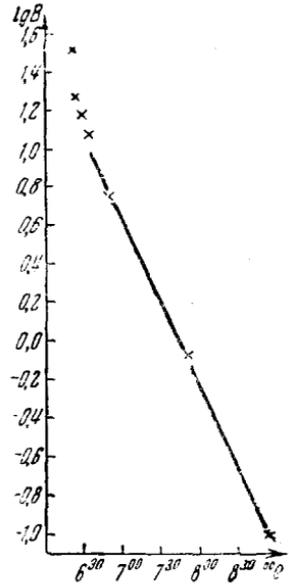


Рис. 4. Сопоставление данных Эльви и Фарнворта (конец ночи и утренние сумерки) с теорией избирательной рефракции.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Хвостиков, Свечение ночного неба. Издание 2-е. Академия наук СССР (1948).
2. S. Newcomb, A rude attempt to determine the total light of all the stars. *Astrophys. Journ.*, **14**, 297—312 (1901).
3. Intema. On the brightness of the sky and total amount of starlight. *Publications of the Astronomical Observatory at Groningen*, N 22 (1909).

4. 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).
 5. В. Г. Фесенков. Метеорная материя в межпланетном пространстве. Изд. Академии Наук СССР (1947).
 6. H. Garrigue, Nouveaux résultats sur la lumière du ciel nocturne. *Comptes Rendus*, **202**, 1807 — 1809 (1936).
 7. В. И. Черняев и М. Ф. Вукс, Спектр неба в сумерки. ДАН СССР, **14**, 77 — 79 (1937).
 8. И. А. Хвостиков, Натрий в стратосфере. УФН, **30**, вып. 3 — 4, 184 — 244 (1946).
 9. И. А. Хвостиков, Инфракрасное излучение ночного неба и вопрос о диссоциации азота в ионосфере. УФН, **33**, вып. 4, 570 — 600 (1947).
 10. И. А. Хвостиков, Поляризация зеленой линии свечения ночного неба. ДАН СССР, **21**, № 7, 326 — 329 (1938).
 11. И. А. Хвостиков, Поляризация эмиссионных линий в спектре свечения ночного неба. ДАН СССР, **27**, № 9, 217 — 220 (1940).
 12. В. Л. Гинзбург, О поляризации линий в спектре свечения ночного неба и в спектре полярных сияний. ДАН СССР, **38**, № 8, 226 — 269 (1943).
 13. И. А. Хвостиков и А. А. Шубин, Поляризация свечения ночного неба в ультрафиолетовой части спектра. ДАН СССР, **27**, № 3, 221 — 223 (1940).
 14. И. А. Хвостиков, Сумеречная фотолюминесценция земной атмосферы. Известия АН СССР, сер. географ. и геофизическая, стр. 175 — 182 (1939).
 15. J. Sabannes et H. Garrigue, Un phénomène de photoluminescence dans la haute atmosphère: l'excitation par la lumière solaire de la raie 6300 Å de l'oxygène, *Comptes Rendus*, **203**, 484 — 487 (1936).
 16. C. T. Elvey and A. H. Farnsworth, Spectrophotometric observations of the light of the night sky, *Astrophys. Journ.*, **96**, № 3, 451 — 467 (1942).
-