

НАТРИЙ В СТРАТОСФЕРЕ

И. А. Хвостиков

Введение.— Жёлтая линия в спектре ночного неба.— Дублет натрия в спектре сумеречного неба.— Интерференционные измерения.— Некоторые замечания о наблюдении флюоресценции неба в сумеречных условиях и о приоритете открытий в этой области.— Определение высоты и протяжённости натриевого слоя.— О механизме возбуждения свечения натрия в стратосфере.— Откуда берётся натрий в высоких слоях атмосферы?— Абсолютные измерения яркости жёлтой линии.— Определение количества натрия в атмосфере.— Ширина *D*-линий излучения неба и вопрос о природе свечения.— Измерения поглощения *D*-линий неба парами натрия.— Сезонный ход яркости жёлтой линии.— О строении высоких слоёв атмосферы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Уже тридцать лет продолжается изучение замечательного явления природы, получившего название свечения ночного неба. Это явление состоит в следующем. Тщательные измерения яркости ночного неба показали, что только $\frac{1}{4}$ — $\frac{1}{3}$ часть всего света, посылаемого нам ночным небом, принадлежит звёздам и туманностям. Ночное небо посылает нам «слишком много» света. Откуда берётся этот избыток свечения?

Работами Ньюкома¹, Интэма², Слайфера³ и др. было установлено, что излучает сама земная атмосфера. Верхние слои атмосферы постоянно светятся, испуская ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные лучи. Спектр этого свечения линейчатый, он содержит линии водорода, азота и других составных частей воздуха. Свечение ночного неба обнаруживается всегда и всюду: в любой точке неба, в любой момент ночи, в любом географическом пункте.

Систематическое изучение спектров свечения ночного неба в двадцатых и тридцатых годах дало результаты фундаментального значения для геофизики. Была опровергнута общепризнанная до того теория состава воздуха на больших высотах, согласно которой верхняя часть атмосферы должна состоять преимущественно из лёгких газов, из водорода и гелия. Было установлено, что в спектрах ночного неба линии водорода и гелия отсутствуют. Было показано, что высокие слои атмосферы состоят в основном из азота и кислорода, как и нижние.

Эти данные легли в основу существующего ныне предположения, что атмосфера является «перемешанной» на всех высотах, что воз-

можно лишь при наличии мощных вертикальных движений в стратосфере; прежде считалось, что такие движения не могут иметь места, да и сейчас этот вопрос, имеющий кардинальное значение для физики атмосферы, остаётся неясным и спорным. Было показано, кроме того, наличие и даже преобладание в верхних слоях атмосферы кислорода не в молекулярном состоянии, как в нижних слоях, а в атомном, диссоциированном. Вслед за тем в спектрах были обнаружены линии ионизированных газов. Эти результаты явились отправной точкой для современных теорий диссоциации и ионизации верхних слоёв атмосферы, столь важных для учения о ионосфере, для проблемы «Земля — Солнце» и т. п.

Расшифровка спектров свечения ночного неба не всегда была простым делом. Приходилось преодолевать не только технические трудности, возникающие вследствие чрезвычайно малой интенсивности этого излучения, но часто встречались принципиальные трудности, как, например, при расшифровке зелёной линии $\lambda = 5577 \text{ \AA}$. В этом случае понадобилось 10 лет напряжённой работы физиков и астрономов в разных странах, чтобы, в конце концов, выяснить, что эта линия принадлежит атомному кислороду. При исследовании подобных вопросов возникали и решались важные и интересные задачи, изложение которых можно найти в другом месте⁴.

Изучение свечения ночного неба далеко не закончено. Открытым ещё остаётся основной вопрос — о механизме возбуждения люминесценции газов в верхних слоях атмосферы. Днём ультрафиолетовая радиация Солнца производит диссоциацию верхних слоёв; ночью при рекомбинации диссоциированных частиц могут возникать, в результате тройных ударов; возбуждённые частицы. Не являются ли источником энергии ночного излучения атмосферы подобные фотохимические процессы? Или, может быть, это свечение возбуждается непосредственно ночью путём электронного удара при воздействии на атмосферу корпускулярного излучения Солнца? Не являются ли источником энергии излучения ночного неба ядерные реакции, происходящие в верхних слоях атмосферы под действием космических лучей? Существует ли непосредственно оптическое возбуждение свечения неба солнечными лучами ночью? Не является ли, наконец, люминесценция неба свечением такого типа, как в газовом электрическом разряде? В последнем случае пришлось бы допустить существование соответствующих электрических токов в ионосфере.

Подобные вопросы с большей или меньшей полнотой рассмотрены в многочисленных работах, однако, до сих пор не получено убедительного ответа⁵. Самые последние годы, в течение которых не прекращалось изучение свечения ночного неба, принесли новые открытия и поставили ряд новых задач. К числу самых интересных из них, бесспорно, следует отнести обнаружение в верхних слоях атмосферы паров натрия. Этот вопрос уже в течение ряда лет привлекает к себе внимание физиков, астрономов и геофизиков, поскольку он затра-

поставляет многие важные проблемы физики высоких слоёв атмосферы. В настоящей статье делается попытка дать систематическое изложение полученных результатов и тех вопросов, которые ещё ждут своего разрешения.

2. ЖЁЛТАЯ ЛИНИЯ В СПЕКТРЕ НОЧНОГО НЕБА

Слайфер, который открыл в 1919 г. зелёную линию в спектрах свечения ночного неба³, через 10 лет, в 1929 г., сделал ещё одно открытие⁶, большое значение которого стало ясным только 8—10 лет спустя. Он обнаружил в спектрах свечения ночного неба жёлтую линию с длиной волны 5892 Å.

Ошибка в определении длины волны линий в жёлтой и красной части спектров свечения ночного неба обычно весьма велика, порядка нескольких Å. Это объясняется необходимостью пользоваться для фотографирования спектров, из-за малой интенсивности свечения ночного неба, очень светосильными спектрографами с весьма короткофокусными объективами камеры, а поэтому с крайне малой линейной дисперсией. Если бы мы попробовали фотографировать спектр ночного неба таким спектрографом, как, например, самая светосильная модель спектрографа Цейсса для Раман-эффекта ($F:2$), то потребовалась бы экспозиция 30—50 часов, чтобы получить в спектре только несколько самых ярких линий.

Построенные за последнее время специальные, особо светосильные спектрографы, как, например, спектрографы Государственного оптического института в Ленинграде со светосилой $F:0,58$ или спектрограф Парижского института оптики со светосилой $F:0,7$, позволяют сократить экспозицию до 1—2 часов. Однако, линейная дисперсия таких спектрографов составляет в жёлтой части от 500 до 1500 Å на 1 мм. Понятно, что в подобных условиях точное определение длины волны становится крайне трудным, несмотря на то, что техника обработки таких мелкомасштабных спектров с течением времени достигла большого совершенства.

Открытая Слайфером жёлтая линия вызвала живейший интерес по той причине, что каждая новая линия в спектрах свечения ночного неба — это важный шаг к познанию химического состава и физического состояния высоких слоёв атмосферы, а кроме того ещё и потому, что линии с такой длиной волны никогда не обнаруживались в хорошо изученных спектрах полярных сияний. Измерение длины волны жёлтой линии было многократно повторено разными авторами в различных географических пунктах.

В 1932 г. Дюфэ^{7,8} нашёл для новой жёлтой линии длину волны $\lambda = 5892,5$ Å. В том же году Зоммер⁹ определил $\lambda = 5887$ Å. Такое же почти значение $\lambda = 5888$ Å нашёл в 1934 г. Кабанн¹⁰ на обсерватории Пик дю Миди во Франции, а в 1934—1935 гг. Вегард и Тонсберг^{11,12} в Норвегии нашли с начала $\lambda = 5885$ Å, а позже $\lambda = 5892,6$ Å.

В 1938 г. Кабани и Дюфэ¹³ нашли $\lambda = 5894 \text{ \AA}$; на рис. 1 воспроизведена их спектрограмма свечения ночного неба. После сказанного выше о малой дисперсии применяемых спектрографов не приходится удивляться столь значительным расхождениям в определении длины волны жёлтой линии, но понятно, что при такой неопределённости вопрос об отождествлении линии может решаться лишь предположительно.

В 1935 г. Вегардом и Тонсбергом были получены первые указания на некоторые особенности структуры жёлтой линии: из анализа спектрограмм они заключили, что ширина линии значительно больше, чем это имеет место у простых атомных линий, и что, возможно, эта линия имеет тонкое строение¹². Позже Кабани и Дюфэ пришли к такому же выводу¹³.

В 1937 г. вопрос о жёлтой линии получил достаточно определённую в том отношении, что было доказано атмосферное происхождение нового свечения. Этот результат был получен Гарригом, который, фотографируя спектр свечения ночного неба одновременно в зените и у горизонта, показал, что жёлтая линия у горизонта в 2—3 раза интенсивнее, чем в зените¹⁴. Такой результат показывает, конечно, что излучение возникает не за пределами земной атмосферы: источником излучения служит сама атмосфера.

Но что за вещество излучает жёлтую линию $\lambda = 5890 \text{ \AA}$?

В течение ряда лет этот вопрос оставался открытым. Высказывались разные догадки о природе новой жёлтой линии. Как всегда в таких случаях искали близких значений в таблицах длин волн спектров испускания различных веществ, сообразуясь лишь с правдоподобностью предположения о присутствии того или иного вещества в атмосфере. Обращали внимание и на то, что полученные значения длины волны новой линии близки к длинам волн жёлтого дублета натрия (Дюфэ⁸, 1933 г.), но, помимо общей неопределённости таких, ни к чему не обязывающих, сопоставлений, упоминания натрия были особо сдержанными вследствие того, что присутствие паров натрия в качестве постоянной составной части атмосферы никогда прежде ничем себя не обнаруживало; предположение о натрии, имея тогда

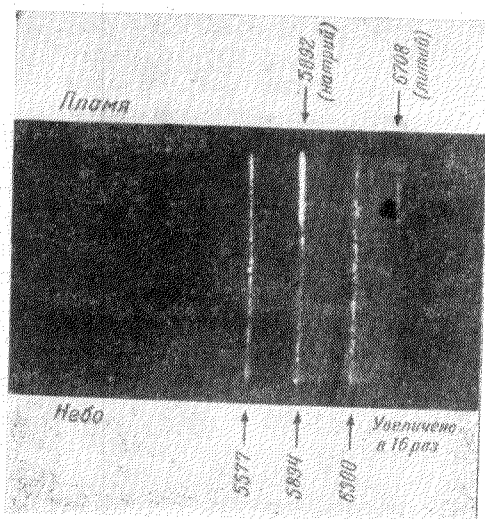


Рис. 1. Жёлтая линия $\lambda = 5894 \text{ \AA}$ в спектре свечения ночного неба (Кабани и Дюфэ, 1938 г.).

слишком малое экспериментальное обоснование, неизбежно казалось чрезмерно далеко идущим. Гораздо смелее писали о парах воды в высоких слоях атмосферы, как о возможном источнике нового атмосферного излучения⁹. Действительно, в спектрах водяного пара мы находим близкие значения длин волн, а, с другой стороны, присутствие паров воды в воздухе может иметь место даже до сравнительно больших высот.

Следует отметить, впрочем, что если очень большая высота, которую приходилось неявно допускать в этом случае для влагосодержащих слоёв атмосферы, создавала известные теоретические затруднения, то, с другой стороны, она же увеличивала интерес к задаче. Дело в том, что хотя в то время (да в большой степени ещё и до сих пор) не была сколько-нибудь уверенно определена высота тех атмосферных слоёв, излучение которых создаёт свечение ночного неба, то всё же многие косвенные данные свидетельствовали о том, что эта высота очень большая, более 100 км. Но прежде считалось, что водяной пар отсутствует на таких больших высотах, так как он, беря своё начало на водной поверхности земного шара, легко, благодаря турбулентному перемешиванию воздуха, распространяется до верхних пределов тропосферы, далее пробивается, хотя и с трудом, сквозь тропопаузу*), проникая в нижние слои стратосферы, но в более высокие слои атмосферы подняться не может. Если бы анализ спектров ночного неба доказал присутствие водяного пара до высот порядка 100 км, то это, помимо соблазнительной возможности объяснить возникновение загадочных серебристых облаков на высоте 82 км, заставило бы подвергнуть коренному пересмотру существующие мнения о возможности вертикальных потоков воздуха между нижними и верхними слоями стратосферы и между ионосферой и стратосферой.

В таком неопределённом, спекулятивном состоянии находился вопрос до 1937—1938 гг., когда совершенно неожиданно его дальнейшее развитие получило совсем другое направление. Главный результат, определивший все последующие, был получен путём сумеречных наблюдений.

3. ДУБЛЕТ НАТРИЯ В СПЕКТРЕ СУМЕРЕЧНОГО НЕБА

Летом 1936 г. на склонах Эльбруса, на Кавказе, на высоте 3100 м были установлены доставленные сюда из Ленинграда новые светосильные спектрографы для съёмки спектров свечения ночного неба. Исключительная чистота и прозрачность высокогорного воздуха делали этот район весьма подходящим для проведения разнообразных оптических наблюдений, предпринятых по инициативе и под общим руководством

*) Тропопауза — граничный слой воздуха, отделяющий тропосферу от стратосферы. Характеризуется своеобразным температурным режимом, затрудняющим циркуляцию воздуха между тропосферой и стратосферой.

акад. С. И. Вавилова сотрудниками нескольких научно-исследовательских институтов с целью изучения атмосферы оптическими методами.

В августе, участники этих работ М. Ф. Вукс и В. И. Черняев, на спектрографах $F:0,58$ и $F:1$, изготовленных в Гос. оптическом ин-те и позволявших получать спектры весьма высокого качества (расчёт оптической системы спектрографов принадлежит проф. Г. Г. Слюсареву), получили несколько спектров рассеянного света сумеречного неба при различных погружениях солнца под горизонт и на некоторых из них обнаружили, на фоне сплошного спектра и рассеянного света неба, интенсивную линию в жёлтой части спектра. Тщательный промер спектрограмм, выполненный осенью того же года в Гос. оптическом ин-те, показал, что эта жёлтая линия является «той самой» линией, которая уже в течение ряда лет до того обнаруживалась в спектрах свечения ночного неба: её длина волны оказалась равной $\lambda = 5890 \text{ \AA}$.

Полученный результат не мог не показаться удивительным, если принять во внимание условия, при которых линия была сфотографирована. Линия была обнаружена на фоне яркого сплошного спектра сумеречного неба при экспозиции всего лишь 6 минут, в то время как для получения этой же линии в спектрах ночного неба всегда требовалась многочасовая экспозиция. Подсчёт показал, что яркость этой линии в сумеречных условиях примерно в 100 раз превосходит её яркость в ночных условиях. Такое сильное «вспыхивание» жёлтой линии в сумеречных условиях являлось совершенно новым фактом в исследовании этого загадочного излучения земной атмосферы.

На рис. 2 воспроизведена микрофотограмма одного из спектров, полученных М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым: на ней отчётливо видна линия излучения указанной длины волны. Работа М. Ф. Вукса и В. И. Черняева, сообщавшая об указанном открытии, была опубликована¹⁵ в начале 1937 г.

Более чем через год, в 1938 г., появилась заметка французского исследователя Бернара¹⁶, в которой он сообщал такие же результаты. Вскоре, он же сообщил одновременно в нескольких журналах^{18, 19, 20} о своих интерференционных измерениях, показавших, что жёлтая линия неба является дублетом, структура которого указывает на его принадлежность излучению натрия (линии D_1 и D_2 натрия). Совершенно одновременно появились сообщения о том же самом известными французскими физиками и астрономами Кабанна, Дюфэ и Гози^{17, 21}, а затем на страницах «Astrophysical Journal» и «Comptes Rendus» последовал энергичный спор о приоритете между тремя названными авторами с одной

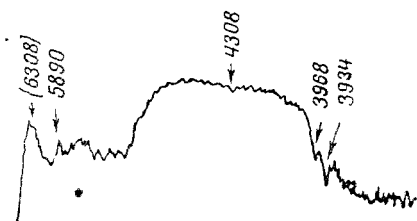


Рис. 2. Регистрограмма спектра сумеречного неба с жёлтой линией $\lambda = 5890 \text{ \AA}$ (В. И. Черняев и М. Ф. Вукс, 1936 г.).

стороны^{17, 21, 24} и Бернардом — с другой^{22, 23}. И тот и другие одновременно произвели (и опубликовали) интерференционные измерения, но ещё до того Бернар наблюдал «вспышку» жёлтой линии в сумеречном свете, считая именно это открытие особенно существенным. Спор между ними продолжался и в 1939 г., а в 1940 г. в эту дискуссию включился ещё Вегард, который заявил свои права на открытие сумеречной вспышки жёлтой линии²⁵. Позже (§ 5) мы рассмотрим, на чём были основаны претензии Вегарда.

Этот многосторонний спор о приоритете примечателен тем, что все названные авторы вовсе не упоминают работы В. И. Черняева и М. Ф. Вукса¹⁵, которым единственно принадлежит это право на открытие. Заметим, что работа В. И. Черняева и М. Ф. Вукса была опубликована в «Докладах Академии Наук СССР» на двух языках: на русском и английском¹⁵.

Наблюдения того или иного свечения неба во время сумерек имеют, в отличие от дневных и ночных наблюдений, ту особенность, что они позволяют непосредственно судить о высоте атмосферных слоёв, в которых возникает свечение. Максимальная яркость жёлтой линии сумеречного неба наблюдается при погружении солнца под горизонт на 6—8°. Тень Земли в это время проходит в атмосфере на высоте 50—70 км и, следовательно, более низкие слои уже не освещаются прямым солнечным светом. После 8—10°, когда тень Земли уходит выше 70—90 км, яркость жёлтой линии быстро падает. Принимая во внимание это и сказанное ранее о большой яркости жёлтой линии в период сумеречной «вспышки» (по сравнению с ночным временем), можно считать, что обнаруженные свойства сумеречной «вспышки» жёлтой линии позволяют сделать следующие выводы:

1. Окончательно подтверждается земное происхождение «жёлтой» линии;

2. Большая часть светящегося вещества находится, повидимому, в сравнительно тонком слое на высоте 60—80 км;

3. Свечение принадлежит атомному натрию;

4. Возбуждение свечения связано с действием солнечных лучей; возможно, что мы имеем дело с оптическим резонансом.

Итак, в стратосфере, на высоте 60—80 км, в составе воздуха находятся пары натрия. Это интереснейшее открытие завершило собой первый этап исследований жёлтой линии неба, продолжавшийся 9 лет — с 1929 по 1938 г.

4. ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Большая ошибка в определении длины волны жёлтой линии неба вызывалась, как мы видели выше, необходимостью пользоваться спектрографами с весьма короткофокусными объективами и обладающими поэтому незначительной линейной дисперсией. Применение спектрографов «нормального» типа, с достаточно большой разрешающей способностью, оказывается невозможным из-за нехватки света.

С этой точки зрения, применение интерференционных методов для точного определения длины волны жёлтой линии неба первоначально могло показаться ещё менее осуществимым из-за той же нехватки света. Бернар получил весьма светосильную интерференционную установку, воспользовавшись изящным методом, применённым ранее Бэб-коком в его известной работе по точному определению длины волны зелёной линии свечения ночного неба²⁶.

Установка Бернара (см. рис. 3) представляет собой эталон Фабри-Перо, за которым находится светосильный объектив; в главной фокальной плоскости объектива располагается фотографическая пластинка. Объектив прикрыт оранжевым светофильтром, пропускание которого круто обрывается у $5750 \text{ \AA}$. Фотопластины были выбраны такие, у которых чувствительность резко сходит на-нет в оранжевой части спектра. В этих условиях чувствительность прибора ограничивается узкой областью примерно от $5800 \text{ \AA}$ до $6000 \text{ \AA}$, чем достигается настолько значи-

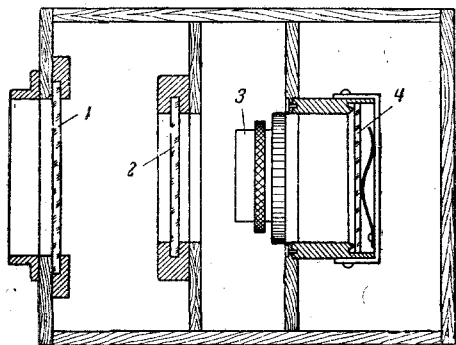


Рис. 3. Схема установки для получения интерференционных колец от D -линий неба. 1 — фильтр; 2 — эталон Фабри и Перо; 3 — светосильный объектив; 4 — фотопластина.

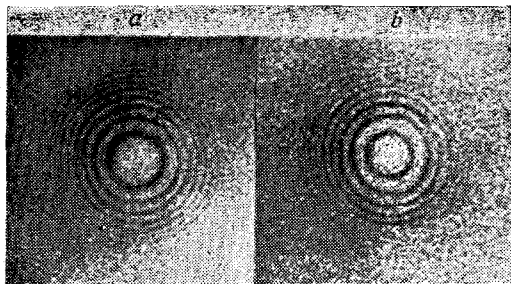


Рис. 4. Интерференционные кольца от жёлтой линии сумеречного неба (Бернар, 1938). (а). Эталон $0,15 \text{ мм}$, линии D_1 и D_2 разделены; (б) эталон $0,30 \text{ мм}$, линии D_1 и D_2 сливаются.

тельное ослабление рассеянного света неба, обладающего, как известно, сплошным спектром, что интерференционные кольца жёлтой линии отчётливо видны на фотографии на сплошном фоне общего почернения пластины, вызванного действием непрерывного спектра. При фотографировании установка направляется непосредственно на интересующий нас участок неба.

На рис. 4 приведены 2 снимка интерференцион-

ных колец жёлтой линии неба, полученных Бернаром при фотографировании сумеречного неба в зените¹⁹. В качестве эталона Фабри и Перо служили плоскопараллельные стеклянные пластинки, соответственно металлизированные, толщиной $0,15 \text{ мм}$ (снимок а) и $0,30 \text{ мм}$ (сни-

мок *b*). Каждый снимок разделяется на 2 половины, различимые на отпечатке на-глаз: на левой половине — кольца от лабораторного источника *D*-линий натрия (спиртовая горелка с раствором Na), это контрольные кольца, на правой половине — фотография сумеречного неба в зените.

На снимке *a* видны кольца отдельно для линий D_1 и D_2 натрия, на снимке *b* — при толщине пластинки 0,30 мм — кольца сливаются. Снимки подтверждают полную идентичность колец жёлтого дублета паров натрия и дублета жёлтого излучения неба. Из снимков можно определить отношение интенсивностей линии D_1 , $\lambda = 5896 \text{ \AA}$ и линии D_2 , $\lambda = 5890 \text{ \AA}$. По измерениям Бернара оно равно 2:1, т. е. совпадает с теоретическим значением для паров натрия.

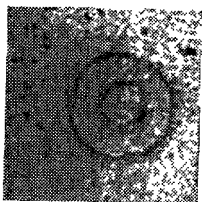


Рис. 5. Интерференционные кольца от жёлтой линии ночного неба. Эталон 0,15 мм (Бернар, 1938 г.).

Пользуясь этой же установкой, Бернар получил интерференционные кольца от жёлтой линии свечения ночного неба¹⁹. В ночных условиях потребовалась гораздо большая экспозиция — более 10 часов, вместо, примерно, 10 минут при сумеречных съёмках. Ночной снимок Бернара, полученный с пластинкой-эталоном 0,30 мм, воспроизведён на рис. 5. В ночных условиях кольца получаются менее резкими, но и здесь их идентичность с кольцами *D*-линий натрия несомненна.

Аналогичные результаты были получены в то же время Кабанном, Дюфэ и Гози, которые также воспользовались эталоном Фабри и Перо столь же малой толщины^{17, 21, 24}.

В 1940 г. Вегард и Тонсберг сделали справедливое, хотя и несколько формальное замечание, что интерференционные снимки Бернара, Кабанна, Дюфэ и Гози являются не вполне строгим, не окончательным доказательством принадлежности жёлтого излучения неба парам натрия²⁵. Если интерференционные опыты показали наличие тонкой структуры (дублет) жёлтого излучения, совпадающего по разности длин волн дублета и по отношению интенсивностей его составляющих с дублетом Na, то ещё остаётся точное определение абсолютного значения длины волн дублета. Это последнее не могло быть выполнено по прежде полученным спектрограммам, снятым на малодисперсных (светосильных) спектрографах (там ошибка составляет несколько $\text{\AA}$, см. § 2), но в ещё меньшей степени это возможно с помощью применённых французскими авторами эталонов Фабри-Перо, у которых толщина составляла всего лишь доли мм. Столь малая толщина удобна для разделения дублета с разностью длин волн порядка 6 $\text{\AA}$, поэтому-то она была выбрана, но с уменьшением толщины эталона уменьшается резкость интерференционных колец и точное определение их диаметров невозможно. Поэтому ошибка в определении длины волны в этом случае будет исчисляться десятками $\text{\AA}$.

Вегарду и Тонсбергу удалось получить в Тромсо 2 спектрограммы сумеречного света на большом стеклянном спектрографе с дисперсией $99 \text{ \AA/мм}$ у жёлтой линии, на которых компоненты D_1 и D_2 получились раздельно (см. рис. 6). Эти авторы¹ сообщили, что «в качестве спектра сравнения были использованы линии D_1 и D_2 натрия и микроскопом компоратора не было обнаружено никакой разницы между этим дублетом и сумеречным дублетом. Оба дублета совпадают и по отношению интенсивностей компонент» (подчёркнуто Вегардом и Тонсбергом).

Только эти свои измерения названные авторы считают окончательным доказательством принадлежности жёлтого дублета излучения неба парам натрия, как это видно из следующего их заключительного замечания²⁵: «Эти результаты, вместе с интерференционными наблюдениями, окончательно доказывают, что жёлтая сумеречная линия есть $D_1 D_2$ — дублет натрия».

Сумеречные спектрограммы, полученные Вегардом и Тонсбергом (см. микрофотограмму на рис. 6), требуют некоторых разъяснений. Дело в том, что хотя авторы прямо указывают, что их спектрограммы получены во время сумерек («...we obtained at Tromsø two spectrograms of twilight giving separation of two components of the yellow line»), но на самом деле, как это можно показать, их снимки вовсе не являются сумеречными, а представляют типичные спектры свечения ночного неба. Указать на эту неточность, допущенную двумя известными исследователями свечения ночного неба и полярных сияний, необходимо, так как она связана с существенными соображениями общего характера, которые будут рассмотрены в следующем параграфе.

Дополнительные признаки наличия атомного натрия в атмосфере были указаны в 1938 г. Дежарденом, который обнаружил среди линий спектра свечения ночного неба такие, которые с известной правдоподобностью можно было бы приписать спектру натрия³¹. Дело в том, что среди трёхсот линий разной интенсивности, найденных в спектрах свечения ночного неба в области $3000\text{—}8000 \text{ \AA}$, немало линий оставалось неотожествлёнными. Наличие атомного натрия в атмосфере было установлено, как мы знаем, только в 1938 г. Сразу же после опубликования интерференционных измерений Бернара, Кабанна, Дюфэ и Гози, доказавших принадлежность жёлтой линии

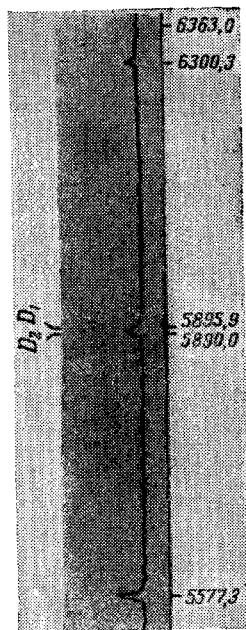


Рис. 6. Регистрограмма спектра ночного неба с разрешённым дублетом натрия $5890\text{—}5896 \text{ \AA}$ (Тонсберг и Вегард, 1940).

излучения сумеречного и ночного неба к спектру атомного натрия, Дежарден предпринял общую ревизию неотожествленных линий спектра ночного неба с целью выяснить, нет ли среди них линий натрия. Попытка привела к положительному результату, как это видно из табл. 1, где собраны результаты сопоставлений Дежардена³¹.

Таблица 1

Сопоставление линий спектра атомного натрия с неотожествленными линиями спектра ночного неба (по Дежардену)

Натрий	Ночное небо		Натрий	Ночное небо	
	λ	Интенсивность		λ	Интенсивность
^1S-3P 3302—3303 Å	3303 Å	3	^3P-4P 5533—5527 Å	5532 Å	0
^2P-3S 6161—6154 Å	6166 Å	0	^2P-5P 4918—4914 Å	4916 Å	?
^2P-4S 5154—5149 Å	5153 Å	0	^2P-6P 4633—4629 Å	4632 Å	?
^2P-5S 4752—4748 Å	4759 Å	1	^2P-7P 4472 ?	4472 Å	1
^2P-6S 4545—4542 Å	4545 Å	?	^2P-3P 4372 ?	4370 Å	3
^2P-4D 5688—5683 Å	5680 Å	1			
^2P-3P 7520 Å (вычислено)					

5. НЕКОТОРЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ О НАБЛЮДЕНИИ ФЛЮОРЕСЦЕНЦИИ НЕБА В СУМЕРЕЧНЫХ УСЛОВИЯХ И О ПРИОРИТЕТЕ ОТКРЫТИЙ В ЭТОЙ ОБЛАСТИ

Оптические наблюдения во время сумерек — наблюдения такого типа, какие привели к открытию паров натрия в стратосфере — имеют две важные особенности: они позволяют непосредственно получать важные сведения о высоте тех атмосферных слоёв, в которых возникает изучаемое свечение (этой возможности нет при дневных и при ночных наблюдениях); кроме того, при сумеречных наблюдениях мы имеем уверенность, что наблюдаемые явления обусловлены прямым действием солнечных лучей (и этой возможности в полной мере нет при дневных и при ночных наблюдениях). Понятно, какое значение имеют эти обстоятельства для выяснения природы явлений. И не случайно, конечно, за последнее десятилетие многие видные геофизики, физики и астрономы всё чаще обращаются к сумеречным исследованиям. В этом направлении наметились два основных пути: один из них связан со всесторонним изучением рассеянного света неба во время сумерек; второй стал возможным после того, как была открыта сумеречная флюоресценция неба, и связан с систематическим исследованием этой флюоресценции.

Предположение о том, что газы, образующие земную атмосферу, могут флюоресцировать под действием солнечных лучей (не обязательно только света), высказывалось неоднократно по различным поводам (например, в связи с вопросом о синеве дневного неба). Не один раз предпринимались попытки обнаружить эту флюоресценцию. Теперь мы можем понять, почему всегда прежде такие попытки не приводили к успеху, хотя эта флюоресценция существует: она слишком слаба, чтобы её можно было обнаружить днём, при наличии яркого рассеянного света неба. Эта флюоресценция (по крайней мере — некоторые её типы) возникает лишь в отдельных, притом высоких слоях воздуха. Только в соответствующие моменты сумерек, когда нижние, «ненужные» слои атмосферы уже погружены в тень и поэтому фон неба уже менее ярок, а сама флюоресценция ещё попрежнему интенсивна — на фоне сплошного спектра рассеянного света неба мы можем обнаружить линии флюоресценции. Но тень Земли быстро поднимается во время сумерек, слои воздуха, только что освещённые солнечными лучами, через короткое время погружаются в тень, явление протекает скоротечно, и требуется громадная светосила оптических приборов, чтобы успеть запечатлеть всё необходимое. В середине 30-х годов были осуществлены современные светосильные спектрографы, и вскоре после этого флюоресценция неба, давно предполагавшаяся и давно искавшаяся, была, наконец, открыта. Она была открыта как флюоресценция сумеречного неба. Интереснейшим примером такой флюоресценции является излучение *D*-линий натрия, о котором идёт речь в настоящей статье.

Когда явление, давно и многократно предполагавшееся и обсуждавшееся в связи с многими другими важными вопросами, наконец, открыто, то, конечно, это всегда интересно и важно. Этим определяется большое общее значение открытия и расшифровки жёлтого излучения неба. На этом же может основываться законное чувство удовлетворения у тех, кто сделал это открытие. Поэтому понятен тот полемический пыл, с которым Бернар, Кабанн, Дюфэ, Гози и Вегард обсуждали (см. § 3) вопрос о приоритете; приходится лишь отметить досадные фактические неточности, имевшие место в этой дискуссии.

Не обстоятельства, связанные с приоритетом — хотя и вопрос о приоритете важен сам по себе, — а возможность лучше разобраться в существе рассматриваемых явлений делает целесообразным анализ некоторых моментов, относящихся к истории открытия флюоресценции неба.

Следует указать, во-первых, что сумеречная флюоресценция неба (а значит, и флюоресценция неба вообще) была открыта Гарригом²⁷ в 1936 г. в виде красного кислородного излучения неба $\lambda = 6300 \text{ \AA}$. Это замечательное открытие Гаррига и последующие работы в этом направлении заслуживают, несомненно, гораздо большего внимания, чем им обычно уделяется и, во всяком случае, имеют серьёзное значение для лучшего понимания тех вопросов, которым посвящена эта статья.

Ещё в конце 20-х и в начале 30-х гг. в результате многолетней работы было установлено, что 3 линии в спектрах свечения ночного неба $\lambda = 5577,3 \text{ \AA}$, $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ и $\lambda = 6363 \text{ \AA}$, долгое время не находившие себе правильного истолкования, принадлежат атомному кислороду. Линия 6300 относится к числу самых ярких не только в спектрах свечения ночного неба, но и в спектрах полярных сияний. Подробное изложение вопроса о линиях атомного кислорода можно найти в другом месте⁴.

Обнаружение и исследование указанных линий доказало наличие в высоких слоях атмосферы большого количества диссоциированного кислорода. Более того, ни в спектрах полярных сияний, ни в спектрах свечения ночного неба не обнаружено полос молекулярного кислорода, что указывает, повидимому, на полную диссоциацию кислорода в верхних слоях атмосферы. Эти факты принадлежат к числу важнейших во всей физике высоких слоёв атмосферы.

Заметим, попутно, что анализ спектров неба не обнаружил присутствия диссоциированного (атомного) азота (под действием ультрафиолетовых лучей солнца молекулы N_2 легче ионизируются, чем диссоциируют). Установлено присутствие ионов N_2^+ , O^+ и O^- .

В 1936 г. Гарриг обнаружил линию $\lambda = 6300 \text{ \AA}$ в спектре сумеречного неба²⁷. Каждый раз, когда солнце находится на глубине 9° под горизонтом (в этот момент яркость неба уже в сотни тысяч раз меньше, чем днём) в спектре неба становится заметной красная линия, проступающая на фоне непрерывного спектра рассеянного света. По мере дальнейшего погружения солнца яркость красной линии медленно и весьма плавно уменьшается. По измерениям Кабанна и Гаррига²⁸, если считать это свечение резонансным излучением кислорода, максимальное содержание атомного кислорода приходится на высоту 115 км.

Первоначальные толкования механизма свечения кислорода во время сумерек оказались, как это было указано позже²⁹, внутренне противоречивыми; впоследствии была дана хорошо согласующая с опытными данными теория явления, основанная на рассмотрении тех специфических особенностей рефракции света в атмосфере, которые должны иметь место для частот, близких к частоте поглощения (резонансной частоте) атомов кислорода вследствие аномальной дисперсии²⁹.

В том же году была открыта флюоресценция паров натрия, которую можно наблюдать, как мы уже знаем, при тождественных условиях: нужно начинать фотографировать спектры сумеречного неба лишь тогда, когда солнце опустится под горизонт на определённый угол, при котором нижние 60 км воздуха погрузятся в тень Земли (6°). В это время яркость неба примерно в 10^4 раз меньше, чем днём.

Кто первый наблюдал сумеречное свечение натрия? Три работы были опубликованы по этому вопросу до появления упоминавшихся в § 3 сообщений Бернара, Кабанна, Дюфэ и Гози: Кюрри и Эдвардса³⁰

в 1936 г., Вукса и Черняева¹⁵ в 1936 г.; Вегарда и Тонсберга³¹ в 1937 г.

Когда в 1938 г. появились впервые публикации Бернара, Кабанна, Дюфэ и Гози, а в течение 1938—1939 гг. разгорелась ожесточённая дискуссия между ними о приоритете (см. § 3), то никто из них не упоминал указанных их предшественников. Впрочем, исключением явилась работа Кюрри и Эдвардса, но и то лишь постольку, поскольку Кабанн, Дюфэ и Гози, ссылаясь на более раннюю публикацию Кюрри и Эдвардса, тем самым отвергали право Бернара на приоритет^{17, 21}. Работа Кюрри и Эдвардса была опубликована³⁰ в 1936 г.

Что же наблюдали Кюрри и Эдвардс?

Их наблюдения были сделаны во время международного полярного года в 1932—1933 гг. в Канаде на широте $63^{\circ}20'$. Они снимали спектры полярных сияний почти каждую ночь в период с декабря 1932 г. по апрель 1933 г. и во 2-й половине августа 1933 г. Всего было снято 693 спектрограммы при разных условиях; во время вечерних и утренних сумерек, во время непрерывных сумерек весной (белые ночи), ночью при луне и без луны и во время облачных ночей. Главный их результат состоит в том, что 2 линии жёлто-красной части спектра полярных сияний становятся более интенсивными при наличии лунного или сумеречного освещения неба.

Что же это за линии? Предоставим слово авторам (см.³⁰, стр. 271):

«Влияние лунного и сумеречного освещения на красное излучение. Два излучения в красной части спектра представляют особый интерес, так как частота их появления и их интенсивность возрастают в период лунного и сумеречного освещения. Хотя их длина волны могла быть определена лишь очень приблизительно из-за малой дисперсии спектрографа в красной части спектра, всё же, основываясь на измерениях Вегарда и Тонсберга, Кабанна и др. длины волны линий в этой части спектра, можно достаточно уверенно отождествить изучавшиеся нами излучения.

Первое из них представляет собой широкую полосу с хорошо выраженной коротковолновой границей у $6300 \text{ \AA}$. Длинноволновая граница этой полосы является размытой и меняет своё положение от раза к разу... Другое излучение имеет вид широкой размытой полосы, простирающейся примерно от $6000 \text{ \AA}$ до $5800 \text{ \AA}$ со средней длиной волны $5940 \text{ \AA}$ ».

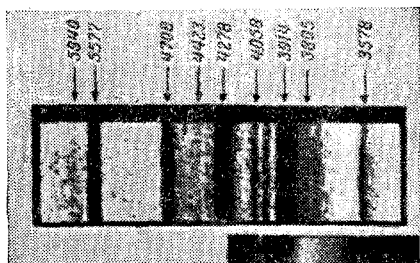


Рис. 7. Одна из спектрограмм свечения неба, снятых в Честерфильде (Канада) Кюрри и Эдвардсом.

Сошлёмся также на одну из спектрограмм Кюрри и Эдвардса, взятую в качестве примера из их работы³⁰ (см. рис. 7). Наконец, заметим, что в работе Кюрри и Эдвардса нигде нет указаний на то, что свою полосу 5940 Å они отождествляют с многократно наблюдающейся в спектрах ночного неба жёлтой линией $\lambda = 5893$ Å.

При таких обстоятельствах кажется странным утверждение Кабанна, Дюфэ и Гози^{17, 21, 24}, что Кюрри и Эдвардс первыми наблюдали сумеречную «вспышку» жёлтой линии $\lambda = 5893$ Å. Только полемическим пылом можно объяснить их заявление о том, что, якобы, Бернар в 1938 г. открыл то, что уже было открыто Кюрри и Эдвардсом за несколько лет до него: усиление яркости жёлтой линии неба под действием сумеречного освещения.

По этому поводу Бернар опубликовал на французском²² и английском²³ языках подробный анализ результатов, полученных Кюрри и Эдвардсом в их работе. Выводы Бернара представляются нам убедительными и интересными. В частности по виду спектров, опубликованных Кюрри и Эдвардсом³⁰, Бернар заключил о том, что они ошибочно приняли размытую полосу в оранжевой части спектра (5940 Å), обусловленную максимумом чувствительности применявшихся фотопластинок (Ilford Soft Gradation) и действием непрерывного спектра лунного света, за полосу излучения неба. «Очень широкая полоса, — пишет Бернар²², — которая видна в оранжевой части спектра, весьма точно соответствует достаточно хорошо выраженному максимуму чувствительности пластинок «Ilford Soft Gradation» и крайне вероятно, что она представляет просто участок сплошного спектра лунного света. Можно в точности воспроизвести общий вид спектрограмм Кюрри и Эдвардса, фотографируя на пластинках «Ilford Soft Gradation» сплошной спектр уловой дуги».

Отсылая за дальнейшими подробностями к работам Бернара^{22, 23}, приведём лишь его общий вывод: «В высокой степени вероятно, что Кюрри и Эдвардс никогда не наблюдали излучения атмосферного натрия; то, на чём они останавливали своё внимание, порой было полосами полярных сияний около 6000 Å, в других случаях это был узкий участок непрерывного лунного или сумеречного спектра в области максимума чувствительности фотографических пластин. В их мемуаре я не нашёл никаких указаний и никаких предположений, которые могли бы привести меня к выводу о том, что они открыли сумеречный эффект для жёлтой линии $\lambda = 5893$ ».

Переходим к утверждениям Вегарда, что он первый наблюдал жёлтую линию в спектрах сумеречного неба. Это заявление было сделано в 1940 г. в заметке, опубликованной в «Nature» в следующей форме²⁵: «Спектры сумерек, дающие жёлтую линию, были получены Вегардом в Осло 13 января 1936 г. и в Тромсе в феврале того же года³²... В 1937 г. Бернар, работая в обсерватории в Тромсе, провёл дальнейшее систематическое изучение увеличения яркости жёлтой линии в спектрах сумерек^{16, 18, 20}».

Необходимо сначала сделать одно общее замечание об особенностях свечения неба в тех географических пунктах (Норвегия), где проводил в течение многих лет свои наблюдения Вегард. В этих северных широтах регулярно наблюдаются полярные сияния, там же имеют место весьма длительные сумерки, продолжающиеся месяцами. Поэтому в указанных пунктах часто протекают оптические явления одновременно трёх разных типов: свечение ночного неба, полярные сияния и сумерки. В некоторых отношениях такие условия следует считать благоприятными, так как указанные явления, дополняя и усиливая друг друга, создают большое разнообразие процессов и облегчают возможность наблюдать различные их формы и сочетания. Но в то же время такие условия могут затруднить истолкование самих явлений. Указанные три типа свечения атмосферы — ночное, сумеречное и полярные сияния — имеют глубоко индивидуальные особенности, — это явления, вообще говоря, различного характера и происхождения. Иметь возможность наблюдать порознь эти типы свечения неба — в ряде случаев весьма желательно. Такая возможность затруднена на широтах Норвегии, и сам Вегард, при всём своём громадном опыте, несомненно стал, во

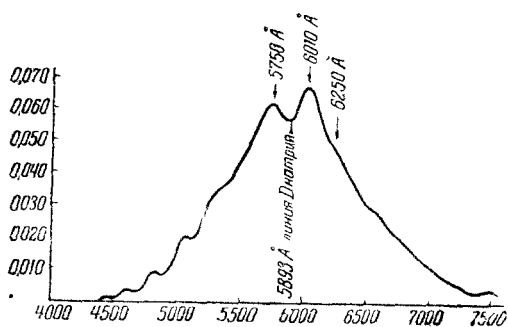


Рис. 8. Полоса поглощения озона в видимой области спектра (полоса Шапюи).

всяком случае однажды, жертвой лутаницы. типичный спектр ночного неба он посчитал спектром сумеречного неба. В цитированной выше работе Вегарда и Тонсберга²⁵ они приводят микрофотограмму спектра с разрешёнными линиями натрия D_1 — D_2 . Эту микрофотограмму мы уже воспроизводили в § 4 (см. рис. 6). Вегард и Тонсберг утверждают, что это спектр сумеречного неба, но на наш взгляд — это типичный спектр свечения ночного неба. В самом деле, спектр сумеречного неба имеет свой специфический вид: это, в первую очередь, спектр рассеянного света неба, на котором лишь при специальных условиях можно различить 2 линии излучения неба: красную кислородную $\lambda = 6300 \text{ Å}$ и жёлтую натриевую $\lambda = 5893 \text{ Å}$. По общей структуре это есть спектр солнечных лучей со всеми полагающимися резкими и слабыми фраунгоферовыми линиями. Косое прохождение солнечных лучей через земную атмосферу в условиях сумеречного освещения неба приводит к усилению линий и полос поглощения земного происхождения. В жёлтой части спектра, которая нас специально интересует в аспекте настоящей статьи, свет сумеречного неба приобретает характерную спектральную структуру.

благодаря поглощению солнечных лучей озоном. На рис. 8 приведена кривая, показывающая величину озонного коэффициента поглощения в полосе Шапюи (по А. Васси^{83, 84}). Эта полоса имеет 2 главных максимума поглощения у $\lambda = 5750 \text{ \AA}$ и $\lambda = 6010 \text{ \AA}$ и между ними минимум поглощения у $\lambda = 5872 \text{ \AA}$. Поглощение солнечных лучей озоном при косом прохождении солнечных лучей сквозь атмосферу настолько велико, что на фоне сплошного спектра рассеянного света сумеречного неба всегда видна светлая контрастная полоса (полоса поглощения) в жёлто-оранжевой части спектра; в середине этой свет-

лой полосы при достаточных экспозициях можно заметить узкую тёмную полосу у $\lambda = 5860 \text{ \AA}$. На рис. 9 воспроизведены спектрограммы сумеречного неба (спектры 1—8 на левом снимке и 1—10 на правом); для сравнения на правом снимке дан спектр ночного неба: в зелёно-красной части — это линейчатый спектр без признаков непрерывного спектра.

Прекрасное описание характерного общего вида спектра сумеречного неба было дано ещё в 1935 г. Гози⁸⁵. Типичную микрограмму сумеречного неба, на которой, к тому же, видна и жёлтая линия натрия, можно видеть на рис. 2, где она воспроизведена из работы В. И. Черняева и М. Ф. Вукса¹⁵.

Микрофотограмма, приводимая Вегардом-Тонсбергом²⁵ (рис. 6), как об этом свидетельствует самый её вид, относится к линейчатому спектру без признаков фона, следовательно, она не может относиться к сумеречному небу. Она не может быть и микрофотограммой спектра полярных сияний, который также является линейчатым, потому что в полярных сияниях, как это хорошо известно, жёлтой линии натрия никогда не бывает. Это есть микрофотограмма спектра свечения ночного неба.

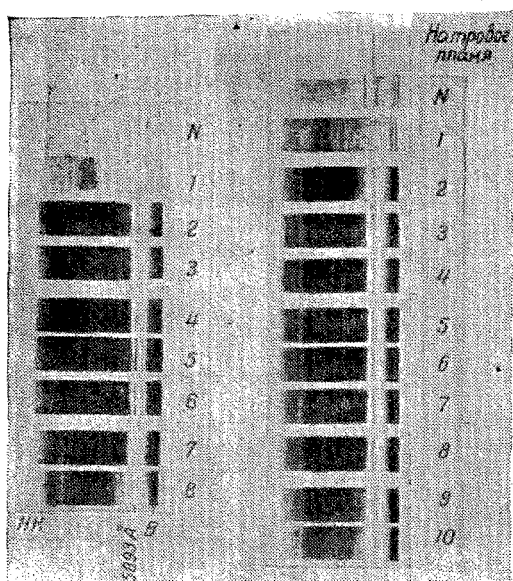


Рис. 9. Спектрограммы сумеречного неба (1—8 и 1—10), снятые последовательно при различном погружении Солнца под горизонт. Наверху (N) спектры свечения ночного неба (Брикар и Кастлер, 1944 г.).

Если, как на это указывает Вегард (см. выше), Бернар и наблюдал впервые усиление жёлтой линии в сумерки, работая в Норвегии, то он правильно поступил, опубликовав первое сообщение об этих наблюдениях лишь после того, как он подтвердил эти результаты наблюдениями во Французских Альпах и на Лионской обсерватории¹⁹.

Таковы некоторые замечания по существу результатов Вегарда. Что же касается формальной стороны дела, связанной с его претензией на приоритет²⁵, то достаточно указать, что уже известная нам работа В. И. Черняева и М. Ф. Вукса была опубликована на полгода раньше¹⁵, чем сообщение Вегарда³².

Указанные обстоятельства с несомненностью доказывают, что право на открытие яркой «вспышки» жёлтой линии в спектре сумеречного неба, о котором так много спорили за границей, принадлежат М. Ф. Вуксу и В. И. Черняеву.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ И ПРОТЯЖЁННОСТИ НАТРИЕВОГО СЛОЯ

Характерным для натриевого свечения сумеречного неба является его кратковременность. По определениям Бернара, интенсивность жёлтой линии уменьшается в 100 раз за несколько минут. Зная момент времени, когда яркость натриевого излучения становится малой (принимает своё ночное значение) и вычисляя глубину погружения Солнца под горизонт, а по ней — высоту тени Земли для этого момента, можно определить высоту верхней границы натриевого слоя. Именно таким путём Бернар ещё в 1938 г. получил высоту 60 км. Быстрое угасание свечения указывает на небольшую толщину того слоя воздуха, в котором содержатся заметные количества паров натрия.

В том же 1938 г., в разгар дискуссии о приоритете, Кабанн, Дюфэ и Гози указали, что высота 60 км, полученная Бернаром по сумеречным наблюдениям, не подтверждается их ночными определе-

ниями высоты светящегося слоя натрия. Пользуясь измерениями Гаррига¹⁴, который определил отношение интенсивности жёлтой линии спектров свечения ночного неба в зените и вблизи горизонта, они получили высоту 130 км. Идея таких вычислений состоит в следующем.

Пусть 33 (рис. 10) — поверхность Земли и AB и CD — 2 слоя воздуха одинаковой толщины, ограниченные концентрическими поверхностями, параллельными земной поверхности. Слои находятся на разной высоте. При визировании в зенит Z луч зрения пересекает одинаковую толщину в обоих слоях: $AB = CD$ или $AB:CD = 1$. Будем теперь визировать в направлении H , близком к горизонту; луч зрения

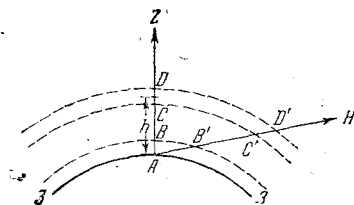


Рис. 10. К вычислению высоты светящегося слоя ночью.

пересекает наши слои на отрезках AB' и $C'D'$, причём, очевидно, $C'D':AB' < 1$, и это отношение будет уменьшаться по мере увеличения высоты h слоя CD . Если считать, что свечение вещества равномерно заполняет такой атмосферный слой, ограниченный концентрическими поверхностями и что яркость свечения пропорциональна толщине CD или, соответственно, $C'D'$, то мы приходим к выводу, что яркость свечения должна возрастать по мере удаления от зенита, причём это возрастание будет происходить тем медленнее, чем выше расположен слой CD . Зная фактическое изменение яркости свечения от зенита к горизонту, можно вычислить высоту светящегося слоя h .

Гарриг, измеряя отношение B_H/B_z яркости жёлтой линии при визировании спектрографа под углом 10° к горизонту к её яркости

в зените нашёл¹⁴, что это отношение варьирует от 2 до 3. Принимая, что в среднем это отношение составляет 2,8, Кабани, Дюфэ и Гози²¹ нашли $h = 130$ км.

Дежарден и Бернар подвергли это определение основательной критике³⁶. Они указали, что значению $B_H/B_z = 3$ соответствует высота $h = 90$ км, а значению $B_H/B_z = 2$ — высота $h = 400$ км, так что таким методом высота может быть определена лишь очень грубо. Далее, если даже допустить, что слой свечения натрия является

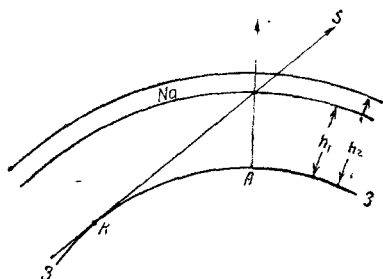


Рис. 11. Определение границы светящегося слоя натрия по сумеречным наблюдениям.

тонким и однородным, то ошибка определения становится очень заметной при визировании под углом меньше 20° к горизонту, так как в этом направлении луч зрения пересекает натриевый слой очень наклонно. Наконец, интенсивность разного рода атмосферных излучений вообще проходит через максимум как раз вблизи направления 10° над горизонтом. Всё это делает формулу, применяемую Кабанном, Дюфэ и Гози очень неточной.

Возвращаемся к определению высоты светящегося натриевого слоя по сумеречным наблюдениям. Если ZZ — поверхность Земли (рис. 11), KS — направление того солнечного луча, касающегося земной поверхности в точке K , который определяет границу тени Земли в момент появления линий натрия в спектре неба в зените Z наблюдателя A , то высота h , которую мы легко определяем из геометрических условий, может быть условно принята за нижнюю границу слоя Na .

Мы говорим «условно», потому что, хотя это обстоятельство оставалось до сих пор неотмеченным, отсутствие заметной линии Na в спектрах неба при меньшей глубине погружения Солнца под горизонт вовсе не может быть доказательством отсутствия паров Na в более низких слоях воздуха. В самом деле, допустим, что в более

низких слоях имеются пары натрия в таком же количестве, как и на высоте 60 км, на которой мы фиксируем наиболее заметную яркость их свечения. Если тень Земли переместится с высоты 50 км на высоту 30 км (на наших широтах это произойдёт за 5—10 минут), то яркость неба возрастёт примерно в 10 раз вследствие быстрого изменения плотности (рассеивающей способности) воздуха с высотой. Яркость свечения паров натрия изменится незначительно, и жёлтая линия не будет уже обнаружена на спектрограмме, так как снимок теперь пришлось бы делать с экспозицией, в 10 раз меньшей.

Таким образом, высоту h_1 следует рассматривать лишь как условную нижнюю границу слоя, содержащего пары натрия.

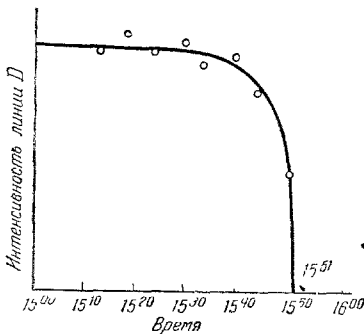


Рис. 12. Изменение яркости жёлтой линии сумеречного неба со временем (Бернар, 1938 г.).

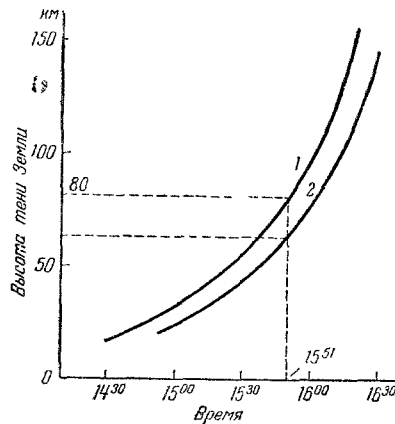


Рис. 13. Высота тени Земли для тех же моментов, что и на рис. 12. Верхняя кривая — без учёта рефракции солнечных лучей в атмосфере, нижняя — с учётом рефракции.

По определениям Бернара, яркость жёлтой линии, сначала изменяясь медленно, потом очень быстро уменьшается: примерно в 100 раз за несколько минут (рис. 12). Зная момент окончания яркой жёлтой «вспышки» сумеречного неба, можно определить верхнюю границу натриевого слоя h_2 (рис. 11). В одной из своих работ Бернар приводит вычисленную им кривую высоты тени Земли (рис. 13) для разных моментов измерения яркости жёлтой линии с учётом атмосферной рефракции солнечных лучей (кривая 2) и без учёта её (кривая 1). Время, отложенное на графике (рис. 13), относится к тому же дню измерений, что и на кривой для яркости (рис. 12). Моменту окончания «вспышки» 15^h51^m соответствует высота $h = 60$ км.

Карио и Стилл³⁷, пользуясь данными Бернара, определили толщину натриевого слоя равной всего лишь 9 км.

Бернар в своих вычислениях не принимал во внимание ослабления луча KS (рис. 11) на его пути сквозь атмосферу. Между тем известно,

что ослабление лучей, идущих через нижние слои атмосферы от Солнца, находящегося у горизонта, чрезвычайно велико. Так, например, по фотометрическим данным Абнея и Мюллера, измерявших яркость Солнца при разных зенитных расстояниях, для лучей $\lambda = 0,59 \mu$ Солнце, наблюдаемое у горизонта, имеет лишь $10/100$ своей полной яркости³⁸.

В сумеречных условиях (рис. 11) приземные лучи Солнца KS дважды проходят указанную толщину атмосферы, и ослабление достигает величины 10^6 .

Таким образом лучи Солнца, проходящие сквозь нижние слои воздуха, фактически не принимают участия в сумеречном освещении неба в зените (экранирующее действие тропосферы). Если исключить из расчёта лучи, прошедшие сквозь нижние непрозрачные слои воздуха, то вычисленные высоты h_1 и h_2 увеличиваются.

Именно такие уточнения хотели сделать Карио и Стилл. К сожалению, это было сделано ими слишком упрощённо⁵⁷. Давно существует теория В. Г. Фесенкова, строго учитывающая ослабляющее действие нижних слоёв воздуха на солнечные лучи, идущие из-под горизонта и освещающие зенит во время сумерек³⁹. Карио и Стилл не использовали результатов В. Г. Фесенкова. После подробных, но местами слишком примитивных рассуждений они просто заключили, что тропосфера непрозрачна до высоты 8 км, а поглощением в более высоких слоях можно пренебречь. В результате, исходя из опытных данных Бернара, они получили $h_1 = 69$ км и $h_2 = 78$ км. С немецкой методичностью они вычисляют ошибку своего определения этих высот равной $\Delta h = \pm 1,2$ км, хотя, как это нетрудно видеть, ошибка их результатов гораздо больше вследствие неточного учёта ослабляющего действия атмосферы на солнечные лучи.

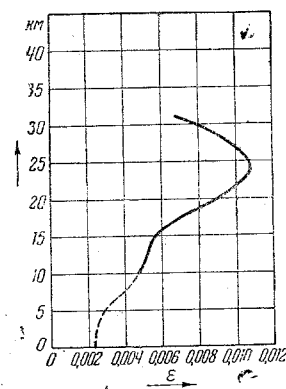


Рис. 14. Вертикальное распределение озона (ϵ — толщина в см приведённого слоя озона, отнесённого к 1 км воздуха).

Можно было бы получить гораздо более точные результаты, воспользовавшись упомянутой теорией В. Г. Фесенкова³⁹. Мы не станем этого делать, поскольку в 1944 г. Брикар и Кастлер выполнили необходимые вычисления с достаточной точностью, приняв, к тому же, во внимание существенное для рассматриваемых явлений поглощение солнечных лучей атмосферным озоном⁴⁰.

На рис. 8 мы уже приводили кривую озонного поглощения света в полосе Шаппюи. Эта кривая показывает, что D -линия Na , приходясь в промежуток между двумя главными максимумами полосы Шаппюи, всё же соответствует месту, где поглощение велико.

1. Рассеяние света является чисто молекулярным (идеальная атмосфера).

3. Коэффициент ослабления $\alpha (I=I_0 \cdot 10^{-4})$, вычисленный по формуле Рэлея-Кабанна для $\lambda=0,59$ м, равен $\alpha=0,0038$ км⁻¹ для воздуха на высоте $h=0$.

2. Распределение озона по высоте такое, как показано на рис. 14.

для $\lambda_D = 5890 \text{ \AA}$ при 18°C $\alpha = 0,058$ и при
— 50°C $\alpha = 0,065$

$\lambda_M = 6010 \text{ \AA}$ » 18°C $\alpha = 0,068$ и при
— 50°C $\alpha = 0,075$

$$\lambda_m = 5872 \text{ Å} \quad » \quad 18^\circ \text{C } \alpha = 0,0575 \text{ и при}$$
$$-50^\circ \text{C } \alpha = 0,0645.$$

Таблица 2

Наименьшее расстояние падающих солнечных лучей от земной поверхности у	Толща воздуха, пересекаемого солнечным лучом, приведенная к нормальным условиям	Толща озона, пересекаемого солнечным лучом, приведенная к нормальным условиям	Ослабление за счёт молекулярного рассеяния	Ослабление озоном	Полное ослабление I/I_0	$\log_{10} \frac{I}{I_0}$
0 км	568 км	8,2 см	0,0072	0,297	0,0021	0,32—2
10 км	162 км	8,5 см	0,245	0,280	0,069	0,84—1
20 км	47 км	9,1 см	0,67	0,256	0,17	0,23
30 км	13,4 км	4,4 см	0,89	0,518	0,46	0,66
40 км	4,0 км	—	0,96	0,95	0,90	0,95

Поскольку и плотность воздуха и концентрация озона изменяются с высотой, прозрачность атмосферы для горизонтального луча тоже меняется с высотой. Брикар и Кастлер⁴⁰ вычислили ослабление для атмосферных слоёв через 10 км. Их результаты приведены в табл. 2. Величина I/I_0 , определяющая прозрачность атмосферы для лучей Солнца, идущих из-под горизонта и освещающих небо в зените наблюдателя, представлена на рис. 15 как функция высоты u . Нижние 15—20 км воздуха являются весьма мало прозрачными для света, $\lambda = 0,59 \mu$, лишь с высоты 25—30 км атмосферное ослабление света оказывается уже малым. В действительности же ослабление нижними слоями имеет ещё большую величину из-за поглощения света парами

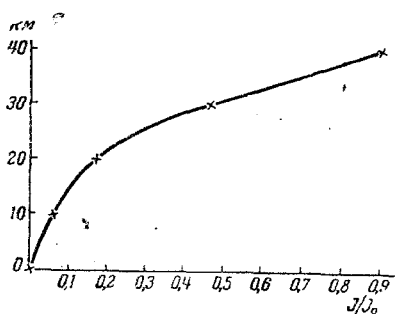


Рис. 15. Ослабление луча $\lambda = 0,59 \mu$, проходящего на различной высоте u над уровнем Земли в условиях сумеречного освещения неба (ослабление луча из-за молекулярного рассеяния и поглощения озоном).

воды и частицами аэрозоля (водяные капельки, пылинки, кристаллы льда). Но в то же время нет, конечно, четкой границы между прозрачной и непрозрачной атмосферой, как это допускали в своих вычислениях Карио и Стилл³⁷; прозрачность весьма быстро изменяется с высотой в большом интервале: 20—25 км. С этой точки зрения, результат, полученный Карио и Стилл, что будто бы толщина натриевого слоя может составлять 9 км, следует считать иллюзорным. Даже если бы весь натрий был сосредоточен в бесконечно тонком слое, заметное уменьшение интенсивности желтой линии происходило

бы в течение сравнительно большого интервала времени, соответствующего изменению высоты тени Земли на десятки км, как это соответствует ходу прозрачности атмосферы (рис. 15). Более того, с этой точки зрения представляется нетипичным то быстрое угасание желтой линии (в 100 раз за несколько минут), которое получилось по наблюдениям Бернара²⁰ (см. рис. 12). Вукс и Черняев, которые первыми наблюдали натриевую линию в сумеречном свете, не нашли такого быстрого спада. По данным Брикара и Кастлера, полученным в период 1940—1944 гг., также не получается столь быстрого спада яркости желтой линии. Эти авторы пишут⁴⁰: «Бернар сообщил, что интенсивность желтой линии остаётся почти неизменной в течение минут двадцати во время сумерек, а затем внезапно падает, почти за 1 минуту чуть ли не в 100 раз. Качественная проверка наших снимков и наши первые фотометрические измерения согласно указывают, что во время вечерних сумерек линия ослабляется постепенно, а во время утренних — прогрессивно нарастает».

Имея данные о прозрачности атмосферы для $\lambda = 0,59 \mu$ для слоёв воздуха на различной высоте (табл. 2), можно вычислить теоретический ход яркости жёлтой линии в зависимости от зенитного расстояния Солнца $Z_\odot$, предполагая, что натрий сосредоточен тонким слоем на некоторой заданной высоте h . Для разных h получится, конечно, разный ход яркости. Брикар и Кастлер⁴⁰ вычислили 3 кривые для $h = 80 \text{ км}$ (60 км), $h = 90 \text{ км}$ (75 км) и $h = 100 \text{ км}$ (100 км); в скобках указаны высоты с учётом рефракции солнечных лучей на их пути сквозь атмосферу. Эти

три кривые приведены на рис. 16, где по оси абсцисс отложены зенитные расстояния Солнца $Z_\odot$, а по оси ординат — логарифмы яркости $\lg I$. Указанные около кривых значения $y = 0 \text{ км}$, $y = 10 \text{ км}$, $y = 20 \text{ км}$, $y = 30 \text{ км}$ и $y = 40 \text{ км}$ относятся к точкам на кривых, отмеченным соответствующими стрелками, и поясняют детали результатов вычислений. Например, если считать тонкий натриевый

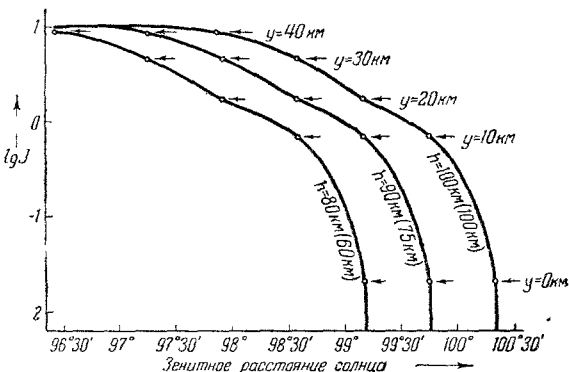


Рис. 16. Теоретический ход яркости жёлтой линии сумеречного неба при изменении зенитного расстояния Солнца $Z_\odot$ при различных предположениях о высоте слоя натрия.

слой расположенным на высоте $h = 90 \text{ км}$ (75 км), то его свечение при $Z_\odot = 99^\circ,12$ возбуждается, как это определяется геометрической картиной явления, солнечным лучом, проходящим на ближайшем расстоянии от земли $y = 10 \text{ км}$. Если считать натриевый слой на большей высоте, $h = 100 \text{ км}$, то в этот же момент он освещается лучом, идущим более высоко, $y = 20 \text{ км}$, поэтому менее ослабленным, вследствие чего яркость жёлтой линии имеет соответственно большую величину.

Брикар и Кастлер⁴⁰ считают, что, чисто качественно, ближе всего к фактическим данным об изменении яркости жёлтой линии в сумеречном небе подходит кривая для $h = 90 \text{ км}$ (75 км).

Интересно отметить, что в интервале $Z_\odot$ от $96^\circ30'$ до 97° интенсивность жёлтой линии почти не меняется. Таким образом, яркость D-линии в дневном небе можно предполагать примерно равной её яркости при $Z_\odot = 96^\circ30'$. Отсюда можно заключить о тех условиях, при которых можно было бы наблюдать жёлтую линию в спектре дневного неба.

В следующем параграфе мы увидим, что вопрос о высоте натриевого слоя может трактоваться несколько иначе, чем это было сделано выше, с учётом возможного механизма возбуждения D-линий.

7. О МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СВЕЧЕНИЯ НАТРИЯ В СТРАТОСФЕРЕ

Закономерная зависимость яркости D -линий от зенитного расстояния Солнца в течение сумерек делает весьма вероятным предположение, что мы имеем дело, в данном случае, с оптическим резонансом. В этом случае высоту светящегося слоя Na можно вычислять подобно тому, как это было изложено в предыдущем параграфе.

Откуда могут взяться пары натрия в верхних слоях атмосферы?

Бернар первый указал, что источником натрия в атмосфере могут быть капельки морской воды, разбрызгиваемые волнами и уносимые с поверхности океана ветром ⁴¹. Испаряясь, эти капельки дают метчайшие частицы NaCl, часть которых поднимается в более высокие слои атмосферы благодаря вертикальному перемешиванию воздуха. Пары натрия образуются путём испарения с поверхности крупинок поваренной соли.

Весьма неясно, могут ли твёрдые частички NaCl подняться в атмосферу на высоту многих десятков км. Но если допустить наличие NaCl на соответствующих высотах, то образование атомов Na может происходить, например, путем фотодиссоциации молекул NaCl ультрафиолетовыми лучами Солнца. Продуктами фотодиссоциации могут быть возбуждённые атомы Na, которые затем спонтанно высвечиваются.

Таким образом, возможен другой механизм свечения Na в атмосфере, не связанный с резонансной флюоресценцией. Возможность возбуждения сумеречного свечения атмосферы путём предварительной фотодиссоциации солнечными лучами была указана впервые Гетцем ⁴² (в 1935 г.) в связи с красным сумеречным излучением неба $\lambda = 6300 \text{ \AA}$. Но коротковолновая ультрафиолетовая радиация Солнца, способная вызвать диссоциацию, поглощается нацело или молекулами O_2 или молекулами O_3 (подробнее это будет рассмотрено ниже). В этом случае высота слоя атмосферы, непрозрачного для лучей Солнца, ответственных за свечение Na, значительно увеличивается и вычисляемая по сумеречным данным высота светящихся паров натрия тоже соответственно возрастает. Гетц ⁴³ указал, что этим путём можно согласовать сумеречные высоты, найденные Бернаром (если их соответственно исправить), с ночными высотами, найденными Кабанном, Дюфэ и Гоци по измерениям Гаррига (см. § 6).

К такому же выводу пришёл в 1940 г. Вегард на основании изучения большого количества спектрограмм, полученных им в Осло ⁴⁴. Приводим дословно весьма краткое сообщение Вегарда по этому вопросу. «С помощью малого светосильного спектрографа мы фотографировали спектры сумеречного неба, частью в зените, частью вблизи горизонта. Если мы предположим, вслед за Бернаром, что излучение жёлтой линии определяется тенью Земли, образуемой видимыми лучами Солнца, тогда наблюдения у горизонта дают для высоты

эффективного излучающего слоя большую величину (59 км), чем это получается по спектрам, снятым в зените (45 км).

Можно предположить, однако, что жёлтая линия возбуждается каким-то сильным поглощаемым в атмосфере излучением, возможно — ультрафиолетовыми лучами Солнца, и что атмосфера ниже некоторой высоты H_s действует как экран для возбуждающих солнечных лучей; тогда эта экранирующая высота может быть найдена из условия, что спектры, снятые и в зените и вблизи горизонта, должны давать одну и ту же верхнюю высоту H_u для излучения жёлтой линии*).

Наблюдения в Осло дали для эффективной экранирующей высоты $H_s = 55$ км и для верхнего предела эффективного возбуждения $H_u = 115$ км.

Интересно отметить, что экранирующая высота как раз совпадает с областью относительно большой концентрации озона».

Получив для свечения Na высоту 115 км, Вегард особо подчёркивает, что, таким образом, по наблюдениям в Осло, излучающий жёлтую линию слой расположен в нижней части области свечения полярных сияний. (Как известно, высоту полярных сияний, благодаря локальному характеру их свечения на небе, можно определять путём базисных наблюдений — одновременно из двух пунктов; установлено, что нижний край сияний не опускается ниже, примерно, 90 км.)

Необходимо отметить, что в спектрах собственно полярных сияний жёлтая линия 0,59 μ никогда не наблюдалась.

Подведём предварительные итоги определения высоты h слоя, излучающего D -линии натрия.

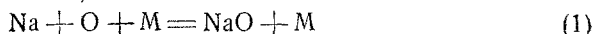
Считая сумеречное свечение резонансной флюоресценцией паров Na, возбуждаемой солнечным светом, Бернар нашёл $h = 60$ км, Карио и Стилл нашли $h = 69$ км и толщину слоя 9 км ($h_1 = 69$ км, $h_2 = 78$ км), Брикар и Кастлер нашли $h = 90$ км (или 75 км — с учётом рефракции). Вегард получил $h = 115$ км, считая, что свечение возбуждается ультрафиолетовыми лучами Солнца. По наблюдениям за спектрами свечения ночного неба Кабани, Дюфэ и Гози нашли $h = 130$ км.

Как мы уже знаем, интенсивность D -линий в сумеречном свете и в спектрах ночного неба различается по крайней мере на 2 порядка. Кроме того, если в сумерках яркость жёлтой линии быстро меняется соответственно изменению зенитного расстояния Солнца, то ночью, наоборот, сколько-нибудь значительные изменения яркости жёлтой линии не имеют места. Наконец, получаются и различные высоты светящихся слоёв ночью (130 км) и в течение сумерек (60 — 115 км). Всё это делает достаточно вероятным предположение, что механизм возбуждения свечения Na ночью и в течение сумерек различен. Для ночного излучения возможно возбуждение путём электронного удара,

*) Подчёркнуто Вегардом.

а также путём ударов 2-го рода. Крупнейший авторитет по вопросам физики высоких слоёв атмосферы Чепман считает⁴⁵ возбуждение свечения путём электронного удара мало вероятным и предполагает, что возбуждение происходит путём ударов 2-го рода.

Присутствие в верхних слоях атмосферы кислорода в виде O или O_3 определяет наличие реакций, ограничивающих длительность жизни свободных атомов Na , а именно.



и



где M означает третье тело, обычно N_2 или O (первая реакция возможна, очевидно, лишь при тройных ударах). Восстановление атомов Na идёт благодаря реакции



В результате реакции (3) получается возбуждённый атом Na . В этой реакции атомы Na выступают как бы посредником в рекомбинации кислорода: $O + O = O_2$.

Громадная энергия, запасаемая атмосферой днём за счёт поглощения ультрафиолетовой радиации Солнца, вызывающей диссоциацию кислорода, сохраняется частично в течение всей ночи и может служить источником энергии, выделяемой атмосферой в виде свечения (свечение ночного неба). Прямой процесс рекомбинации $O + O = O_2$ возможен лишь при тройных ударах, вероятность которых убывает с высотой пропорционально плотности воздуха. Реакция (3) идёт при обычных, двойных ударах и может служить, по мнению Чепмана, причиной свечения натрия ночью.

Натрий может давать и соединения с азотом: Na_3N и NaN_3 . Но из спектров свечения ночного неба и полярных сияний известно, что в верхних слоях атмосферы нет атомов азота N , а есть лишь молекулы N_2 , вследствие чего реакция натрия с азотом невозможны.

Наконец, следует указать ещё на совершенно другой взгляд, высказанный Кабанном, Дюфэ и Гози по поводу возбуждения D -линий в спектрах ночного неба²⁴. Натрий входит в состав метеорного вещества. При полёте метеора сквозь атмосферу, происходящем, как известно, со скоростью десятков $км/сек$, создаются благоприятные условия для испарения натрия и его последующего интенсивного свечения. Соответственно этому, указанные авторы считают²¹, что свечение натрия может быть «излучением, сопровождающим падение метеоров; в этом случае каждый атом натрия может восемь тысяч раз испытать возбуждение с последующим высвечиванием, прежде чем окончательно выйти из игры». По их оценке метеоры могут доставлять до 2500 атомов натрия в 1 сек. на $1 см^2$.

По этому поводу Чепман пишет⁴⁵: «Хотя метеоры могут быть важным источником атмосферного натрия, всё же не видно особых причин к тому, чтобы натрий светился только при падении метеоров».

К вопросу о метеорном происхождении натрия нам придётся вернуться в § 8.

Итак, указано 5 разных возможных способов возбуждения свечения *D*-линий натрия в высоких слоях атмосферы:

1. Резонансное свечение, возбуждаемое лучами Солнца (видимый спектр).
2. Фотодиссоциация молекул NaCl ультрафиолетовыми лучами Солнца с образованием возбуждённых атомов Na .
3. Возбуждение путём электронных ударов..
4. Возбуждение путём ударов 2-го рода.
5. Свечение продуктов испарения метеоров при их полёте сквозь верхние слои атмосферы.

8. ОТКУДА БЕРЁТСЯ НАТРИЙ В ВЫСОКИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

Когда Дюфэ в 1933 г. впервые «произнёс» слово натрий в связи с жёлтой линией в спектрах свечения ночного неба⁸, он, конечно, не имел никаких фактических данных, которые позволяли бы предполагать, что пары натрия являются составной частью воздуха земной атмосферы. Он указал тогда, что излучение *D*-линий могло бы принадлежать межзвёздному натрию. Однако, яркая вспышка жёлтой линии в сумеречном небе при определённых зенитных расстояниях Солнца, обнаруженная в 1936 г. М. Ф. Вуксом и В. И. Черняевым¹⁵, явно указывает на присутствие атомов натрия в составе земной атмосферы.

Были высказаны различные гипотезы о происхождении натрия в атмосфере, причём их можно все разделить на 2 основные группы: одни предполагают, что натрий попадает в верхние слои атмосферы из мирового пространства, другие считают его происхождение земным.

В 1938 г. Фабри указал⁴⁶, что источником натрия в атмосфере может быть межзвёздный натрий. Чтобы составить более ясное суждение об основаниях для такой гипотезы, необходимо вспомнить, хотя бы кратко, те данные, которые характеризуют наличие материи в межзвёздном пространстве.

Свет всех небесных тел имеет непрерывный спектр с большим или меньшим числом линий поглощения, возникающих в результате поглощения на пути лучей. В случае наблюдения звёзд этот путь состоит из трёх частей: распространение света сквозь атмосферу звезды, продолжающееся десятые доли секунды, путь через мировое пространство, продолжающийся столетиями, и путь сквозь земную атмосферу (тысячные доли секунды). Разделить поглощение в звёздных атмосферах и в атмосфере Земли позволяет без особого труда эффект Доплера. Величина радиальной скорости звезды определяет одинаковое смещение всех линий поглощения звёздного происхождения. Если

в спектре звезды наблюдаются линии, доплерово смещение которых явно отличается от смещения всех остальных линий, то мы можем подозревать, что эти линии, если они не принадлежат к теллурическим, вызваны поглощением света межзвёздной материей. Отдельные группы звёздных линий могут даже давать различную и переменную величину радиальной скорости, как, например, в случае спектрально двойных звёзд, и, тем не менее, линии межзвёздного происхождения будут отличаться от них неизменной, отличной от других линий величиной доплерово смещения. Они отличаются и по внешнему виду, являясь узкими; резкими, в то время как звёздные линии обычно размыты.

Впервые такие стационарные линии в спектре звезды с переменной радиальной скоростью были открыты Гартманном в 1904 г. в спектре δ Ориона, большие колебания скорости которой были открыты ещё в 1900 г. Десландром. Скорости, измеренные по водородным линиям, менялись в пределах от $+133$ до -66 км/сек; линии ионизованного кальция Ca^+ (линии H и K) давали постоянную скорость $+16$ км/сек. Кроме того, линии кальция были узкими и резкими, а линии Бальмеровской серии — широкими и размытыми. Это указывало на существование в пространстве между звездой и нами «облаков ионизированного кальция».

Ещё раньше, в 1901 г., у Новой Персея были обнаружены особенности, которые следовало объяснить таким же образом. В то время как почти все линии показывали весьма большие изменения длины волны, линия K была узкой, неизменного вида и указывала на постоянную скорость $+7$ км/сек. В дальнейшем было открыто много других звёздных спектров, имеющих независимые от звезды линии кальция. Особенно показательными являются спектрально двойные звёзды, обладающие большими изменениями радиальной скорости. Например, в 1909 г. Слайфер сообщил о β Скорпиона, у которой колебания радиальной скорости составляют 240 км/сек, но линия K узкая и стабильная. Всё это доказывало наличие ионизированного кальция во всём мировом пространстве. В дальнейшем было показано, что в спектрах более удалённых от нас звёзд линии Ca^+ выражены сильнее.

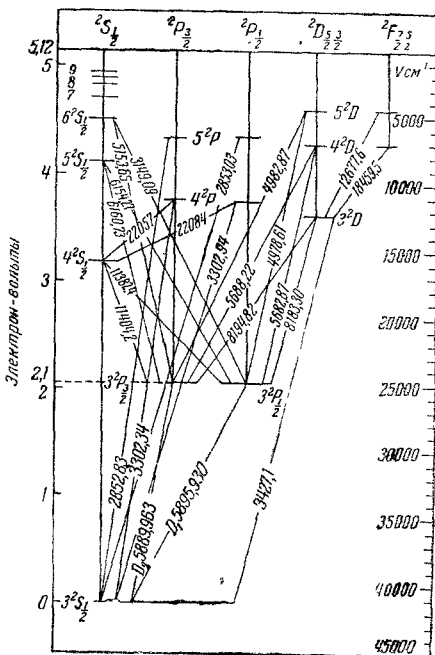
В течение 15 лет линии Ca^+ были единственными, межзвёздное происхождение которых представлялось несомненным: В 1919 г. Иегер (Miss Heger) установила наличие линий нейтрального натрия дублет 5890 и 5896 . Позже Адамс и Дюнгом открыли ультрафиолетовые линии натрия $3302,38 \text{ \AA}$ и $3302,98 \text{ \AA}$ (второй дублет главной серии, см. схему уровней натрия на рис. 17). Они же открыли линии ионизированного титания. Дюнгом открыл линию нейтрального калия $7699,01 \text{ \AA}$ (одна из линий первого дублета главной серии, другая составляющая которого маскируется теллурической полосой A).

Наконец, открыты линии, отождествить которые не удаётся. Эти линии имеют другой характер, чем ранее указанные: они широкие.

Вероятно, каждая из них является головной у неразрешённой полосы. Подобный вид линий заставляет думать о молекулярных спектрах; делались попытки отождествления, но пока без определённых результатов. Была высказана мало вероятная гипотеза о микроскопических кристалликах, которые, при весьма низкой температуре мирового пространства (по подсчётам, чёрное тело, помещённое в межзвёздное пространство, имело бы температуру 3°K), обладают полосами поглощения, похожими на указанные (Вегад).

Что касается атомов Na и Ca, то, согласно измерениям, они распределены равномерно по всей галактике — интенсивность линий в спектрах различных звёзд увеличивается правильным образом с расстоянием до звёзд⁴⁶. Распределение в пространстве атомов Na примерно такое же, как в Ca^+ . Абсолютная величина поглощения натрием представляется несколько большей, чем у Ca^+ . Их скорости относительно Солнца невелики; они меньше, чем у многих звёзд. Общее количество атомов Na ничтожно мало. Поглощение света межзвёздным натрием примерно такое же, как у слоя паров Na толщиной 0,01 мм при атмосферном давлении. Если вообразить этот слой расширяющимся вдоль цилиндра единичного сечения до тех пор, пока его толщина не достигнет нескольких тысяч парсек, то можно составить наглядное суждение о концентрации атомов натрия в межзвёздном пространстве. Из динамических соображений можно оценить верхний предел плотности межзвёздной материи: он получается равным 10^{-24} г/см^3 . В составе этой материи, содержащей различные элементы, доля натрия не должна быть большой. Исходя из этих данных, можно попытаться сделать грубую оценку того количества натрия, которое могло бы скопиться в земной атмосфере путём случайных встреч Земли с атомами Na при её движении в мировом пространстве.

Считая плотность межзвёздного натрия равной 10^{-26} г/см^3 , получаем 10^{11} атомов Na на 1 км^3 . Площадь поперечного сечения Земли (с атмосферой) составляет примерно 10^8 км^2 , а длина земной ор-



биты 10^9 км. Таким образом, за 1 год Земля встретит на своём пути 10^{28} атомов Na. Считая длительность жизни Земли (после появления атмосферы) 10^8 лет, получаем всего 10^{36} атомов, или 10^{19} атомов над каждым см^2 земной поверхности. Конечно, возможно, что лишь малая часть этого количества натрия сохраняется в атмосфере. В § 9, где мы будем рассматривать вопрос об абсолютных измерениях интенсивности D-линий натрия в ночном и сумеречном небе, будет показано, что, вообще говоря, количества натрия такого порядка достаточны для объяснения наблюдаемой яркости свечения.

Другая гипотеза, предполагающая веземное происхождение натрия в атмосфере, была высказана Кабанном, Дюфэ и Гози, которые считают, что натрий в стратосфере не может иметь земного происхождения, поскольку представляется невероятным, чтобы сам натрий или вещества, содержащие натрий (например, NaCl) могли бы проникнуть из тропосферы до высот порядка 100 км. По их мнению, натрий в высоких слоях атмосферы имеет происхождение за счёт метеоров и космической пыли, постоянно влетающих в атмосферу^{21,24}.

Возражения против такого предположения были высказаны Бернаром. Вот что пишут по этому поводу Дежарден и Бернар³⁶.

«Кабанн, Дюфэ и Гози считают, что жёлтая линия свечения ночного неба может возникать как свечение, сопровождающее падение метеоров и космической пыли. Эта гипотеза, уже высказанная ранее одним из нас³¹, наталкивается на отсутствие линий натрия в спектрах полярных сияний. Другими словами, является фактом, что возбуждение этой линии не имеет места как раз на тех высотах, где затухает уже большое количество метеоров. С другой стороны, эта гипотеза едва ли позволяет дать простое объяснение тому обстоятельству, что сумеречное свечение ограничено сверху высотой 60 км. Наконец, следует указать на то, что каменные метеоры, содержащие в большой пропорции MgO и иногда CaO и Al_2O_3 , относительно бедны щелочными металлами».

Заметим, что отсутствие линий натрия в спектрах полярных сияний создаёт затруднения и для гипотезы Фабри о возникновении натрия в атмосфере за счёт межзвёздного натрия.

По Бернару, более вероятным является земное происхождение атмосферного натрия⁴¹. Он указывает на возможность проникновения в верхние слои атмосферы частичек соли морского происхождения. Эти частички, будучи весьма гигроскопическими, могут служить на своём пути сквозь атмосферу ядрами конденсации для так называемых перламутровых облаков, наблюдаемых Штормером между 20 и 30 км.

Дежарден и Бернар³⁶ указывают ещё на другой возможный способ попадания натрия в атмосферу с частицами земного происхождения, а именно, за счёт вулканической деятельности. В частности, при сильных извержениях вулканов в атмосферу может выбрасываться сильно размельчённая материя, непосредственно до высот от 10 до 30 км. В результате может образовываться над большей частью земного шара весьма высокая «крыша» из крайне тонкой пыли, которая значительно

увеличивает поглощение света атмосферой на длительные промежутки времени.

Дежарден и Бернар³⁶ ссылаются на то, что, как известно (главным образом по систематическим наблюдениям Астрофизической обсерватории Смитсоновского института⁴⁷), между 1883 и 1914 гг. четырежды наблюдались длительные, от 2 до 5 лет, возмущения атмосферной прозрачности и интенсивности солнечных лучей, начинавшиеся каждый раз фазой интенсивной вулканической активности. Позволительно думать, что и помимо таких исключительных периодов вулканическая деятельность может быть постоянным источником запыления атмосферы. Но продукты извержения обычно имеют в своём составе заметные количества веществ, содержащих щелочные металлы. Глыбы, выбрасываемые при извержениях, содержат в среднем 3,8% Na_2O . Молекулы Na_2O могут в высоких слоях атмосферы диссоциировать вследствие ударов 2-го рода с метастабильными возбуждёнными молекулами азота, присутствие которых в верхних слоях атмосферы известно из спектров свечения ночного неба.

Совершенно новое предположение о происхождении натрия было высказано в 1940 г. Вегардом⁴⁴. Он считает возможным, что натрий присутствует в корпускулярном излучении Солнца и вторгается в атмосферу в результате извержений на Солнце. «Возможно, — пишет Вегард⁴⁴, — что, кроме ранее обнаруженных водородных линий, в атмосфере бывают линии натрия, также идущие от Солнца».

В связи с этим следует остановиться на появившемся в 1939 г. весьма интересном сообщении Вегарда об обнаружении им линий водорода в спектрах полярных сияний. Это открытие Вегарда имеет непосредственное отношение к двум значительным проблемам строения высоких слоёв атмосферы: о наличии в составе верхних слоёв воздуха лёгких газов и о происхождении так называемых серебристых облаков на высоте 82 км.

Ещё сравнительно недавно считали несомненным, что состав воздуха изменяется на больших высотах в сторону увеличения процентного содержания лёгких газов. По общеизвестным формулам статического равновесия атмосферы, убывание плотности газа с высотой должно происходить в атмосфере тем быстрее, чем больше молекулярный вес данного газа, и считалось, что высокие слои воздуха состоят преимущественно из водорода. Но когда была завершена в основном расшифровка линий в спектрах полярных сияний и ночного неба, то оказалось, что линий водорода не обнаруживается. Оказалось, что водорода нет в составе верхних слоёв атмосферы. Делались специальные снимки спектров с громадными экспозициями, когда даже слабые линии спектров полярных сияний были переэкспонированы, но линий водорода не было и следа.

Но в то же время некоторые обстоятельства указывали на возможность наличия водорода в высоких слоях атмосферы, хотя бы в малых количествах. Сам Вегард, который, пожалуй, больше других

занимался поисками водородных линий в спектрах полярных сияний, в 1933 г. предположил наличие водорода в верхних слоях атмосферы в связи с трактовкой возникновения серебристых облаков⁴⁸. Эти облака, наблюдающиеся иногда по ночам, находятся, согласно базисным измерениям, на столь большой высоте — 82 км, — что трудно допустить возможность проникновения в эти слои водяного пара из тропосферы. С другой стороны, поразительным является постоянство высоты серебристых облаков: всегда с большой точностью измерения дают одну и ту же высоту 80—85 км. Наличие в верхних слоях атмосферы

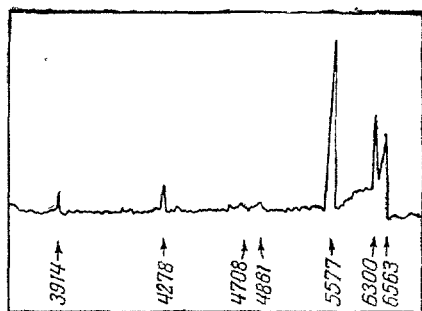


Рис. 18. Регистрограмма спектра полярных сияний, на котором впервые обнаружены линии водорода (H_α — $\lambda = 6563$ Å и H_β — $\lambda = 4861$ Å). Снято Вегардом из Осло 18 октября 1939 г.

диссоциированного (атомного) кислорода явилось основанием для предположения Вегарда, что молекулы H_2O могут образовываться путём соединения атомов О с водородом, существующим на тех высотах, если не всегда, то хотя бы временами, в периоды повышенной активности солнечной деятельности.

По этому поводу Вегард с удивительной настойчивостью продолжал «охотиться» за линиями водорода. Выгодным было фотографировать спектры полярных сияний вскоре после сильных извержений на Солнце.

Такие сроки наблюдений не встречают особых трудностей на практике, поскольку сильные извержения на Солнце, сопровождаемые вторжением мощного корпускулярного излучения Солнца в земную атмосферу, вызывают, как известно, яркие полярные сияния (а кроме того, магнитные бури и нарушения радиосвязи).

18 октября 1939 г. Вегард⁴⁹ получил в Осло спектр полярного сияния (дуги), микрофотограмма которого воспроизведена на рис. 18. Помимо наиболее интенсивных кислородных линий $\lambda = 5577$ Å и $\lambda = 6300$ Å и других характерных компонент спектров полярных сияний, на микрофотограмме отчётливо видна линия $\lambda = 6560$ Å, что в пределах ошибок измерения совпадает с водородной линией H_α ($\lambda = 6563$ Å), и другая линия 4860 Å, которая соответствует водородной линии H_β ($\lambda = 4861$ Å).

Это открытие делает весьма правдоподобным предположение Вегарда о том, что водород, иногда, в периоды повышенной солнечной деятельности, появляется в верхних слоях атмосферы, попадая туда из Солнца. Водород сохраняется недолго; он соединяется с кислородом (в виде атомов О или молекул озона), образуя молекулы водяного пара.

Указанная выше гипотеза Вегарда о солнечном происхождении натрия в атмосфере аналогична сказанному о водороде. «Возможно, — пишет Вегард ⁴⁹, — что, кроме ранее обнаруженных водородных ливней, в атмосфере бывают ливни натрия, также идущие от Солнца. Водородные ливни вместе с натрием и атмосферным кислородом могут быть причиной серебристых облаков».

9. АБСОЛЮТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЯРКОСТИ ЖЁЛТОЙ ЛИНИИ

Абсолютные измерения были выполнены как для жёлтой линии ночного неба (Кабанн-Дюфэ-Гози ^{21, 24}, 1938 г.), так и для жёлтой линии сумеречного неба (Брикар-Кастлер ⁴⁰, 1943 г.). Наиболее интересный вопрос, который можно было бы попытаться разрешить на основании результатов абсолютных измерений яркости, состоит в определении количества атомного натрия в атмосфере. С этой точки зрения особенно существенными являются сумеречные измерения. Как мы видели в § 7, для ночного свечения натрия было указано 3 различных механизма возбуждения: электронные удары, удары 2-го рода и свечение при полёте метеоров. Ни в одном из этих случаев мы не знаем ни светового выхода свечения, ни интенсивности возбуждающего фактора, и определение абсолютного числа атомов Na, участвующих в процессе, невозможно.

Другое дело — сумеречное свечение натрия. Правда, и здесь возможны 2 разных способа возбуждения (оба под действием солнечного света): оптический резонанс и фотодиссоциация с получением возбуждённых атомов Na. Но для одного из них (резонансное свечение) могут считаться достаточно надёжно известными и световой выход и интенсивность возбуждающих солнечных лучей. Таким образом, только в этом случае мы можем непосредственно оценить количество атомов Na, участвующих в атмосферном свечении. Кроме того, недавно полученные данные делают достоверным, что возбуждение сумеречного свечения натрия происходит путём оптического резонанса (см. § 12).

Брикар и Кастлер ⁴⁰ фотографировали на одну и ту же спектрограмму при неизменном расположении аппаратуры спектр сумеречного неба и спектр натриевой лампы Филиппа (лампа Philips Philora), при фиксированном режиме питания. Для получения нужного ослабления света этой лампы она помещалась внутри светонепроницаемой камеры с круглым отверстием в 2 мм, через которую освещалась белая рассеивающая поверхность (бумага с альбедо 0,8 и магниевый экран с альбедо 0,99) на расстоянии 2,37 м. Освещённость белой поверхности, по измерениям с помощью эталонной лампы, в этих условиях (для белой бумаги) оказалась равной $E = 3,72 \cdot 10^{-6}$ фот, что соответствует яркости

$$B = 0.8 \frac{E}{\pi} = 0,96 \cdot 10^{-6} \text{ свечи/см}^2.$$

При фотографировании этого экрана с экспозицией 2 минуты на многочисленных спектрограммах получалась D -линия в 4 раза более интенсивная, чем она же в спектре сумерек (при зенитном расстоянии $6^{\circ}30' - 7^{\circ}$) с той же экспозицией.

При сравнении интенсивности в этих условиях есть одна трудность: жёлтая линия в спектре сумеречного неба получается на фоне яркого сплошного спектра, а от натриевой лампы получается изолированная линия, без фона. Брикар и Кастлер⁴⁰ обратили на это внимание. Они сообщают, что «мы изучили действие переменного непрерывного фона на почернение линии D лампы Philora», но каких-либо дальнейших данных об этом довольно тонком экспериментальном вопросе они не сообщают.

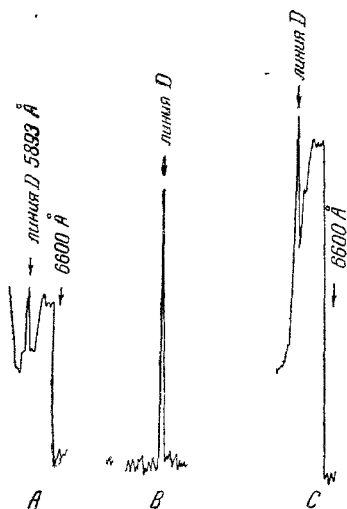


Рис. 19. Сравнение яркости D -линии сумеречного неба с яркостью D -линии натриевой лампы. A — регистрограмма спектра неба; B — то же для натровой лампы; C — то же для натровой лампы + непрерывный спектр.

Результаты своих съёмок Брикар и Кастлер иллюстрируют микрофотограммами, воспроизведёнными на рис. 19. Здесь A — микрофотограмма спектра сумеречного неба 29 октября 1943 г., экспозиция 2 минуты; B — микрофотограмма спектра лампы Philora, экспозиция 2 минуты; C — лампа Philora + непрерывный спектр, экспозиция 2 минуты.

Из этих измерений получается, что яркость жёлтой сумеречной линии натрия равна

$$B = 0,24 \cdot 10^{-6} \text{ свечи/см}^2, \text{ или } \text{фот/стерадиан}.$$

Для длины волны $\lambda = 0,59 \mu$ яркость 10^{-6} свечи/см² соответствует испускательной способности

$$2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{эрг}}{\text{сек} \cdot \text{см} \cdot \text{стерадиан}}.$$

Таким образом, энергетическая яркость жёлтой линии составляет

$$B' = 0,48 \cdot 10^{-2} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стерадиан}.$$

Эта яркость соответствует моменту максимальной интенсивности жёлтой линии в сумеречном небе (погружение Солнца под горизонт от $6^{\circ}30'$ до 7°). С течением времени яркость, как известно, быстро падает.

Для яркости жёлтой линии в спектрах свечения ночного неба Кабани, Дюфэ и Гози получили ^{21,24}

$$B_n = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стерадиан},$$

что почти в тысячу раз меньше сумеречного значения.

Измеренная яркость жёлтой линии в сумеречном небе соответствует от $1 \cdot$ до $2 \cdot 10^{10}$ переходов ${}^2P \rightarrow {}^2S$ (см. схему уровней атомов Na, рис. 17). Эта величина измерена в участке неба на высоте 22° от горизонта. Считая, что в зените яркость в 2 раза меньше и что отношение интенсивностей $D_2:D_1$ равно 2, Брикар и Кастлер окончательно получили:

$$B_1 = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стерадиан} \text{ для линии } D_1,$$

$$B_2 = 1,6 \cdot 10^{-8} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{стерадиан} \text{ для линии } D_2.$$

Теперь у нас есть достаточно данных для определения числа атомов натрия, участвующих в излучении жёлтой линии во время сумерек.

10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА НАТРИЯ В АТМОСФЕРЕ

Яркость резонансного свечения пропорциональна интенсивности возбуждающего света. Для определения количества атмосферного натрия по известной уже нам яркости его свечения необходимо знать интенсивность солнечных лучей длины волны $\lambda = 0,59 \mu$, освещающих высокие слои воздуха во время сумерек.

Согласно Унсолду ⁵⁰, испускательная способность Солнца в интервале длин волн $\Delta\lambda = 1 \text{ см}$ в области $\lambda = 0,59 \mu$ составляет

$$F_\lambda = 27 \cdot 10^{14} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^3.$$

На расстоянии Земля — Солнце внеатмосферное значение энергетической освещённости равно

$$E_\lambda = F_\lambda \cdot \omega = \pi F_\lambda \left(\frac{R}{r} \right)^2 = 1,92 \cdot 10^{10} \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^3$$

для интервала $\Delta\lambda = 1 \text{ см}$. Здесь ω — телесный угол, под которым мы видим Солнце, R — радиус Солнца, r — радиус земной орбиты.

Эти данные относятся к сплошному спектру Солнца в области $\lambda = 0,59 \mu$. Говоря о резонансном возбуждении D -линий солнечными лучами, мы должны учесть ещё, что в пределах ширины этих линий интенсивность солнечного излучения много меньше, так как мы имеем дело как раз с фраунгоферовыми линиями, обусловленными поглощением в солнечной атмосфере. Необходимые для введения соответствующих поправок данные мы находим в работе Аллена ⁵¹.

Определение интенсивности солнечного излучения в центре фраунгоферовых линий D_1 и D_2 может содержать большую погрешность вследствие влияния света, рассеянного внутри спектрографа (отражение

на поверхностях линз и призм). В центре линий поглощения интенсивность света составляет меньше $1/10$ интенсивности прилегающих участков сплошного спектра, и поэтому влияние паразитного света может быть особенно заметным. Для введения

Таблица 3

Интенсивность в центре натриевых D -линий и их ширина в центре и у края солнечного диска (по измерениям Аллена)

Линия	Интенсивность в центре I_0/I_0		Ширина /m Å/
	Наблюдённая	Исправленная	
D_1 /5896 Å/ центр	14,3	7,2	560
D_1 /5896 Å/ край	15,0	6,0	530
D_2 /5890 Å/ центр	11,6	6,6	770
D_2 /5890 Å/ край	12,6	6,0	740

Таблица 4

Полная ширина натриевых D -линий при различных значениях относительной интенсивности r (по данным Аллена)

r	D_1 (5896 Å)		D_2 (5890 Å)	
	Центр Солнца Å	Край Солнца Å	Центр Солнца Å	Край Солнца Å
0,10	0,08	0,08	0,10	0,10
0,20	0,16	0,14	0,20	0,19
0,30	0,23	0,20	0,30	0,27
0,40	0,31	0,26	0,41	0,35
0,50	0,39	0,33	0,52	0,45
0,60	0,48	0,43	0,67	0,59
0,70	0,62	0,57	0,87	0,80
0,80	0,82	0,80	1,15	1,12
0,85	0,98	0,97	1,38	1,38
0,90	1,23	1,23	1,70	1,75
0,95	1,73	1,73	2,4	2,5
0,98	2,5	2,5	3,5	3,7

необходимых поправок Аллен⁵¹ фотографировал тем же спектрографом спектр Солнца сразу же после восхода для получения линий поглощения паров воды, а именно, $\lambda\lambda$ 5900,048 Å, 5919,059 Å и 5919,647 Å, относительно которых известно, что в центре линии они дают полное поглощение (при почти горизонтальном прохождении луча сквозь атмосферу). Съёмка производилась 3-призменным спектрографом, дисперсия 1,5 Å/мм. Измерялось отношение интенсивности в центре линий D_1 и D_2 к интенсивности прилегающего непрерывного спектра Солнца и ширина обеих линий поглощения в центре и у края солнечного

диска. Результаты приведены в табл. 3, где приведены и наблюдаемые и исправленные интенсивности в центре линий. Из таблицы видно, что аппаратная поправка для линии D_1 почти в $1\frac{1}{2}$ раза больше, чем для линии D_2 , что обусловлено её меньшей шириной. (Пользуясь для контроля указанными выше тремя линиями поглощения паров воды, Аллен нашёл зависимость величины аппаратной поправки от ширины линии.)

Контур фраунгоферовых линий D_1 и D_2 определяется значениями полной ширины линий при различной величине отношения r интенсивности в данном месте линии к интенсивности прилегающего непрерывного спектра (табл. 4).

На основании этих данных об излучении Солнца внутри линий D_1 и D_2 и учитывая, что ширина спектрального участка, ответственного за возбуждение резонансного свечения паров натрия, составляет сотые доли Å, мы можем взять для относительной интенсивности излучения Солнца в центре линий D величину 0,07. Следовательно, мы получаем для внеатмосферной энергетической освещённости, создаваемой солнечными лучами в интересующей нас спектральной области, значение

$$E_\lambda = 0,07 \cdot 1,92 \cdot 10^{10} = 1,34 \cdot 10^9 \text{ эрг/сек} \cdot \text{см}^2$$

для интервала $\Delta\lambda = 1 \text{ см}$.

Если N — общее число атомов натрия в единице объёма, ΔN — число атомов, возбуждаемых нашим излучением за 1 сек., то, как известно,

$$\frac{\Delta N}{N} = b \cdot E_\nu,$$

где E_ν — спектральная освещённость на единицу частоты, создаваемая возбуждающим излучением, а b — вероятность возбуждения (коэффициент Эйнштейна), причём.

$$b = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{c^2}{8\pi h \nu^3}.$$

Здесь τ обозначает продолжительность жизни возбуждённого состояния, g_2/g_1 — отношение статистических весов верхнего и нижнего уровней, соответствующих данному спектральному переходу, c — скорость света, h — постоянная Планка, ν — световая частота.

Лучистый поток, соответствующий излучению единицы объёма, равен

$$W = h\nu \cdot \Delta N,$$

и сила света единицы объёма в энергетических единицах

$$I = \frac{W}{4\pi} = \frac{h\nu}{4\pi} \Delta N.$$

Наконец, яркость слоя толщиной l равна

$$B = I \cdot l = \frac{h\nu}{4\pi} \Delta N \cdot l = \frac{h\nu}{4\pi} b \cdot E_\nu \cdot N \cdot l.$$

Поскольку имеет место тождественное равенство $E_\nu \cdot |\Delta\nu| = E_\lambda \cdot |\Delta\lambda|$, мы можем написать

$$E_\nu = E_\lambda \cdot \left| \frac{d\lambda}{d\nu} \right| = E_\lambda \cdot \frac{\lambda^2}{c}$$

и

$$B = \frac{h\nu}{4\pi} \cdot b \cdot E_\lambda \cdot \frac{\lambda^2}{c} \cdot N \cdot l = \frac{1}{\tau} \frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{\lambda^4}{32\pi^2 c} \cdot E_\lambda \cdot N \cdot l.$$

Последнее выражение мы можем переписать в виде

$$B = K \cdot E_\lambda \cdot N \cdot l,$$

где K — коэффициент, численное значение которого мы можем теперь вычислить:

$$K = \frac{1}{\tau} \cdot \frac{g_2}{g_1} \cdot \frac{\lambda^4}{32\pi^2 c}.$$

Продолжительность жизни τ атомов натрия в возбуждённом состоянии 2P (см. рис. 17) хорошо известна⁵² и равна $\tau = 1,6 \cdot 10^{-8}$ сек.; $g_2/g_1 = 1$ для линии D_1 и $g_2/g_1 = 2$ для линии D_2 , для совокупности двух компонент $\sum \frac{g_2}{g_1} = 3$, следовательно,

$$K = 2,36 \cdot 10^{-22} \text{ CGS.}$$

(В работе Брикара и Кастлера⁴⁰ ошибочно указано $K = 0,93 \cdot 10^{-21} \text{ CGS.}$) Для зенита яркость D -линий равна $B = 0,24 \cdot 10^{-2} \text{ CGS}$, откуда

$$Nl = \frac{0,24 \cdot 10^{-2}}{2,36 \cdot 10^{-22} \cdot 1,34 \cdot 10^9} = 0,8 \cdot 10^{10} \text{ атомов/см}^2.$$

Это есть число атомов натрия в вертикальном столбе воздуха с поперечным сечением 1 см^2 , участвующих в излучении жёлтой линии $\lambda = 0,59 \mu$ во время сумерек. Это количество эквивалентно слою паров натрия в 1 см при плотности, равной плотности насыщенного пара Na при 115°C .

Брикар и Кастлер⁴⁰ справедливо указывают, что полученное ими число $0,8 \cdot 10^{10}$ атомов/см² является лишь нижним пределом, поскольку не учтены 2 фактора:

1. Ослабление солнечных лучей на их пути сквозь атмосферу. За этот счёт число Na, по мнению указанных авторов, может возрасти до 10^{10} .

2. Реабсорбция резонансного излучения в самом слое натрия. Вычисления Брикара и Кастлера, которые они не воспроизводят, но сообщают окончательные результаты, приводят этих авторов к выводу, что реабсорбция становится заметной лишь при $Nl > 10^{11}$. Предполагая, что температура слоя, содержащего пары натрия, составляет примерно 150°C (причём большие вариации температуры мало влияют на результаты) и, повидимому, предполагая, что контур линий D опре-

деляется эффектом Допплера (см. следующий параграф), они вычислили долю A поглощенного света при разных значениях величины N , отдельно для D_1 и D_2 . Их результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Доля поглощенного света D -линий натрия в результате самопоглощения в излучающем слое паров натрия (по данным Брикар и Кастлера)

$N \cdot 10^{-11}$	1	2	4	8
A_{D_1}	0,156	0,274	0,442	0,62
A_{D_2}	0,274	0,442	0,62	
D_2/D_1	1,72	1,54	1,36	

Поскольку линия D_2 поглощается сильнее, чем линия D_1 , эффект реабсорбции влияет на отношение интенсивностей линий D_2/D_1 . Считая, что «теоретическое» значение этого отношения — 2 (основания употреблять лишь в кавычках термин «теоретическое» значение в условиях атмосферного излучения D -линий будут указаны ниже), можно вычислить величину отношения интенсивностей D_2/D_1 с учётом искажающего влияния самопоглощения. Результаты вычислений, приведённые в последней строке табл. 5, показывают, что реабсорбция приводит к выравниванию интенсивностей D -линий.

О фактическом отношении интенсивностей D_2/D_1 в атмосферном излучении мы знаем лишь по качественным оценкам интенсивностей интерференционных колец, на основании которых и Бернар^{18, 19, 20} и Кабанн-Дюфэ-Гоци²¹ сообщали, что «отношение интенсивностей D_2/D_1 близко к теоретическому значению 2».

В связи с этим следует напомнить, что теоретически значение 2 получается лишь в том случае, если интенсивность возбуждающего света одинакова для обеих линий D . Однако фотометрирование фраунгоферовых D -линий в спектре Солнца, выполненное Алленом (см. табл. 3 и 4), указывает на некоторое их различие. Кроме того, как мы увидим в дальнейшем, в области длин волн D -линий имеется поглощение парами воды, которое является переменным (зависящим от состояния атмосферы). Брикар и Кастлер вычислили теоретическое значение отношения интенсивностей D_2/D_1 в условиях резонансного излучения атмосферного натрия и нашли его равным 2,5.

Табл. 5 показывает, что для значений N около 10^{11} становится заметным поглощение атомами натрия пучка солнечных лучей, возбуждающего свечение, поскольку этот пучок наклонно пересекает натриевый слой до того, как он может попасть в визируемый участок неба.

Если наблюдения дают для фактического отношения интенсивностей D_2/D_1 значение 2, близкое к теоретическому, то это указывает

на то, что самопоглощение не играет заметной роли ни в падающем пучке возбуждающих солнечных лучей, ни в пучке свечения на его пути к наблюдателю. Но для окончательных выводов подобного рода необходимо располагать результатами точных измерений отношения интенсивностей D_2/D_1 . Всё же представляется правдоподобным предполагать, что число N вряд ли может достигать значения 10^{11} . Значение $N=10^{10}$ может быть принято как близкое к действительности, с достаточной уверенностью в правильности порядка величины. Открытым остаётся лишь вопрос о возможном тушении резонансной флюоресценции паров натрия. Этот фактор пока не принимался во внимание в работах по исследованию свечения натрия, но известные из лабораторных опытов с тушением свечения паров натрия посторонними газами факты указывают на возможность большого влияния этого фактора^{52, 53, 56, 57}.

11. ШИРИНА *D*-ЛИНИЙ ИЗЛУЧЕНИЯ НЕБА И ВОПРОС О ПРИРОДЕ СВЕЧЕНИЯ

В 1939 г. Франк и Рик⁵⁸ рассмотрели процесс фотодиссоциации молекул NaCl с образованием возбуждённых атомов Na и показали, что если свечение атмосферного натрия возникает этим путём (фотодиссоциация молекул NaCl ультрафиолетовыми лучами Солнца), то должно иметь место значительное уширение *D*-линий. Рассмотрим несколько ближе этот вопрос, но попутно отметим, что Франк (Джемс Франк) и Рик считают⁵⁸ «наиболее вероятным источником натрия в атмосфере процесс испарения NaCl из морской воды, хотя несколько сомнительным^{41, 59, 60} является механизм диссоциации NaCl на высотах более 60 км».

В лабораторных условиях удавалось наблюдать резонансное свечение щелочных металлов при освещении щелочно-галлоидных соединений ультрафиолетовыми лучами⁶¹. Этот процесс включает в себя фотодиссоциацию на нормальный атом галлоида и возбуждённый атом щелочного металла. В подобных условиях наблюдается излучение *D*-линий свободных атомов Na в концентрациях, не дающих измеримого поглощения (с подобными концентрациями мы имеем дело в атмосферных условиях). Спектр поглощения щелочно-галлоидных молекул непрерывный, с несколькими максимумами поглощения. Первые 2 максимума (со стороны длинных волн) соответствуют диссоциации молекулы на нормальный атом щелочного металла, и на нормальный и возбуждённый атом галлоида. Последующие максимумы относятся к диссоциации с образованием нормального атома галлоида и атома щелочного металла в первом, втором и т. д. возбуждённом состоянии. Например, для CsJ установлено 6 максимумов, частоты которых соответствуют атомам иода ${}^2P_{1/2} - {}^2P_{3/2}$ и цезия $2P-1S$, $3D-1S$, $2S-1S$ и $3P-1S$.

Для NaCl наблюдается всего лишь 2 первых максимума (у 2370 Å и 2320 Å). Максимум, соответствующий *P*-состоянию натрия, лежит за пределами области, исследуемой в лабораторных условиях, повидимому, около 1700 Å, как это можно вычислить, прибавляя 16 950,

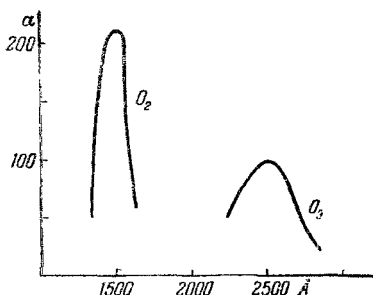


Рис. 20. Спектр поглощения кислорода O_2 и озона O_3 в ультрафиолетовой области.

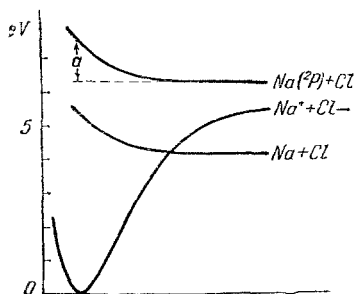


Рис. 21. Потенциальные кривые молекулы NaCl. По оси абсцисс — расстояние между ядрами, по оси ординат — энергия в электрон-вольтах.

волновое число *D*-линии, к волновому числу 42 190, соответствующему первому максимуму поглощения NaCl у $\lambda = 2370$ Å. Область поглощения должна простираться на 200 — 300 Å в сторону длинных волн.

Таким образом, область спектра, относящаяся к фотодиссоциации NaCl с получением возбужденных атомов натрия лежит как раз в «атмосферном просвете», образуемом поглощением озона и поглощением молекулярного кислорода (см. рис. 20).

На рис. 21 показаны потенциальные кривые для NaCl (по оси абсцисс отложено расстояние между ядрами, по оси ординат — энергия в электрон-вольтах). Из этих кривых можно видеть, что обсуждаемая фотодиссоциация молекул NaCl связана с избытком энергии порядка 1 eV (*a* на рис. 21). В момент образования атомов Na и Cl при фотодиссоциации возникают силы взаимного отталкивания между атомами, и атомы разлетаются, приобретая избыточную кинетическую энергию. Большая величина избытка энергии (порядка 1 eV) должна приводить к значительному уширению *D*-линий. Подобный результат для молекул NaCl является предположительным, но для других щелочно-галлоидных молекул он наблюдался в лабораторных условиях^{54, 55} (например, для NaJ).

Дальнейшее рассмотрение вопроса показывает, что уширение *D*-линий может явиться крайне важным признаком для суждения о механизме возбуждения свечения атмосферного натрия. Дело в том, что в случае возбуждения желтого натрового атмосферного излучения путём ударов 2-го рода (см. § 7) получается избыток энергии порядка

$1/10$ eV, что должно приводить к гораздо меньшему, но ещё весьма заметному уширению^{45, 65}. Наконец, при оптическом резонансе линии должны быть узкими. Таким образом, измерение ширины D -линий в излучении неба могло бы позволить определить, какой из трёх процессов ответственен за свечение:

1. Фотодиссоциация — весьма большое уширение (избыток энергии порядка 1 eV).

2. Удары 2-го рода — большое уширение (избыток энергии порядка $1/10$ eV).

3. Оптический резонанс — узкие линии (термическая энергия — доплерово уширение — порядка $1/100$ eV).

Но как можно было бы измерить ширину D -линий в спектре неба, если для фотографирования спектров приходится пользоваться спектрографами с крайне малой дисперсией, на которых самое определение длины волны линии возможно лишь с ошибкой нескольких Å?

Ещё в 1938 г. Кастлер указал простой и эффективный метод изучения структуры (ширины) D -линий в излучении неба путём измерения её поглощения в кювете, содержащей пары натрия, температура и плотность которой изменяются нужным образом⁶⁶. В 1939 г. Франк и Рик⁵⁸ указали на этот же способ для проверки изложенных выше соображений об уширении D -линий при возбуждении свечения атмосферного натрия путём фотодиссоциации молекул NaCl. Вскоре после этого Карио и Стилл анонсировали, что они производят подобные измерения, но каких-либо результатов они так и не сообщили⁶⁶.

В 1940 г. Кастлер опубликовал первые результаты подобных измерений⁶⁷. В дальнейшем он продолжил эти исследования совместно с Брикарм. Их результаты, опубликованные в 1944 г., оказались весьма важными и интересными⁴⁰.

К изложению этих опытов мы сейчас и переходим.

12. ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ D -ЛИНИЙ НЕБА ПАРАМИ НАТРИЯ

Для своих опытов Брикар и Кастлер⁴⁰ употребляли знаменитый французский светосильный спектрограф, сконструированный Кожаном. Это однопризменный спектрограф $F:0,7$; призма из тяжёлого флинта $n_D = 1,6803$ с углом 60° имеет очень большие размеры: 12 см высоты. Такой же большой поперечник имеет объектив камеры $F:0,7$, так что дисперсия спектрографа сравнительно большая: 650 Å/мм в жёлтой области. Спектрограф был установлен на обсерватории Пик дю Миди на высоте 2900 м. Спектры сумеречного неба фотографировались и при заходе и при восходе Солнца в точке неба вблизи Полюса Мира: на высоте 22° над горизонтом в направлении на Север. Спектры фотографировались с экспозицией от долей минуты до нескольких минут.

Перед щелью спектрографа монтировалась кювета C_1 с плоскопараллельными окошками на расстоянии e друг от друга (рис. 22),

содержащая пары натрия в количестве, достаточном для частичного поглощения D -линии неба.

Обозначим через I_0 интенсивность лучей, входящих в кювету C_1 , I — интенсивность выходящих лучей. Отношение $R = \frac{I}{I_0}$ [Брикар и Кастлер называют фактором редукции, а выражение $A = \frac{I_0 - I}{I_0} = 1 - R$ — долей поглощения.

Для определения R и A нужно знать величину I и I_0 , для измерения которых необходимо исключить интенсивность i непрерывного фона спектра неба, изменяющего почернение, даваемое линией на спектрограмме. Вследствие быстрого изменения яркости неба во время сумерек все определения следует делать одновременно, делая снимки на одну и ту же пластинку. Интенсивность фона i необходимо знать точно для того же места, где располагается линия D . Для этого спектр неба одновременно фотографировался сквозь вторую кювету C_2 , упругость паров натрия в которой была достаточной, чтобы гарантировать полное поглощение D -линий. Всего на каждой пластинке фотографировалось одновременно 3 спектра:

- а) Спектр неба сквозь кювету C_1 , в которой D -линия поглощается лишь частично; почернение соответствует сумме интенсивностей $I + i$.
- б) Спектр неба сквозь контрольную кювету C , составленную из двух таких же пластин (окошек), как и у кюветы C_1 , но без паров натрия (для учёта ослабления лучей из-за отражения на поверхности пластин у входа и выхода кювет C_1 и C_2); почернение соответствует сумме интенсивностей $I_0 + i$.
- в) Спектр неба сквозь кювету C_2 , создающую полное поглощение D -линии; почернение соответствует лишь интенсивности непрерывного спектра i .

Расположение трёх кювет было таким, что их изображения, даваемые линзой, располагались на щели спектрографа так, как это показано на рис. 23. Электрические печи, окружавшие кюветы и служившие для поддержания необходимой температуры паров натрия, имели обмотки со встречными витками (рис. 24), для устранения магнитного поля тока, которое могло бы изменить абсорбционные свойства паров натрия из-за эффекта Зеемана. Общий вид установки Брикара и Кастлера показан на фотографии (рис. 25). В кюветах C_1 и C_2 упругость паров натрия задавалась температурой θ_1 и θ_2 их отростков, в то время как сама кювета C_1 (см. рис. 22) имела более высокую температуру θ_0 , чтобы исключить осаждение натрия на окош-

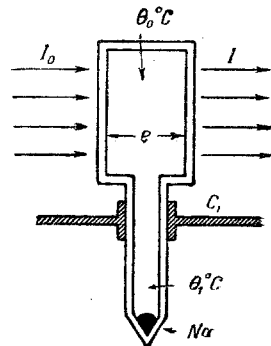


Рис. 22. Кювета с парами натрия для опытов с поглощением D -линий неба.

ках кюветы. От времени до времени делались контрольные снимки неба, во время которых не производилось нагрева кювет (упругость паров натрия практически равна нулю); это делалось для того, чтобы

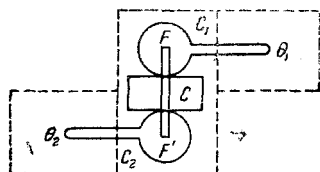


Рис. 23. Схема расположения кювет относительно щели спектрографа.

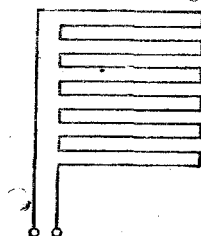


Рис. 24. Схема обмотки печей.

убедиться, что установка работает правильно и на всех трёх одновременно фотографируемых спектрах яркость D -линии одинакова.

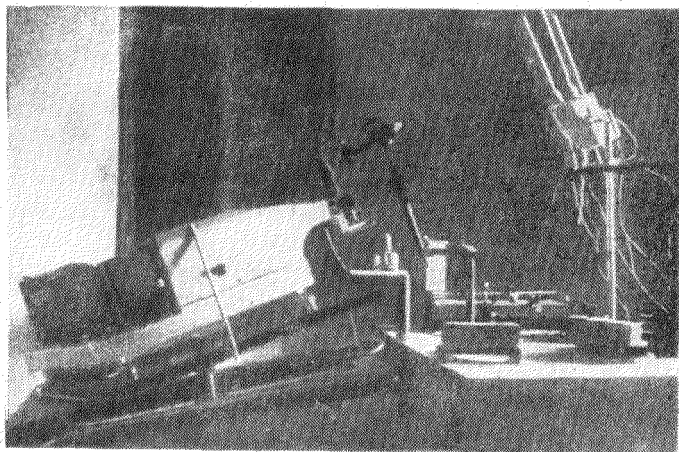


Рис. 25. Общий вид установки Брикара и Кастлера для опытов с поглощением D -линий неба парами натрия (1944 г.).

На рис. 26 воспроизведены микрофотограммы одной из троек одновременных спектров сумеречного неба, снятых вечером 20 марта 1944 г. Почернение для линии D на средней микрофотограмме (пустая кювета C) несколько больше, чем на верхней (кювета C_1). На нижней микрофотограмме линии D нет (кювета C_2 с полным погло-

щением). На рис. 27 приведены микрофотограммы аналогичной тройки контрольных спектров, снятых утром 21 марта 1944 г. В этом случае все кюветы оставались ненагретыми: почернение для линии D на всех трех спектрах одинаково.

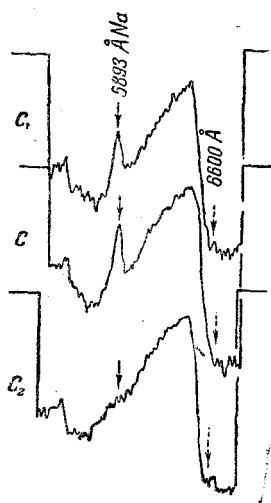


Рис. 26. Регистрограмма спектров неба, снятых одновременно сквозь кюветы с различной плотностью паров натрия.

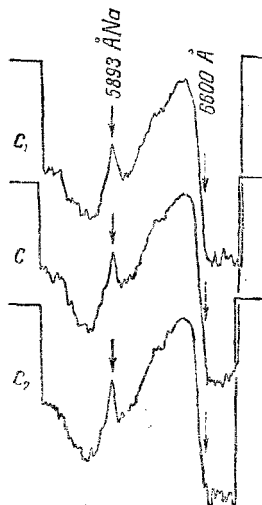


Рис. 27. Регистрограмма контрольных спектров, снятых одновременно сквозь 3 холодные кюветы.

Прежде чем переходить к изложению полученных результатов, рассмотрим теорию метода. Можно теоретически рассчитать поглощение резонансного излучения одноатомных паров при прохождении излучения через слой тех же паров, принимая контур линий поглощения и излучения чисто доплеровским^{40, 52}.

Обозначим через K_ν коэффициент поглощения, соответствующий излучающим атомам. Интенсивность излучения i_ν , согласно закону Кирхгоффа, пропорциональна K_ν

$$i_\nu = c \cdot K_\nu.$$

Полная интенсивность излучения равна

$$I_0 = \int_0^\infty i_\nu d\nu = c \int_0^\infty K_\nu d\nu.$$

Пусть k , обозначает коэффициент поглощения, соответствующий температуре поглощающего слоя, и l — толщину этого слоя. Интен-

сивность лучей в спектральном интервале $d\nu$, прошедших сквозь слой, равна, по определению, $i_\nu e^{-k_\nu l} d\nu$, а полная интенсивность лучей после прохождения сквозь слой будет

$$I = \int_0^\infty i_\nu e^{-k_\nu l} d\nu = c \int_0^\infty K_\nu e^{-k_\nu l} d\nu.$$

Фактор редукции

$$R = \frac{\text{интенсивность прошедшего света}}{\text{интенсивность падающего света}} \text{ будет}$$

равен

$$R = \frac{I}{I_0} = \frac{\int_0^\infty K_\nu e^{-k_\nu l} d\nu}{\int_0^\infty K_\nu d\nu}.$$

Доля поглощённого света определяется отношением

$$A = \frac{I_0 - I}{I_0} = \frac{\int_0^\infty K_\nu (1 - e^{-k_\nu l}) d\nu}{\int_0^\infty K_\nu d\nu}.$$

Считая контур линий чисто доплеровским, мы можем написать для K_ν и k_ν

$$K_\nu = K_0 e^{-\left[\frac{\beta(\nu - \nu_0)}{\sqrt{T_e}}\right]^2},$$

$$k_\nu = k_0 e^{-\left[\frac{\beta(\nu - \nu_0)}{\sqrt{T_a}}\right]^2},$$

где K_0 и k_0 суть коэффициенты поглощения в центре линий излучения и поглощения, T_e — абсолютная температура излучающих паров, T_a — абсолютная температура поглощающих паров и

$$\beta = \lambda \sqrt{\frac{M}{2R}},$$

где λ — длина световой волны, M — масса атома, R — универсальная газовая постоянная.

Полагая

$$a = \sqrt{\frac{T_e}{T_a}} \text{ и } \omega = \frac{\beta(\nu - \nu_0)}{\sqrt{T_a}},$$

можно переписать выражение для A в виде

$$A_\alpha = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} (1 - e^{k_0 l e^{-\omega^2}}) d\omega}{\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\left(\frac{\omega}{\alpha}\right)^2} d\omega}.$$

A_α является функцией от $\alpha = \sqrt{\frac{T_e}{T_a}}$ и от $k_0 l$.

Таблицы численных значений этой функции приведены в книге Митчелла и Земанского⁵² для α от 0 до 3 и $k_0 l$ от 0 до 4,5.

Коэффициент поглощения k_0 в центре линии даётся выражением

$$k_0 = \frac{2e^2 \lambda}{mc} \frac{Nf}{q},$$

где e и m — заряд и масса электрона, c — скорость света, λ — длина световой волны, так что для D — линии натрия $\frac{2e^2 \lambda}{mc} = 0,99 \cdot 10^{-6}$; N — число атомов в 1 см^3 поглощающих паров; оно определяется из давления и температуры паров; q — средняя квадратичная скорость теплового движения атомов, зависящая от температуры поглощающих паров:

$$q = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{RT_0}{M}} = 3,04 \cdot 10^7 \sqrt{T_0}.$$

Величина f есть «сила осциллятора». Она связана с продолжительностью жизни возбуждённого состояния соотношением

$$f\tau = \frac{mc}{8\pi^2 e^2} \frac{g_2}{g_1} \lambda^2 = 1,51 \frac{g_2}{g_1} \lambda_0^2.$$

Формулу для A_α следует применять отдельно для каждой из двух линий D_1 и D_2 . «Сила осциллятора» равна

$$f_1 = 0,33 \text{ для составляющей } D_1 \left(\frac{g_2}{g_1} = 1 \right),$$

$$f_2 = 2f_1 = 0,67 \text{ для составляющей } D_2 \left(\frac{g_2}{g_1} = 2 \right).$$

Поэтому $(k_0 l)_{D_2} = 2 (k_0 l)_{D_1}$.

Для окончательных вычислений поглощения света слоем паров натрия, производимого совокупностью обеих D -линий, необходимо знать первоначальное отношение их интенсивностей. Брикар и Кастлер⁴⁰ брали теоретическое значение $\frac{D_2}{D_1} = 2$. Строго говоря, измерения

поглощения необходимо сопровождать непосредственным измерением

интенсивностей $\frac{D_2}{D_1}$ в свете неба; это можно было бы осуществлять путём одновременного фотографирования интерференционных колец (разделить D -линии путём фотографирования спектрографом в сумеречном свете невозможно, так как необходимый для этого спектрограф с большой линейной дисперсией неизбежно имел бы недостаточную светосилу).

Отсутствие подобных контрольных измерений отношения интенсивностей $\frac{D_2}{D_1}$ делает результаты, полученные Брикаром и Кастлером, лишь предварительными. Кроме того, изложенная выше теория предполагает каждую из линий D_1 и D_2 простой. Между тем известно, что атомы натрия обладают ядерным спином $3/2$ и поэтому каждая из двух D -линий имеет сверхтонкую⁶⁸ структуру и состоит из двух компонент, расстояние между которыми имеет порядок доплеровской ширины: оно равно $0,02\text{\AA}$. Вследствие этого компоненты перекрывают друг друга и частично поглощают друг друга, так что точное вычисление функции A_λ является весьма сложным. Но в действительности задача упрощается на основании результатов точного экспериментального исследования реабсорбции резонансной линии D парами натрия, полученными в лабораторных условиях Цеденом⁶⁸. Этот автор показал, что всё происходит так, как если бы сверхтонкой структуры D -линий не существовало, но вместо «истинных» значений f действуют «эффективные» значения f' :

$$f'_1 = \frac{4}{5} f_1 = 0,267 \text{ для } D_1,$$

$$f'_2 = \frac{4}{5} f_2 = 0,532 \text{ для } D_2.$$

Остаётся определение N в зависимости от давления паров натрия. Согласно кинетической теории $N = \frac{p}{kT}$, где давление p выражено в барах и $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ есть константа Больцмана. Данные о давлении паров натрия собраны и обсуждены в работе Тиле⁶². Но там мы не находим результатов непосредственных измерений для температур ниже 182°C . Измерения при более низких температурах были выполнены Эдмондсоном и Эгертоном⁶⁹, а также Родебушем и Деврие⁷⁰. Эти результаты могут быть представлены формулой

$$\log p = -\frac{5400,0}{T} + 7,5510 \text{ мм Hg.}$$

Доля молекул Na_2 при температурах менее 200°C составляет меньше $0,10^{-6}$ и является пренебрежимой.

Результаты вычислений собраны в табл. 6.

Таблица 6

Давление насыщенных паров натрия и их плотность в зависимости от температуры

Температура в °С	Абсолютная температура в °К	p в мм Hg	N	Температура в °С	Абсолютная температура в °К	p в мм Hg	N
127	400	$1,125 \cdot 10^{-6}$	$2,73 \cdot 10^{10}$	162	435	$1,371 \cdot 10^{-5}$	$3,06 \cdot 10^{11}$
132	405	1,648	3,95	167	440	1,897	3,96
137	410	2,399	5,67	172	445	2,606	5,68
142	415	3,460	8,10	177	450	3,556	7,65
147	420	4,943	$1,14 \cdot 10^{11}$	182	455	4,820	$1,03 \cdot 10^{12}$
152	425	6,998	1,60	187	460	6,486	1,37
157	430	9,840	2,22	192	465	8,670	1,81
				197	470	$1,151 \cdot 10^{-4}$	2,38

Таковы те экспериментальные условия и теоретические предположки, при которых выполнялись исследования поглощения D -линий неба парами натрия. Благодаря тому, что резонансное излучение паров натрия в течение длительного времени являлось излюбленным объектом исследований физиков, мы располагаем в отношении этого излучения на редкость полными данными, позволяющими, в применении к атмосферному излучению натрия, обеспечить достаточно строго количественную сторону исследований.

Первоначальный результат, полученный Брикаром и Кастлером⁴⁰, состоит в следующем: поглощение D -линий, излучаемых сумеречным небом, является практически полным при толщине поглощающего слоя паров натрия 10 мм и температуре паров 180°С. В этих условиях фактор редукции $R = \frac{I}{I_0}$, несомненно, меньше чем 0,1. Из этого

можно заключить о верхнем пределе «полуширины» D -линий излучения неба: она меньше «полуширины», обусловленной эффектом Допплера при температуре 1000°К и составляет 0,03 Å. D -линии излучения неба столь узкие, что гипотеза оптического резонанса представляется весьма правдоподобной.

Последующие измерения Брикара и Кастлера позволили значительно уточнить этот результат. Они уменьшали упругость паров в поглощающей кювете C_1 , что достигается уменьшением температуры θ_1 отростка кюветы (см. рис. 22); в этом случае имеет место лишь частичное поглощение света, что позволяет более точно определять остаточную интенсивность.

В табл. 7 приведены результаты обработки серии снимков, полученных Брикаром и Кастлером в январе 1944 г. при фотографировании во время утренних сумерек⁴⁰. Снимки расположены в порядке

возрастания температуры θ_1 . Напомним, что θ_1 — температура отростка поглощающей кюветы C_1 (см. рис. 22), θ_0 — температура самой кюветы, C_1 , θ_2 — температура отростка кюветы C_2 , обеспечивающей полное поглощение D -линии неба.

Таблица 7

Измерение фактора редукции $R = \frac{I}{I_0}$ при поглощении D -линий неба в зависимости от упругости (температуры) поглощающих паров натрия (по данным Брикар и Кастлера)

Дата снимка	Температура			№ спек- тра	Экспозиция	R
	θ_0	θ_2	θ_1			
31.1.44	224 °C	213 °C	145,5 °C	№ 1	17,5 мин.	0,54
				№ 2	2,5 мин.	0,54
						Среднее 0,54
30.1.44	217	212	151	№ 1	17,5 мин.	0,52
				№ 2	2,5 мин.	0,45
				№ 3	1,5 мин.	0,55
				№ 4	1,5 мин.	0,48
						Среднее 0,50
27.1.44	220	210	152,5	№ 1	17,5 мин.	0,47
				№ 2	1,5 мин.	0,44
						Среднее 0,455
19.1.44	226	208	156	№ 1	10 мин.	0,39
				№ 2	2,5 мин.	0,42
				№ 3	1,5 мин.	0,40
						Среднее 0,403
28.1.44	223	210	160,5	№ 1	17,5 мин.	0,21
				№ 2	2,5 мин.	0,21
						Среднее 0,21

Эти результаты указывают на закономерное возрастание фактора редукции R при повышении температуры θ_1 , которая регулирует давление поглощающих паров. Брикар и Кастлер указывают, что лучшими являются снимки 30.1.44 и 19.1.44 (остальные снимки несколько недоэкспонированы). На основании этих двух снимков можно вывести наиболее надёжные данные:

$$\begin{array}{lll} 30.1.44 & \theta_1 = 156^\circ\text{C} & k_0 l = 0,77 \quad R = 0,403, \\ 19.1.44 & \theta_1 = 151^\circ\text{C} & k_0 l = 0,57 \quad R = 0,500. \end{array}$$

Вычисления по вышеуказанным формулам дают для $\alpha = \sqrt{\frac{T_e}{T_a}}$ значение около 0,7. Так как $T_a = 273 + \theta_0 = 480^\circ\text{K}$, то получается

$$T_e = 240^\circ\text{K}.$$

Таким образом, линии натриевого излучения неба во время утренних сумерек оказываются весьма узкими, их полуширина соответствует доплерову уширению линии при температуре излучающих атомов порядка 240°K .

Насколько надёжным является это определение температуры излучающего слоя натрия? Брикар и Кастлер отвечают на этот вопрос следующим образом:

«Трудно определить точность измерений, которые должны быть проверены путём последующих измерений при варьировании условий поглощения.

На высоте 74 км температура имеет величину порядка $240 \pm \pm 50^{\circ}\text{K}$ ».

Описанным методом Брикар и Кастлер получили другой результат фундаментального значения, хотя этот результат пока основан на небольшом материале наблюдений: они измеряли поглощение жёлтой линии свечения ночного неба (снимки 27 — 28 и 29 — 30 января 1944 г.). Установлено, что в ночном излучении жёлтой линии имеется 2 части, из которых одна поглощается сильно (фактор редукции имеет величину того же порядка, как и для сумеречного излучения), а другая остаётся не поглощённой при давлении паров натрия в кювете, соответствующем температуре отростка 210°C . Интенсивность обеих частей примерно одинакова. Этот результат указывает на наличие двух различных механизмов возбуждения ночного излучения, которые Брикар и Кастлер предполагают такими:

1. Многократное рассеяние резонансного сумеречного излучения неба, идущего из-под горизонта со стороны Солнца (сильно поглощаемое излучение).

2. Возбуждение атомов натрия ударами 2-го рода (линия широкая, мало поглощаемая).

13. СЕЗОННЫЙ ХОД ЯРКОСТИ ЖЁЛТОЙ ЛИНИИ. СВЯЗЬ С ИОНОСФЕРОЙ

Ещё в 1937 г. Гарриг¹⁴, исследуя свечение ночного неба, констатировал, что жёлтая линия ночного неба была интенсивной зимой 1936/37 г., к лету 1937 г. становилась весьма слабой и вовсе не обнаруживалась в июле. Брикар и Кастлер заметили аналогичный годовой ход для сумеречной жёлтой линии⁴⁰. С ноября 1942 г. по апрель 1943 г. они наблюдали отчётливую жёлтую линию в спектрах и утренних и вечерних сумерек при погружениях Солнца под горизонт от $6^{\circ}30'$ до 10° . С начала апреля яркость жёлтой линии стала убывать, прежде всего при меньших погружениях Солнца, и 15 апреля можно было заметить следы линии лишь на спектрограммах, соответствующих погружению Солнца от 8 до 10° (обычно жёлтая линия обладает наибольшей яркостью как раз при погружении Солнца от $6^{\circ}30'$ до 8°). В ночном небе жёлтая линия в этот период

времени была ещё интенсивной. В июне и июле жёлтая линия отсутствовала, и в ночном и в сумеречном небе она появилась в середине августа в ночном небе и в сумерках при погружении Солнца $8-10^\circ$. В начале октября жёлтая линия наблюдалась на всех спектрограммах; её интенсивность усилилась в ноябре.

В связи с такими сезонными изменениями яркости жёлтой линии Брикар и Кастлер указывают⁴⁰ на наличие аналогичных изменений в интенсивности отражения радиоволн от слоя D , как об этом сообщали ещё в 1939 г. Бэдден, Ратклиф и Вилкс⁷¹.

Начиная с 1935 г., эти авторы систематически исследовали отражение радиоэлектрических сигналов (длина волны 18,8 км), посылаемых передатчиком Британского управления связи (British Post Office),

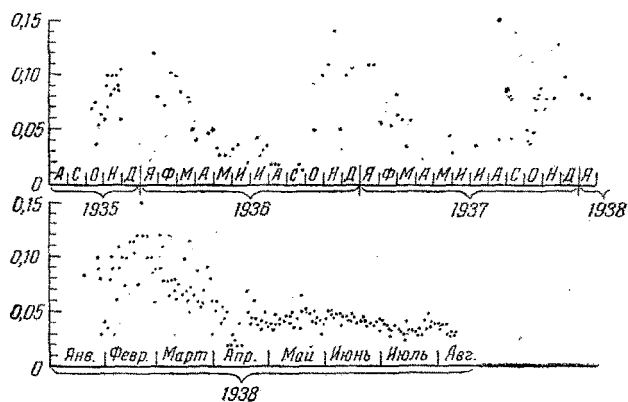


Рис. 28. Сезонный ход амплитуды радиоволн 18,8 км, отражённых от слоя D (в долях амплитуды земного луча). По данным Бэддена, Ратклифа и Вилкса, 1939 г.

установленным в Рэгби. В течение 4 лет они наблюдали понижение отражающего слоя зимой и усиление отражения в ноябре. Амплитуда отражённой волны испытывала в ноябре каждого года настолько большое усиление, что Бэдден, Ратклиф и Вилкс даже ввели⁷¹ специальный термин «ноябрьский эффект». На рис. 28 мы воспроизводим данные этих авторов о сезонном изменении амплитуды отражённой волны (в полдень) для периода 1935 — 1938 гг. Амплитуды отражённой волны даны в долях амплитуды земного луча⁷¹. Действительно, бросается в глаза совпадение указанных выше периодов усиления и ослабления яркости жёлтой линии неба и периодов усиления и ослабления отражённых радиоволн.

Измеренные⁷¹ высоты отражения варьировали в пределах от 55 до 75 км.

В этой связи заслуживает внимания предположение, высказанное в 1941 г. Жуо и Васси^{72,73}, об идентичности ионосферного слоя *D* и слоя, излучающего *D*-линию натрия в сумерки.

Бриклар и Кастлер⁴⁰ указывают ещё, что зимой яркость жёлтой линии сумеречного неба является гораздо менее постоянной, чем в ночном небе. Ночная яркость жёлтой линии никак не связана с её яркостью во время сумерек предшествующего вечера или последующего утра. Кроме того, они заметили влияние метеорологических факторов на яркость жёлтой линии. При влажном западном ветре яркость обычно понижена, даже если в момент съёмки небо совершенно ясное; в сухие холодные периоды (северный ветер) яркость возрастает, благодаря чему иногда удавалось фотографировать жёлтую линию даже при облачном небе. Этот эффект, при сопоставлении его с сезонными изменениями, указывает на то, что высокое содержание водяных паров в атмосфере мало благоприятствует наблюдениям жёлтой линии. Возможно имеет место поглощение жёлтой линии парами воды, в спектре поглощения которых мы находим длины волн, близкие к длине волны *D*-линий.

Эти длины волн, полученные из известных измерений спектра Солнца Роуланда, мы находим в капитальном труде Джона, Мура, Адамса и Бэбкока⁷⁴, а их идентификацию с вибрационно-ротационными спектрами молекулы H_2O — у Френденберга и Мекке⁶⁴.

Таблица 8

Спектр поглощения водяного пара вблизи *D*-линий натрия

λ	<i>I</i>	$\Delta\lambda$ относительно D_2	λ	<i>I</i>	$\Delta\lambda$ относительно D_1
5883,708 Å	2	— 1,269 Å	5894,950 Å	0	— 0,994 Å
5889,091 »	— 1	— 0,886 »	5895,148 »	0	— 0,796 »
5889,643 »	3	— 0,334 »	5896,423 »	0	+ 0,479 »
5889,888 »	2	— 0,089 »	5896,498 »	1	+ 0,554 »
5890,213 »	0	+ 0,336 »	5896,835 »	2	+ 0,891 »
5890,738 »	— 1	+ 0,761 »			
5891,186 »	1	+ 1,209 »			

Указанные американские авторы дают для *D*-линий натрия следующие значения длины волны: $\lambda = 5895,944$ Å для D_1 и $\lambda = 5889,977$ Å для D_2 . Эти значения отличаются на + 0,012 Å от длин волн, приведённых прежде у Кайзера.

В табл. 8 приведены длины волн λ спектра поглощения молекулы H_2O , близкие к *D*-линиям. Указанные градации интенсивности *I* взяты из измерений Роуланда. Кроме того, указаны разности длин волн $\Delta\lambda$ по отношению к *D*-линиям.

Вследствие большой величины пути, проходимогo в атмосфере: как светом, излучаемым светящимся атмосферным слоем (наблюдения

Брикара и Кастлера, как уже указывалось, делались в точке неба 22° над горизонтом⁴⁰), так и солнечным светом, возбуждающим оптический резонанс, ширина полос поглощения водяного пара, соответствующая этому большому пути, может быть значительной и достигать величины $0,5 \text{ \AA}$, как об этом свидетельствуют измерения ширины теллурических полос водяного пара, выполненные Алленом⁵¹. При большом содержании водяных паров в атмосфере полосы поглощения H_2O могут перекрывать D -линии и вызывать их заметное ослабление.

Поглощение атмосферной влагой должно сильнее сказываться на линии D_2 , около которой находятся особенно близко интенсивные полосы водяного пара ($\Delta\lambda = 0,089 \text{ \AA}$ и $0,334 \text{ \AA}$, см. табл. 8). Линия D_2 даёт $\frac{2}{3}$ интенсивности жёлтой линии неба. Было бы желательно систематически измерять величину отношения D_2/D_1 в различных метеорологических условиях и в разные сезоны. Такие измерения, легко выполнимые эталоном Фабри и Перо толщиной $0,15 \text{ мм}$, позволили бы выяснить роль поглощения водяным паром в наблюдаемых изменениях яркости жёлтой линии.

А. и Э. Васси предложили другое объяснение этих сезонных колебаний яркости⁷⁵: в начале ноября Земля пересекает рой Леонид, наиболее значительный метеорный рой, который может вызывать обогащение натрием высоких слоёв атмосферы. Выяснить, какое из двух указанных объяснений сезонных измерений соответствует действительности, можно было бы путём одновременных измерений в южном и северном полушариях Земли.

Строгое определение изменений интенсивности эмиссионных линий в спектре ночного неба связано с рядом трудностей. Наилучший метод таких измерений был предложен в 1940 г. акад. Г. А. Шайном и П. Ф. Шайн⁷⁶. Этим методом, начиная с 1940 г., производятся измерения изменений интенсивностей трёх линий излучения ночного неба: кислородных линий $\lambda = 5577,3 \text{ \AA}$ и $6300,0 - 6354,1 \text{ \AA}$ и натриевой линии D . Измерения, начатые в 1940 г. в Симеизской обсерватории в Крыму, в 1942—1944 гг. продолжались В. Ф. Гаазе в Абастуманской астрофизической обсерватории (гора Канобили, Грузия), а ныне снова продолжают её в восстанавливаемой Симеизской обсерватории. Эти ещё не опубликованные данные явятся очень важными для решения указанных выше вопросов.

К сожалению, метод Г. А. и П. Ф. Шайнов применим лишь в ночных условиях⁷⁶ и не может быть использован для исследования изменений яркости жёлтой линии сумеречного неба.

14. О СТРОЕНИИ ВЫСОКИХ СЛОЁВ АТМОСФЕРЫ

Изложенные в настоящем обзоре результаты исследования жёлтой линии спектра сумеречного и ночного неба доказывают наличие натрия в высоких слоях атмосферы. Довольно уверенно определено количество атомов натрия. Высота слоя, содержащего натрий, едва ли значительно отличается от $70-80 \text{ км}$. Убедительно доказано, что

излучение *D*-линий в условиях сумеречного освещения атмосферы возбуждается путём оптического резонанса, но ночное излучение этих линий заведомо не может быть целиком объяснено оптическим резонансом и, повидимому, связано с возбуждением свечения путём ударов 2-го рода. Получены указания на возможную связь натрия, содержащегося в высоких слоях воздуха, с многими важными явлениями, происходящими в атмосфере, но до сих пор нет достаточной ясности в вопросе о происхождении атмосферного натрия. Для того чтобы составить себе более определённое представление о том, какой может быть роль натриевого слоя в общей картине физических процессов, происходящих в атмосфере, в заключение настоящего очерка рассмотрим кратко некоторые данные о свойствах высоких слоёв воздуха^{77, 78}.

На вопросе о химическом составе воздуха на больших высотах мы уже останавливались в предыдущих параграфах. Этот вопрос имеет большое значение для проблемы атмосферного натрия, а именно — для суждения о возможности проникновения натрия в высокие слои атмосферы из тропосферы. Существует или не существует мощный турбулентный обмен между тропосферой и высокими слоями стратосферы? Многие соображения говорят о невозможности таких движений. Но в этом случае имело бы место диффузное разделение лёгких и тяжёлых газов и с высотой должно было бы увеличиваться процентное содержание лёгких газов. Делались прямые химические исследования состава воздуха в стратосфере (в СССР, Англии, США и Германии) до высоты почти 30 км (до 22 км — с помощью стратостатов, выше — с помощью шаров-зондов). Основное внимание уделялось определению отношения гелий/кислород: гелий как представитель лёгких газов, кислород — тяжёлых. До высоты 20 км это отношение остаётся строго неизменным и лишь на высотах более 20 км начинает очень незначительно и незакономерно увеличиваться. Это обнаруживает некоторое действие диффузного разделения газов, но оно перекрывается более мощным действием вертикального перемешивания, выравнивающего состав воздуха. Между тем, начиная с высот порядка 20 км, условия диффузного разделения лёгких и тяжёлых газов становятся благоприятными (большой коэффициент диффузии).

Известные нам уже спектральные данные, характеризующие излучение высоких слоёв атмосферы (полярные сияния и свечение ночного неба), подтверждают такой вывод, свидетельствуя о том, что и на высотах 100 и более км состав атмосферы является азотно-кислородным. Всё это, вообще говоря, делает предположение о возможности проникновения натрия или, вероятнее, соединений натрия (NaCl) из тропосферы в высокие слои атмосферы не противоречащим другим известным фактам.

Интересные и важные сведения получены о температуре высоких слоёв атмосферы. Известно, что стратосфера в пределах досягаемости радиозондов (обычно не выше 25 км, изредка — до 30 км или немного больше) отличается большим постоянством температуры. Над Европой

температура стратосферы не выходит обычно за пределы $220\text{--}230^\circ\text{K}$. Однако, уже давно были замечены аномалии в распространении звуковых волн, заставлявшие предполагать увеличение температуры воздуха на больших высотах. При сильных взрывах, кроме основной зоны слышимости, непосредственно окружающей пункт взрыва, существует ещё вторичная зона аномальной слышимости, отделённая от основной зоны довольно широкой зоной молчания⁷⁷ (ширина зоны молчания несколько десятков километров, а иногда и более 100 км). Это указывает на загигание траектории звуковых волн книзу с последующим их возвращением на Землю. В области возврата волн должно иметь место увеличение скорости волн v с высотой h (положительное значение градиента $\frac{dv}{dh}$). По формуле Лапласа

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}},$$

где R — газовая постоянная, γ — отношение теплоёмкостей, M — молекулярный вес, T — абсолютная температура. Наблюдаемые явления можно объяснить положительными значениями градиента $\frac{dT}{dh}$. Теория вопроса позволяет из данных наблюдений вычислить высоту возврата волн h_0 и температуру воздуха на этой высоте T_0 .

Обычно h_0 составляет несколько более 40 км, реже достигая величины 50 и 60 км. Из таких наблюдений получается температура около 280°K на высоте 40 км, 310°K — на высоте 45 км и 435°K — на высоте 50 км.

Сведения о температуре ещё более высоких слоёв получены на основании данных о плотности воздуха. В этом отношении наибольшее значение имеет громадный «избыток» плотности на высотах около 100 км, полученный разными методами. Остановимся сначала на вычислениях Линдемана и Добсона⁷⁸, основанных на данных о высоте возгорания и потухания метеоров.

Базисными измерениями установлено, что возгорание метеоров происходит на высотах 60—160 км (чаще всего на высотах 100—140 км), а их потухание — на высотах 30—115 км. Метеорная частица влетает в атмосферу Земли с громадной скоростью (определяемой тоже путём базисных наблюдений), за несколько секунд разогревается от трения о воздух до температуры кипения и, испуская в это время яркий свет, за несколько секунд полностью испаряется, оставляя иногда светящийся след. Делая некоторые предположения о механизме разогрева и свечения метеорной частицы, Линдеман и Добсон⁷⁹ вывели формулы, позволяющие вычислить плотность воздуха как на высоте вспыхивания метеора, так и на высоте его потухания. На рис. 29 приведены результаты их вычислений для большого числа метеорных наблюдений. На этой кривой кружками обозначены плотность на высоте загорания метеора, а точками — плотность на высоте потухания.

Изменение плотности воздуха ρ с высотой в случае гидростатического равновесия атмосферы определяется известной барометрической формулой

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{Mg}{RT} h},$$

где g — ускорение силы тяжести. Если считать стратосферу перемешанной (M не зависит от высоты) и изотермической (T не зависит от высоты), то распределение плотности по высоте получается таким, как это показывает пунктирная кривая на рис. 29. Мы видим, что на высоте 100 км метеорные наблюдения дают плотность, в сотни раз превосходящую ту, какая должна быть для изотермической стратосферы. Поскольку увеличение T замедляет убывание плотности с высотой (уменьшает абсолютное значение градиента $\frac{d\rho}{dh}$), указанное расхождение можно было бы устранить, допустив, что на высотах, несколько меньших 100 км, температура возрастает с высотой.

Заметим, что результаты метеорных вычислений Линдемана и Добсона находятся в хорошем согласии с определениями плотности сумеречным методом, теория которого была разработана В. Г. Фесенковым^{89, 80} и Н. М. Штауде⁸¹. На том же рис. 29 сплошной линией показан ход плотности по сумеречным наблюдениям⁸².

Наконец, о температурах интересующих нас слоев воздуха можно судить по отражению радиоволн. Не вдаваясь в подробности, укажем на то, что⁷⁸:

1) Для слоя E (высота порядка 110—115 км) получается температура 385° К.

2) Начиная с высоты примерно 90 км имеет место резкое возрастание температуры.

3) Для высоты 75 км (по наблюдениям за отражением длинных радиоволн $\lambda = 18,8$ км, о которых мы уже упоминали в связи с изме-

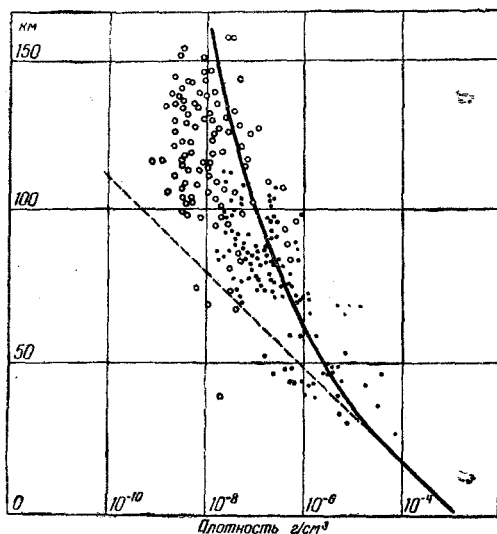


Рис. 29. Плотность воздуха на больших высотах по данным метеорных (кружки и точки) и сумеречных (сплошная линия) наблюдений. Пунктирная линия — теоретическая изотермическая атмосфера.

рениями Бэддена, Ратклифа и Вилкса⁷¹⁾ получается весьма низкая температура: всего лишь 200°K .

На основании всех этих данных можно предполагать такой температурный режим в интересующей нас области: на высоте 40—60 км температура повышается с высотой, но после 60 км снова падает, достигая на высоте 75 км минимального значения 200°K ; с высоты 85—90 км начинается быстрое увеличение температуры, которая достигает значения 385°K в области ионизированного слоя *E*.

Всё сказанное даёт основания составить некоторое суждение об оставшемся пока наименее ясном вопросе о механизме попадания натрия или его соединений (NaCl) в высокие слои атмосферы.

Частицы соли NaCl , несомненно, присутствуют в тропосфере, падая туда путём испарения мельчайших капелек, разбрызгиваемых с поверхности океана. Эти частицы, в качестве ядер конденсации, играют большую роль в процессах конденсации водяного пара в атмосфере. Наличие NaCl в дождевой воде установлено химическим анализом. Путём турбулентного перемешивания воздуха эти частицы проникают в высокие слои атмосферы (до 80—85 км). Правда, на своём пути они должны «пробить» температурную инверсию в тропопаузе и, может быть, ещё одну температурную инверсию на высоте 40—50 км. Но отсутствие диффузного разделения тяжёлых и лёгких газов указывает на возможность вертикального турбулентного обмена, достаточно энергичного, чтобы обеспечить такое проникновение частиц NaCl . Но на высоте 85—90 км эти частицы встречают настолько мощную температурную инверсию, а интенсивность турбулентных движений настолько ослабляется, что «пробиться» сквозь эту инверсию частицы уже не могут (кроме как путём обычной диффузии), а поэтому они накапливаются на высоте 80—85 км и образуют светящийся слой, излучающий *D*-линии под действием солнечных лучей. В этом случае слой натрия должен быть довольно резко ограничен сверху. Но мы знаем, что сумеречные наблюдения указывают как раз на наличие такой отчётливой границы слоя, излучающего *D*-линии. Высота этого слоя, по сумеречным наблюдениям, получается либо 80—90 км, если исходить из предположения об оптическом резонансе, либо 115 км в случае возбуждения свечения путём фотодиссоциации молекул NaCl ультрафиолетовыми лучами Солнца. Считая на основании температурных данных, что частицы NaCl не могут подняться выше 80—90 км, мы должны были бы предположить, что сумеречное свечение паров натрия должно быть резонансным свечением: из измерений ширины *D*-линий сумеречного неба (см. § 11 и 12) мы знаем, что так и обстоит дело в действительности.

Частицы NaCl , вследствие своей большой гигроскопичности, являются особенно активными ядрами конденсации. Серебристые облака на высоте 82 км могут быть обязанными своим происхождением процессу конденсации на этих ядрах. Поразительное постоянство высоты серебристых облаков (82 км) и самая величина этой высоты⁸⁸⁾ полу-

чили бы в этом случае ясное объяснение, как результат чёткого ограничения распространения частиц NaCl вверх вследствие резкой температурной инверсии на этих высотах.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. Newcomb, *Astrophys. Journ.*, **14**, 297, 1901.
2. Yntema, *Publications Astron. Observatory, Groningen*, No. 22, 1909.
3. V. M. Slipher, *Astrophys. Journ.*, **49**, 266, 1919.
4. И. А. Хвостиков, *Усп. физ. наук*, **17**, 121, 1937.
5. И. А. Хвостиков, *Свечение ночного неба*, изд-во Ак. Наук СССР, Москва—Ленинград, 1937.
6. V. M. Slipher, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **61**, 262, 1929; *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **93**, 657, 1933.
7. J. Dufay, *C. R.*, **194**, 1897, 1932.
8. J. Dufay, *Journ. de Phys.*, 7-e série, **4**, 221, 1933.
9. L. A. Sommer, *Zs. f. Phys.*, **77**, 374, 1932.
10. J. Cabannes, *Journ. de Phys.*, 7-e série, **5**, 601, 1934; *C. R.*, **198**, 2132, 1934; **200**, 1905, 1935.
11. L. Vegard and E. Tönsberg, *Zs. f. Phys.*, **88**, 709, 1934.
12. L. Vegard and E. Tönsberg, *Zs. f. Phys.*, **94**, 413, 1935.
13. J. Cabannes et J. Dufay, *C. R.*, **206**, 221, 1938.
14. H. Garrigue, *C. R.*, **205**, 491, 1937.
15. В. И. Черняев и М. Ф. Вукс, *Докл. Ак. Наук СССР*, **14**, 77, 1937.
16. R. Bernard, *C. R.*, **206**, 448, 1938.
17. J. Cabannes, J. Dufay et J. Gauzit, *C. R.*, **206**, 870, 1938.
18. R. Bernard, *C. R.*, **206**, 928, 1938.
19. R. Bernard, *Nature*, **141**, 788, 1938.
20. R. Bernard, *Zs. f. Phys.*, **110**, 291, 1938.
21. J. Cabannes, J. Dufay and J. Gauzit, *Astrophys. Journ.*, **88**, 164, 1938.
22. R. Bernard, *C. R.*, **206**, 1137, 1938.
23. R. Bernard, *Astrophys. Journ.*, **89**, 133, 1939.
24. J. Cabannes, J. Dufay et J. Gauzit, *C. R.*, **206**, 1525, 1938.
25. E. Tönsberg and L. Vegard, *Nature*, **145**, 588, 1940.
26. Harold D. Babcock, *Astrophys. Journ.*, **57**, 209, 1923.
27. H. Garrigue, *C. R.*, **202**, 1807, 1936.
28. J. Cabannes et H. Garrigue, *C. R.*, **203**, 484, 1936.
29. И. А. Хвостиков, *Известия Ак. Наук СССР, сер. геогр. и геофиз.*, **175**, 1939.
30. B. W. Currie and H. W. Edwards, *Terr. Mag. and Atm. Elec.*, **41**, 265, 1936.
31. Georges Déjardin, *C. R.*, **206**, 930, 1938.
32. L. Vegard and E. Tönsberg, *Geophys. Publ.*, **11**, No. 16, 1937.
33. Mme A. Vassy, *C. R.* **206**, 1638, 1938.
34. Mme A. Vassy, *Ann. de Physique*, **16**, 155, 1941.
35. J. Gauzit, *Ann. de Physique*, **4**, 460, 1935.
36. G. Déjardin et R. Bernard, *C. R.*, **207**, 81, 1938.
37. G. Cario und U. Stille, *Zs. f. Phys.*, **116**, 122, 1940.
38. Hann. Süring, *Lehrbuch der Meteorologie*, 5 Auflage, стр. 41, 1937.
39. В. Г. Фесенков, *Труды Гл. астрофиз. obs.*, **2**, 7, 1923; *Astron. Nachricht*, **220**, 33, 1923.
40. J. Bricard et A. Kastler, *Ann. de Géophysique*, I, fasciale I, **1**, 1944.
41. R. Bernard, *C. R.*, **206**, 1669, 1938.
42. F. W. P. Götz, *Meteorol. Zs.*, **52**, 471, 1935.

43. F. W. P. Götz, *Erg. der Kosm. Phys.*, **3**, 307, 1938.
44. L. Vegard, *Nature*, **145**, 623, 1940.
45. S. Chapman, *Astrophys. Journ.*, **90**, 309, 1939.
46. Ch. Fabry, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **98**, 681, 1938.
47. *Annals of the Astron. Observ. of the Smithsonian Inst.*, **3**, 211, 1913; **4**, 128 и 195, 1922.
48. L. Vegard, *Geophys. Publ.*, **10**, No. 4, 1933.
49. L. Vegard, *Nature*, **144**, 1089, 1939.
50. A. Unsöld, *Physik der Sternatmosphären*, Berlin, J. Springer, 1938, стр. 32 и 38.
51. C. W. Allen, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, **100**, 10, 1939.
52. А. Митчелл и М. Земанский, Резонансное излучение и возбуждённые атомы, ОНТИ, 1937.
53. R. Z. Mannkopf, *Zs. f. Phys.*, **36**, 315, 1926.
54. A. C. G. Mitchell, *Zs. f. Phys.*, **49**, 229, 1928.
55. T. R. Hogness und J. Franck, *Zs. f. Phys.*, **44**, 26, 1927.
56. L. Hamos, *Zs. f. Phys.*, **74**, 379, 1932.
57. J. G. Winans, *Zs. f. Phys.*, **60**, 631, 1930.
58. J. Franck and C. A. Rieke, *Astrophys. Journ.*, **89**, 463, 1939.
59. Duffieux, *Bull. de la Soc. Sci. de Bretagne*, **15**, 1, 2, 1938.
60. Russel, *Sci. Amer.*, **160**, 88, 1939.
61. W. Finkelburg, *Kontinuierliche Spektren*, Berlin, J. Springer, стр. 368, 1938.
62. E. Thiele, *Ann. der Physik*, 5. Folge, **14**, 937, 1932.
63. W. Zehden, *Zs. f. Phys.*, **86**, 555, 1933.
64. K. Frendenburg und R. Mecke, *Zs. f. Phys.*, **81**, 465, 1933.
65. G. Cario und U. Stille, *Zs. f. Phys.*, **113**, 442, 1939.
66. A. Kastler, *Procès-verbaux des séances de la Soc. Sc. phys. et natur. de Bordeaux, année 1937—1938*, стр. 164.
67. A. Kastler, *C. R.*, **210**, 530, 1940.
68. H. Schuler, *Naturwissensch.*, **16**, 512, 1928.
69. W. Edmondson and A. Egerton, *Proc. Roy. Soc.*, **A 113**, 520, 1927.
70. W. H. Rodebusch and Th. de Vries, *Journ. Amer. Chem. Soc.*, **47**, 2488, 1925.
71. K. G. Budden, J. A. Ratcliffe and M. V. Wilkes, *Proc. Roy. Soc.*, **A 171**, 188, 1939.
72. R. Jouaust et E. Vassy, *C. R.*, **213**, 139, 1941.
73. A. et E. Vassy, *Cahiers de Physique*, **9**, 28, 1942.
74. St. John, Moor, Adams, Babcock, *Revision of Rowland's Preliminary Table of Solar Spectrum Wave Lengths*, 1928, 170—171.
75. A. et E. Vassy, *Journ. de Physique*, **3**, 8, 1942.
76. Г. А. Шайн и П. Ф. Шайн, *Доклады Ак. Наук СССР*, **35**, 152, 1942.
77. И. А. Хвостиков, *Успехи физ. наук*, **19**, 49, 1938.
78. F. A. Paneth, *Nature*, **143**, 1074, 1939.
79. F. A. Lindemann and G. M. B. Dobson, *Proc. Roy. Soc. London*, **A 102**, 411, 1922; **103**, 721, 1923; *Astrophys. Journ.*, **65**, 117, 1927.
80. В. Г. Фесенков, *Астрон. журнал*, т. VII, стр. 100.
81. Н. М. Штауде, *Труды Комиссии по изуч. стратосферы*, Ак. Наук СССР, т. 1, 1936.
82. F. Link, *C. R.*, **200**, 78, 1935.
83. Астапович, *Известия Ак. Наук СССР, сер. геогр. и геофиз.*, 1939.