

ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НОЧНОГО НЕБА И ДИССОЦИАЦИЯ АЗОТА В ИОНОСФЕРЕ

И. А. Хвостиков

Открытие нового излучения. — Определение длины волны нового излучения. — Об атомном азоте: результаты Дюфе, Бернара и Каплана. — Дискуссия Бернар Дюфе — Спектр «полярных сияний низких широт». — Вероятность излучения запрещённых линий. — О диссоциации азота в верхних слоях атмосферы. — Степень диссоциации азотных молекул в области полярных сияний. — Об инфракрасном излучении атомного азота. — Идентификация инфракрасного излучения ночного неба. — Полоса (0,0) первой положительной системы азота.

1. ОТКРЫТИЕ НОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В 1944 — 1945 гг. было опубликовано сообщение американских астрофизиков Стеббинса, Вайтфорда и Свингса^{1,2} о наличии неизвестного до того инфракрасного излучения ночного неба. Это открытие несомненно имеет первостепенное значение. Оно указывает на существование новых важных свойств у свечения верхних слоёв атмосферы (светимости ночного неба). Инфракрасное излучение ночного неба, обладая поразительно большой интенсивностью, создаёт почти непреодолимые трудности для фотометрирования туманностей и слабых звёзд в инфракрасных лучах. Для того чтобы звёздный мир не оказался полностью закрытым для астрономов в некоторых участках инфракрасного спектра потребуется разработка сложных специальных методов. Наконец, дискуссия о природе нового свечения тесно связана, как мы увидим ниже, с важным вопросом о составе и физическом состоянии воздуха в верхних слоях земной атмосферы.

В 1940 г. Стеббинс и Вайтфорд на обсерватории Моунт Вильсон начали программу спектрофотометрирования звёзд и туманностей с помощью фотоэлектрической установки, чувствительной к видимым и инфракрасным лучам. Фотометрирование производилось в 6 спектральных зонах от 3530 \AA до $10\,300 \text{ \AA}$, выделявшихся светофильтрами. Фотоэлемент устанавливался в фокусе 60 и 100-дюймового рефлектора, причём для измерения яркости протяжённых объектов фотоэлемент диафрагмировался так, что поле зрения составляло $8',6$ для 60-дюймового и $5',1$ для 100-дюймового рефлектора.

При первых же наблюдениях туманности (это была туманность М 31) через инфракрасный светофильтр (эффективная длина волны пропускаемого участка спектра $10\,300\text{ \AA}$) отклонения гальванометра оказались неожиданно большими. Контрольные наведения прибора на соседние тёмные участки неба (для определения величины фона) показали, что всюду присутствует интенсивное инфракрасное излучение ночного неба, делающее невозможным какие-либо измерения объектов с такой небольшой поверхностной яркостью, как у туманностей. Даже измерение слабых звёзд с применением самых малых диафрагм оказалось трудным. Примером могут служить измерения, приведённые в табл. I. Эти данные относятся к звезде типа dF7; звёзды этого типа дают примерно одинаковые отклонения гальванометра во всех участках спектра (при данных светофильтрах и фотоэлементе). Цифры в строке «небо» получены при большей диафрагме, чем цифры в строке «звезда»; диафрагмы подобраны так, чтобы в видимой части спектра получались примерно равные показания гальванометра как от звезды, так и от соседнего тёмного участка неба.

Таблица I

Сравнение звезды и фона ночного неба

Фильтр	Ультра-фиолетовый $\lambda=3330\text{ \AA}$	Фиолетовый $\lambda=4220\text{ \AA}$	Голубой $\lambda=4880\text{ \AA}$	Зелёный $\lambda=5700\text{ \AA}$	Красный $\lambda=7190\text{ \AA}$	Инфракрасный $\lambda=10\,300\text{ \AA}$
Звезда Отклонение гальванометра в мм. . .	8	8	10	8	8	8
Небо Отклонение гальванометра в мм. . .	8	5	5	8	13	112

Интенсивность инфракрасного излучения неба не может не вызвать удивления, настолько она велика. Как известно, спектры ночного неба, тщательно изучавшиеся в течение 30 лет и подробно описанные в своё время³ на страницах «Успехов физических наук», содержат 2 линии особенно большой интенсивности: это зелёная линия $\lambda=5577\text{ \AA}$ и красная линия $\lambda=6300\text{ \AA}$. Обе они излучаются атомным кислородом в земной атмосфере (запрещённые переходы) в слоях, расположенных, повидимому, не ниже 120 км.

Эти линии всегда обращали на себя внимание своей интенсивностью: светосильным спектрографом, направленным на любой участок неба, на чувствительных панхроматических пластинках их можно фотографировать за несколько минут. Требуется увеличить экспозицию в 5—10 и более раз, чтобы получить на спектрограмме какие-либо другие линии или полосы. Открытое новое инфракрасное излучение ночного неба превосходит по интенсивности зелёную линию, как показывает таблица I, более чем на целый порядок.

Как могло случиться, что столь мощное излучение ночного неба так долго оставалось незамеченным? Дело заключается в том, что до последнего времени не применяли приёмников света, обладающих в соответствующей части инфракрасного спектра (около 1μ) столь высокой чувствительностью, какая необходима для измерения очень слабых излучений ночного неба.

Впрочем, недавно французские астрофизики Дюфэ и др. указали на одну свою статью, опубликованную в «*Cahiers de Physique*» в 1942 г., в которой, якобы, уже сообщалось о существовании замеченного ими нового инфракрасного излучения ночного неба. Однако имеющееся там замечание является достаточно неопределённым. Гораздо раньше заметил сильное инфракрасное излучение ночного неба Л. А. Кубецкий, который в 1939 г. проводил в Крыму совместно с Оптической лабораторией Геофизического института Академии наук СССР измерения свечения неба с помощью разработанного им «интегрально-балансного» метода, использующего вторично-электронную «трубку Кубецкого». К сожалению, в то время Л. А. Кубецкий ограничился качественными наблюдениями, поскольку в 1939 г. указанный его новый метод, открывающий большие возможности в измерении слабейших радиаций, находился ещё в начальной стадии разработки.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИНЫ ВОЛНЫ НОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Первоначально Стеббинс, Вайтфорд и Свингс предположили, что инфракрасный эффект вызван линией 8600 \AA , которая была открыта Слайфером⁴. Но от такой мысли пришлось отказаться, так как подсчёты показали, что в этом случае, согласно кривым пропускания светофильтров, отклонение гальванометра при красном фильтре должно было бы быть больше, чем при инфракрасном. Применение спектрографа для определения длины волны этого излучения весьма затруднено малой дисперсией светосильных спектрографов и низкой чувствительностью фотопластин в инфракрасной части спектра. Остроумным способом Стеббинсу, Вайтфорду и Свингсу удалось довольно точно определить длину волны, пользуясь лишь фотоэлементом и светофильтрами. Метод, применённый этими авторами, осуществим лишь при той высокой фотометрической точности,

которая обеспечивается при тщательных фотоэлектрических измерениях. Для фильтра Шотта UG6, 2 мм толщины, пропускание составляет:

8500 Å	0,01	11 500 Å	0,79
9500 Å	0,25	13 000 Å	0,92
10 500 Å	0,59		

Если измерить интенсивность излучения неба сначала сквозь этот фильтр, а потом сквозь 2 и 3 слоя этого же фильтра, то по изменению интенсивности уже можно примерно судить о длине волны излучения.

В самом деле, если, например, $\lambda = 9500 \text{ Å}$, то при удвоении толщины того же самого светофильтра интенсивность должна упасть в 4 раза, а при $\lambda = 10 500 \text{ Å}$ — меньше чем вдвое. Предварительными измерениями такого рода для нового инфракрасного излучения ночного неба было получено значение около $10 400 \text{ Å}$. После этого были проделаны более точные измерения, для чего светофильтры были калиброваны с помощью трёх излучений известной длины волны: $10 336 \text{ Å}$, $10 407 \text{ Å}$ и $10 478 \text{ Å}$. В таблице II приведены результаты калибровки светофильтров UG6, причём 2/1, 3/1 и 3/2 означает отношение отклонений гальванометра при измерении сквозь 2 слоя светофильтра к отклонению при 1 слое, сквозь 3 слоя к 1 слою и сквозь 3 слоя к отклонению при 2 слоях, соответственно.

Таблица II

Калибровка фильтров

	10 336 Å	10 407 Å	10 478 Å
Измеренное отношение $2/1$	$0,508 \pm 0,024$	$0,564 \pm 0,010$	$0,589 \pm 0,020$
Измеренное отношение $3/1$	$0,264 \pm 0,000$	$0,318 \pm 0,011$	$0,361 \pm 0,012$
Вычисленное отношение $3/2$	$0,520 \pm 0,025$	$0,564 \pm 0,022$	$0,614 \pm 0,029$

Измерения ночного неба сквозь эти же светофильтры дали:

2/1 . . . $0,565 \pm 0,007$,

3/1 . . . $0,348 \pm 0,005$,

и после деления 2-го на 1-е:

3/2 . . . $0,616 \pm 0,012$.

Из этих данных авторы заключили, что новое инфракрасное излучение ночного неба представляет собой эмиссионную линию (или узкую полосу) с длиной волны:

$$\begin{array}{rcl} \text{Исходя из } 2/1 & & 10\,427\,\text{\AA} \\ \text{Исходя из } 3/1 & & 10\,452\,\text{\AA} \\ \hline \text{Среднее значение} & . . . & 10\,440 \pm 25\,\text{\AA} \end{array}$$

По поводу этого окончательного значения длины волны Стеббинс, Вайтфорд и Свингс пишут. «мы не нашли ничего лучшего, как взять среднее из двух значений, а вероятную ошибку посчитать равной разности между ними».

Как можно идентифицировать новую линию? В вопросе об идентификации сложилась нередкость своеобразная ситуация как по существу дела, так и в отношении позиции, занятой самими Стеббинсом, Вайтфордом и Свингсом. В этот вопрос замешался другой, не менее важный вопрос о существовании в верхних слоях атмосферы диссоциированного (атомного) азота. На этом нам необходимо остановиться специально; к тому же развернувшаяся за последние годы дискуссия о наличии атомного азота представляет самостоятельный интерес и имеет фундаментальное значение для физики высоких слоев атмосферы.

3. ОБ АТОМНОМ АЗОТЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ ДЮФЭ, БЕРНАРА И КАПЛАНА

Известно³, что изучение спектров светимости ночного неба и полярных сияний приводит к заключению о том, что верхние слои атмосферы, как и приземные, имеют азотно-кислородный состав воздуха. Но если упомянутые спектры указывают на присутствие азота в молекулярном состоянии, то кислородное излучение относится к атомному состоянию. Теория озонового слоя приводит к определенным представлениям о диссоциации молекул кислорода ультрафиолетовыми лучами⁵. Позидимому, выше 100 км кислород почти нацело диссоциирован.

При таких обстоятельствах никого не удивило бы, если бы оказалось, что и азот находится в верхних слоях атмосферы в состоянии большей или меньшей диссоциации, и поэтому в спектрах ночного неба и полярных сияний обнаружатся линии атомного азота N_1 .

Одно время, в тридцатых годах, появлялись указания на возможность связать некоторые линии спектра ночного неба и полярных сияний с излучением атомного азота⁶. Но более тщательное изучение данных показывало, что всякий раз подобная идентификация либо должна быть отвергнута, либо, во всяком случае, может быть сделана лишь весьма предположительно. Постепенно стало

азота $\lambda = 3469 \text{ \AA}$. Более поздние измерения Гози^{13,14,15}, получившего много спектрограмм ночного неба на двух различных спектрографах, дали значение $\lambda = 3471 \text{ \AA}$. В 1936 г. Каплан высказал предположение¹⁶, что эта линия принадлежит атомному азоту и соответствует переходу $2P \rightarrow 4S$. Эта гипотеза вскоре получила, казалось бы, подкрепление в результате лабораторных опытов Каплана¹⁷, наблюдавшего линию 3471 \AA в спектре послесвечения «активного» азота; в этих же условиях интенсивность полос системы Вегарда-Каплана была очень большой. В 1938 г. Бернар сообщил, что в спектрах некоторых диффузных полярных сияний, которые он фотографировал в Тромзе, одновременно с полосами Вегарда-Каплана появляется линия $3470,3 \text{ \AA}$; по мнению Бернара, её нельзя отождествить с полосой 3469 \AA , второй положительной системы молекулярного азота¹⁸.

Но уточнение энергетических уровней атомного азота изменило длины волн для трёх указанных запрещённых линий: линия $2P \rightarrow 4S$ должна иметь длину волны $3466,5 \text{ \AA}$, а не 3470 \AA . Каплан¹⁹, повторив свои измерения линии в лабораторных условиях получил, применяя спектрограф большей дисперсии, более точное значение $3466,3 \text{ \AA}$, а Бернар²⁰, исправив свои первоначальные измерения, нашёл, в свою очередь, $3466,5 \pm 1 \text{ \AA}$. Тем самым было подтверждено наличие линии $2P \rightarrow 4S$ атомного азота в некоторых типах полярных сияний. (В 1945 г. Бернар²², отвечая на критические замечания Вегарда²¹, который высказал сомнение в возможности получить на спектрограмме со столь малой дисперсией точность $\pm 1 \text{ \AA}$, повторил промер этих спектрограмм и сообщил, что значение длины волны составляет $\lambda = 3466,5 \pm 0,5 \text{ \AA}$.)

Однако присутствие этой линии в спектрах светимости ночного неба оставалось проблематичным. Бернар допускал²⁰, что расхождение 5 \AA для линии ночного неба может быть результатом большой ошибки измерений спектрограмм ночного неба у Дюфэ, но Дюфэ отвергает такое предположение, ссылаясь⁷ на то, что сопоставление его измерений длин волн для нескольких десятков линий в ультрафиолетовой области с измерениями Гози и Арнульфа²³ показало совпадение для большей части линий в пределах 1 \AA . Дюфэ считает более правдоподобным, что сильную линию 3471 \AA ночного неба нельзя отождествить с линией $2P \rightarrow 4S$ и что эта последняя либо вовсе отсутствует в спектре ночного неба, либо является крайне слабой.

Коль скоро в спектрах полярных сияний обнаружена линия $2P \rightarrow 4S$ атомного азота, следует полагать, что может присутствовать и линия $2D \rightarrow 4S$. Но Бернар указывал, что такая линия ни-

когда не наблюдается²⁰, что подтверждается и снимками Вегарда. Но ещё в 1929 г. Слайфер и Зоммер сообщили, что в спектре полярного сияния, которое они наблюдали 7 июня 1928 г. во Флагстафе²⁴ (Аризона), была обнаружена линия 5206 \AA , которую они предположительно отождествляли с линией ${}^2D \rightarrow {}^4S$. Если по новым данным (см. выше) эта линия должна иметь длину волны 5199 \AA (среднее для дублета), то ошибка 7 \AA не является, по мнению Дюфэ⁷, чрезмерной, если принять во внимание малую дисперсию в этой части спектра светосильного ($F:1,1$) спектрографа, которым пользовались Слайфер и Зоммер. Однако долгое время наблюдение Слайфера и Зоммера оставалось единственным.

В 1939 г. Бэбкок опубликовал²⁵ результаты своих измерений спектра ночного неба, выполненных на Ликкской обсерватории и на обсерватории Моунт Вильсон, но без какой-либо идентификации. В этих материалах Дюфэ нашёл данные⁷, которые «заставили его вернуться к прежнему вопросу». На регистрограмме Бэбкока, между 5350 \AA и 5150 \AA , имеются линии:

5317 \AA ,	интенсивность 1
5242 \AA ,	" 1
5194 \AA ,	" 2

Дисперсия составляет 385 \AA/мм . «В этих условиях,—пишет Дюфэ⁷,—ошибка измерения в $0,01 \text{ мм}$ даёт для длины волны ошибку 4 \AA ... Линия 5194 \AA совпадает, в пределах ошибки измерения, с линией ${}^2D \rightarrow {}^4S$ атомного азота... Это численное совпадение не является достаточным основанием для уверенной идентификации. Но вот важное обстоятельство: Бэбкок отметил интенсивность 2 для линии 5194 \AA только на одной из четырёх спектрограмм, причём эта спектрограмма снималась во время полярного сияния (сияние низких широт), видимого в течение части периода экспозиции. На остальных трёх спектрограммах интенсивность линии много меньше. Представляется весьма вероятным, что эта линия обычно слаба в спектре ночного неба, но усиливается во время полярных сияний».

В этой области спектра есть много полос первой положительной системы молекулярного азота, из которых одна ($17-2$) очень близка по длине волны (5196 \AA) к линии, наблюдавшейся Бэбком (5194 \AA). В цитируемой работе Дюфэ приводит ряд соображений против предположения о том, что наблюдаемая Бэбком линия соответствует указанной полосе. Его общее заключение таково⁷:

«Итак, два раза в спектре полярных сияний низких широт наблюдалось излучение, близкое по положению к линии атомного азо-

та ${}^2D \rightarrow {}^4S$. Уклонение от положения этой линии (примерно $+7 \text{ \AA}$ и -5 \AA) не кажется несовместимым с точностью измерений, а какого-либо другого истолкования этого излучения не найдено. Наличие линии ${}^2D \rightarrow {}^4S$ в спектре некоторых сияний может рассматриваться, по крайней мере, как довольно вероятное, но требует подтверждения дальнейшими наблюдениями.

Эта линия может появляться также в спектре ночного неба, согласно наблюдениям Бэбкока, но обычно она очень слаба.

Это мнение подтверждается сказанным выше о линии ${}^2P \rightarrow {}^4S$, которая не обнаружена в спектрах ночного неба, но присутствие которой в спектрах некоторых типов диффузных полярных сияний установлено Бернарм. Интенсивная линия 3471 \AA ночного неба имеет, следовательно, другое происхождение.

4. ДИСКУССИЯ БЕРНАР—ДЮФЭ

В 1941 г. Бернар выступил с большой работой²⁶ «Атомный азот в верхних слоях атмосферы», в которой даны серьезные возражения против многих доводов Дюфэ.

В упоминавшихся выше (§ 3) лабораторных опытах Каплана¹⁷ наблюдалось послесвечение азота, в спектре которого, среди многих полос Вегарда-Каплана молекулярного азота, наблюдалась¹⁹ линия $\lambda = 3466,3 \text{ \AA}$, которую Каплан отождествил с линией атомного азота ${}^2P \rightarrow {}^4S$. Бернар, как мы уже знаем, обнаружил эту линию в спектрах некоторых диффузных полярных сияний, которые он исследовал в Норвегии; по его определению²⁷ $\lambda = 3466,5 \pm 1 \text{ \AA}$. В дальней-

Таблица III

Увеличение интенсивности некоторых линий и полос в спектре полярных сияний в верхней части сияний относительно нижней (по Бернару)

Длина волны (в \AA)	Идентификация	Интенсивность (в условных единицах)	
		нижняя часть сияний	верхняя часть сияний
3914	N_2^+ (отрицательная система)	200	200
3785	N_2 Вегарда-Каплана (1—11)	0	5
3603	N_2 Вегарда-Каплана (0—10)	0	4
3503	N_2 Вегарда-Каплана (2—11)	0,5	6
3466,5	$N_1 {}^2P \rightarrow {}^4S$	1,2	14
3428	N_2 Вегарда-Каплана (1—10)	1	9

шем Бернар установил, что эта линия не связана только с указанным типом сияний, но что она присутствует в спектрах всяких полярных сияний. Сравнивая спектрограммы, соответствующие нижнему и верхнему краю сияний с хорошо выраженными очертаниями (дуги и драпри), Бернар заметил²⁸, что полосы Вегарда-Каплана и линия $3466,5 \text{ \AA}$, будучи очень слабыми внизу, оказываются относительно интенсивными в верхней части сияний. Результаты его фотометрических оценок²⁶ собраны в таблице III. Эти данные свидетельствуют о тождественности и параллелизме в изменениях интенсивности полос Вегарда-Каплана и линии $3466,5 \text{ \AA}$. В среднем интенсивность возрастает примерно в 10 раз при переходе от нижней части сияний к верхней.

В связи с попытками отождествления линии $2P \rightarrow 4S$ атомного азота с одной из линий спектра ночного неба Бернар даёт сводку всех измерений в этой части спектра (таблица IV). Это измерения Гози¹⁵, Дюфэ¹⁰, Арнульфа²³, Бернара, Арнульфа, Кавассила и Дежардена²⁹, Гофмейстера³⁰, выполненные в период 1934—1939 гг

Таблица IV

Сводка измерений спектра ночного неба в области линии атомного азота, $\lambda = 3466,5 \text{ \AA}$

Гози Старые измерения	Гози Новые измерения	Дюфэ	Арнульф	Арнульф, Бернар, Кавассила и Дежарден	Гоф- мейстер
$3489 \text{ \AA} ?$	$3490 \text{ \AA} 3$	$3489 \text{ \AA} 3$	$3487 \text{ \AA} 2$	$3488 \text{ \AA} 4$	$3489 \text{ \AA} 4$
$3471 \text{ \AA} 4$	$3471 \text{ \AA} 3$	$3472 \text{ \AA} 4$	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	$3468 \text{ \AA} 1$	.....
$3462 \text{ \AA} 1$	.....	.....	$3460 \text{ \AA} 1$	$3462 \text{ \AA} 1$	.....
$3454 \text{ \AA} 1$	$3456 \text{ \AA} 1$	.....	.....	$3456 \text{ \AA} 1$	.....
.....	.....	.....	.....	$3452 \text{ \AA} 0$	.....
$3446 \text{ \AA} ?$	$3444 \text{ \AA} 1$	$3446 \text{ \AA} 2$	.....	$3446 \text{ \AA} 1$	$3448 \text{ \AA} 5$

Бернар отмечает²⁶, что «только Дюфэ и Гози наблюдали интенсивную линию около 3471 \AA , в то время как все другие исследователи сообщали, наоборот, о линии $\lambda = 3489 \text{ \AA}$ ». Далее Бернар указывает, что

линий 3468 \AA наблюдалась редко, она замечена только на трёх спектрограммах из общего числа несколько десятков.

Бернар²⁶ подвергает сомнению существование линии $\lambda = 3471 \text{ \AA}$.
Общий вывод Бернара по поводу линии атомного азота ${}^2P \rightarrow {}^4S$

таков: «Если исключить слабую линию $\lambda = 3468 \text{ \AA}$, реальность которой пока не может быть гарантирована, ни одна из интенсивных линий ночного неба не может быть приписана переходу $N_1 ({}^2P \rightarrow {}^4S)$ ».

К отрицательному выводу приходит Бернар и в отношении другой линии атомного азота ${}^2D \rightarrow {}^4S$. Фотографическое определение длины волны $\lambda = 5206 \text{ \AA}$, сделанное Слайфером и Зоммером для линии, которую они связали с этим переходом²⁴, сделано, как об этом можно судить по репродукции спектрограмм, путём использования в качестве репер длин волн зелёной линии 5577 \AA и полос $4710\text{—}4278 \text{ \AA}$ азота, одинаково переэкспонированных и уширенных. В подобных условиях неточность определения может быть значительной и не позволяет сделать какой-либо достоверной идентификации.

Позже Вегард³¹ опубликовал спектрограмму полярных сияний, во всех отношениях сходную со спектрограммой Слайфера и Зоммера, но имеющую в качестве спектра сравнения линии гелия. В этой статье Вегард тщательно обсуждает точность измерений и приписывает линии, наблюденной Слайфером, Зоммером и им самим, длину волны $\lambda = 5238 \text{ \AA}$ с точностью $2\text{—}3 \text{ \AA}$. Новые измерения, выполненные при гораздо большей дисперсии спектрографа, не изменили заметно этот результат: $5238,5 \text{ \AA}$ у Вегарда, 5241 \AA у Вегарда и Гаранга. Таким образом, между длиной волны линии полярных сияний и линии атомного азота ${}^2D \rightarrow {}^4S$ имеется расхождение 40 \AA , которое исключает какую бы то ни было возможность отождествления.

Как мы уже знаем (см. § 3), Дюфэ⁷ ссылается также на спектрограмму ночного неба, полученную Бэбкоком²⁵. На этой спектрограмме с хорошей точностью измерена линия $\lambda = 5194 \text{ \AA}$, которую Дюфэ склонен отождествлять с линией атомного азота ${}^2D \rightarrow {}^4S$, $\lambda = 5199 \text{ \AA}$. Но, по мнению Бернара, это предположение не может быть принято по двум причинам:

1. Линия 5194 \AA имеет другую идентификацию, более обоснованную. Попробуем принять, вместе с Дюфэ, что ошибка определения длины волны составляет 4 \AA и попробуем разобраться в идентификации.

В первом столбце таблицы V собраны длины волн спектра полярных сияний между 5400 и 5000 \AA . Во втором столбце даны длины волн спектра ночного неба по Бэбкоку. В третьем столбце дана наиболее правдоподобная идентификация²⁶. На основании этих данных

Т а б л и ц а V

Спектр полярных сияний и ночного неба в области 5000—5400 Å

Полярные сияния (Бернар)	Ночное небо (Бэбкок)	Интерпретация
5405 Å 1	. . . . .	N ₂ (1 пол.) (11—6) 5406 (5407; 5402; 5388)
5358 1	5374 Å Q	N ₂ (1 пол.) (12—7) 5371 (5373; 5367; 5354)
5330 2	5317 1	N ₂ (A→X) (2—16) 5329; N ₂ (1 пол.) (13—8) 5337 (5339; 5334; 5323)
5301 1		N ₂ (1 пол.) (14—9) 5303 (5307; 5302)
5275 2		N ₂ (1 пол.) (15—10) 5270 (5275)
5236 1	5242 1	N ₂ (A→X) (5—18) 5232; N ₂ (1 пол.) (16—11) 5238 (5244)
5211 0,5	. . . . .	N ₂ (1 пол.) (17—12) 5216 (5214; 5209; 5196)
5194 2	5194 2	N ₂ (A→X) (1—15) 5191,1
5167	. . . . .	N ₂ (1 пол.) (18,13) 5175 (5184; 5179; 5167)
5138 1	5142 0	N ₂ (1 пол.) (19—14) 5145
5094 2	. . . . .	N ₂ (A→X) (4—17) 5094,8
5063 2	5060 1	N ₂ (A→X) (0—14) 5061,5

можно констатировать, что во всём этом интервале спектр хорошо идентифицируется единообразно, как полосы первой положительной системы азота N₂ (последовательность $\nu' - \nu'' = 5$) и полосы Вегарда-Каплана N (A→X), большая значимость которых для полярных сияний и светимости ночного неба установлена давно и очевидным образом. Излучение 5194 Å логически следует отождествить с полосой A→X, $\lambda = 5191,1$ Å, наблюдаемой, кроме того, Кабанном ($\lambda = 5185$ Å) в спектре ночного неба³².

2. Спектрограммы Бэбкока не содержат линии $2P \rightarrow 4S$, $\lambda = 3466,5$ Å. Согласно теоретическим данным (вероятности переходов, см. след. параграф), невозможно наблюдать линию $2D \rightarrow 4S$ без того, чтобы одновременно не обнаруживалась с гораздо большей интенсивностью линия $2P \rightarrow 4S$. Таблица длин волн, установленная Бэбкоком, содержит данные до 3548 Å; однако его спектрограммы показывают ещё очень заметное почернение до 3300 Å и их исследование не обнаруживает никакой интенсивной линии во всём интервале от 3400 до 3500 Å. «При таких обстоятельствах, — пишет

Бернар²⁶, — какая бы то ни было линия в области 5200 Å не может быть отождествлена с переходом $^2D \rightarrow ^4S$.

Отметим, что в опубликованной в 1941 г. обстоятельной работе Эльви, Свингса и Линке о спектрах ночного неба указано³⁸: «За последнее время было опубликовано много соображений о наличии в спектрах ночного неба запрещенной линии атомного азота $^2P \rightarrow ^4S$, $\lambda = 3466,5$ Å. Но безусловно на наших спектрограммах нет линии сколько-нибудь заметной интенсивности с такой длиной волны, поскольку наша линия $\lambda = 3460 \pm 1$ Å является узкой и ошибка 6,5 Å исключается в этой части спектра».

Следует ещё добавить, что в 1939 г. Каплан получил в лабораторных условиях линию $^2D \rightarrow ^4S$, но одновременно он наблюдал с относительно большой интенсивностью («with high relative intensity») линию $^2P \rightarrow ^4S$, теоретически более вероятную³⁴.

Общие выводы Бернара таковы²⁶:

а) Запрещенные линии атомного азота не наблюдаются в спектрах свечения ночного неба.

б) В полярных сияниях отождествлена только линия $^2P \rightarrow ^4S$, $\lambda = 3466,5$.

В 1943 г. Дюфэ вторично выступил с большой работой по этому вопросу³⁷. Он отмечает, что есть совпадение во взглядах его и Бернара в том отношении, что линия $^4S \rightarrow ^2P$ ясно не обнаруживает себя в спектрах ночного неба. «Из текста Бернара, — пишет Дюфэ, — можно заключить, что я держусь другого мнения, но достаточно обратиться к моей первой работе, чтобы убедиться, что там этого вовсе нет. Возможность приписать линию 3471 Å спектру свечности ночного неба была предположена Капланом¹⁶ и Гози⁴¹».

По поводу высказанных Бернаром сомнений в наличии линии 3471 Å в спектре ночного неба Дюфэ указывает, что повторные его измерения совместно с Дежарденом⁴² всех имеющихся спектрограмм в ультрафиолетовой области подтвердили наличие довольно интенсивной линии (интенсивность 2 по 5-балльной шкале) с длиной волны 3469 Å в числе сложной группы линий в области сильного излучения 3488 Å (интенсивность 4). Не представляется невозможным, пишет Дюфэ³⁷, что эта линия есть $^2P \rightarrow ^4S$, но совпадение следует считать более близким для полосы $3 \rightarrow 4$ второй положительной системы N_2 .

Что касается линии $^2D \rightarrow ^4S$ в спектре ночного неба и возможности приписать наблюденную Бэбкоком²⁵ линию 5194 Å либо этому переходу, как предположил прежде Дюфэ⁷, либо полосе $1 \rightarrow 15$ системы Вегарда-Каплана, как это считает Бернар²⁶, то Дюфэ пишет, что «линия Бэбкок1 располагается примерно одинаково (эквидистантно)»

относительно этой молекулярной полосы и атомной линии $^2D \rightarrow ^4S$, так что обе интерпретации одинаково возможны (или одинаково сомнительны).

Во всяком случае, заключает Дюфэ³⁷: «присутствие линии атомного азота $^2D \rightarrow ^4S$ в спектрах светимости ночного неба не является установленным».

Совсем иначе обстоит дело, по мнению Дюфэ, в отношении спектров полярных сияний. По этому вопросу в 1941 г. были получены новые важные данные о спектрах «полярных сияний низких широт», которые мы сейчас и рассмотрим.

5. СПЕКТР „ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ НИЗКИХ ШИРОТ“

Полярные сияния иногда наблюдаются и в более низких широтах. Это происходит обычно во время сильных магнитных бурь и совпадает с повышением солнечной активности (например, в эпоху максимума 11-летнего периода). 1938 г. был богат такими явлениями, и в этот год было сделано много интересных наблюдений³⁷, позволивших начать систематическому изучению «полярных сияний низких широт», как стали их называть. Измерения показали, что их высота значительно больше, чем у «обычных» полярных сияний.

В течение 1941 г. дважды (1 марта и 18 сентября) в средних широтах наблюдались редкие по яркости полярные сияния. В обоих случаях удалось снять их спектры: в южной Франции Дюфэ, Гози и Чэнг Мао-Лину³⁸ и в Арозе (Швейцария) Гетцу³⁹. Во всех случаях была обнаружена линия около 5200 Å.

1 марта Дюфэ, Гози и Чэнг получили спектры сразу на двух спектрографах: один спектр на малодисперсном спектрографе (800 Å/мм), по которому было получено $\lambda = 5201$ Å, другой на спектрографе с большей дисперсией (450 Å/мм), который дал 5206 Å. 18 сентября Дюфэ и Чэнг на этих же спектрографах получили эту линию на семи спектрограммах, на трёх из которых можно было измерить длину волны⁴⁰. Они нашли (спектром сравнения служили ртутные линии): 5199,5, 5198,8 и 5198,6 Å; среднее 5199,0 Å, считая ошибку определения среднего меньше 1 Å.

Дюфэ считает³⁷ доказанным наличие линии атомного азота $^2D \rightarrow ^4S$ (5199 Å) в спектрах полярных сияний на низких широтах, которые возникают на очень больших высотах.

Гетц для этой же линии, полученной на малом кварцевом спектрографе, нашёл сначала $\lambda = 5194$ Å и склонен был отождествить её с линией кальция 5189 Å, но последующие более точные промеры

привели его к значению 5198 \AA и он склонился к отождествлению с линией атомного азота³⁹.

Считая на основании указанных дополнительных данных доказанным существование азотной линии $2D \rightarrow 4S$, Дюфэ в своей последней работе снова подробно обсуждает³⁷ спектры полярных сияний, полученные 7 июня 1928 г. Слайфером и Зоммером²⁴ во Флагстафе (Аризона), в которых эти авторы, как мы знаем, нашли линию 5206 \AA . Вопреки мнению Бернара²⁶ и Вегарда³¹ Дюфэ считает доказанным из всех производимых им сопоставлений (он воспроизводит

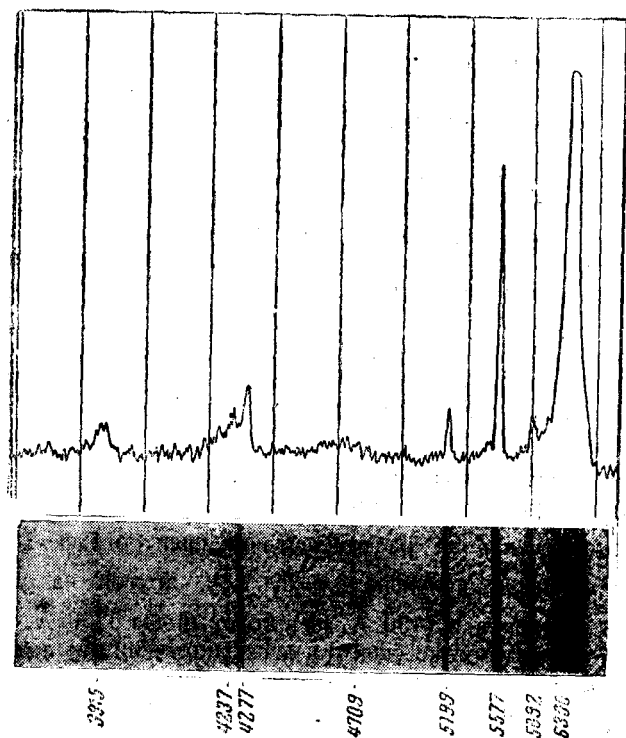


Рис. 2. Спектр „полярного сияния низких широт“, полученный Дюфэ и Ченг Мао-Лином 18 сентября 1941 г. в южной Франции.

в своей работе 4 спектрограммы Слайфера-Зоммера, спектрограмму Вегарда и свои 2 спектрограммы „полярного сияния низких широт“ 18 сентября 1941 г.; одна из этих последних воспроизводится нами на рис. 2), что линия, наблюдавшаяся Слайфером и Зоммером, совпадает с наблюдавшейся им линией 5199 \AA , т. е. также принадлежит к спектру атомного азота.

Как мы уже указывали, «полярные сияния низких широт» характеризуются очень большой высотой, и окончательная точка зрения, к которой приходит Дюфэ, так формулируется им в резюме его последней ³⁷ работы:

«В полярных сияниях линия $2P \rightarrow 4S$ (3466,5 Å) атомного азота была отождествлена Бернардом в Норвегии, а линия $2D \rightarrow 4S$ (5199 Å) — автором и Чэнг Мао-Лином во Франции. Эта последняя много раз наблюдалась в спектрах «полярных сияний низких широт». Её присутствие представляется характерным для некоторых типов полярных сияний, отличающихся очень большой высотой; в спектрах этих сияний линия $2P \rightarrow 4S$ либо очень слаба, либо вовсе отсутствует».

Такова фактическая сторона дела в важном вопросе о присутствии линий атомного азота в спектрах полярных сияний и ночного неба. Эти факты затрагивают важную проблему физики высоких слоёв атмосферы, связанную с возможной диссоциацией азота. В следующих параграфах будут рассмотрены некоторые относящиеся сюда вопросы.

6. ВЕРОЯТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗАПРЕЩЁННЫХ ЛИНИЙ

Обе обсуждаемые азотные линии $2P \rightarrow 4S$ (3466,5 Å) и $2D \rightarrow 4S$ (5199 Å) соответствуют запрещённым переходам азотного атома. Это обстоятельство само по себе не может рассматриваться как исключаящее возможность излучения этих линий атмосферой с заметной интенсивностью, поскольку самые яркие линии спектра светимости ночного неба как раз являются запрещёнными линиями кислородных атомов (зелёная линия $1S_0 \rightarrow 1D_2$, $\lambda = 5577,3$ Å, и красный триплет $1D_2 \rightarrow 3P_{2,1,0}$, $\lambda = 6300,2—6363,9—6391,7$ Å). Однако оно делает желательной более внимательную теоретическую дискуссию вопроса, тем более, что самое наличие линий атомного азота, в отличие от кислородных линий, представляется, как мы видели, не во всех отношениях ясным.

Как известно, «запрещённые переходы» не являются таковыми в абсолютном смысле, но их вероятность много меньше, чем вероятность обычных, незапрещённых переходов. Правила отбора, определяющие запрещённые переходы, справедливы только для излучения, связанного с дипольным моментом (дипольное излучение). Однако наряду с дипольным моментом атом обладает квадрупольным моментом и моментами высших порядков, также вызывающими некоторое излучение (квадрупольное излучение), правда, значительно более слабое. Вероятность переходов, соответствующих дипольному и квадрупольному излучениям, может быть вычислена.

Вычисление вероятности излучения запрещённых линий атомного азота было сделано в 1939 г. почти одновременно и независимо Николем ⁴³ и Пастернаком ⁴⁴. Числовые результаты их расчётов при-

ведены в таблице VI, где A означает вероятность перехода (число переходов за 1 сек.); $1/A$ есть, очевидно, длительность жизни данного уровня. На основании этих данных легко вычислить отношение интенсивностей линий ${}^2P \rightarrow {}^4S$ и ${}^2D \rightarrow {}^4S$. Если обозначить через N_a число атомов азота в метастабильном состоянии 2P и через N_b — число атомов в метастабильном состоянии 2D , то отношение интен-

Таблица VI

Вероятности переходов для запрещённых линий атомного азота по Николью и Пастернаку

Переход	Николь		Пастернак	
	A	$1/A$	A	$1/A$
${}^2P \rightarrow {}^2D, \lambda = 10\,400 \text{ Å}$	—	—	$0,507 \text{ сек}^{-1}$	2 сек.
${}^2D \rightarrow {}^4S, \lambda = 5200 \text{ Å}$	$3,1 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$	9 час.	$5,3 \cdot 10^{-5} \text{ сек}^{-1}$	5,3 часа
${}^2P \rightarrow {}^4S, \lambda = 3466 \text{ Å}$	10^{-2} сек^{-1}	100 сек.	$1,25 \cdot 10^{-1} \text{ сек}^{-1}$	80 сек.

сивностей линий $\lambda_a = 3466 \text{ Å}$ и $\lambda_b = 5200 \text{ Å}$ определяется выражением:

$$\frac{I_{3466}}{I_{5200}} = \frac{N_a}{N_b} \cdot \frac{A_{3466}}{A_{5200}} \cdot \frac{\lambda_b}{\lambda_a}.$$

По данным Николья это составляет:

$$\frac{I_{3466}}{I_{5200}} = 490 \cdot \frac{N_a}{N_b},$$

а по данным Пастернака:

$$\frac{I_{3466}}{I_{5200}} = 360 \cdot \frac{N_a}{N_b}.$$

В 1940 г. Пастернак опубликовал более полный расчёт вероятности переходов запрещённых линий⁴⁵. Он рассчитал вероятности переходов для метастабильных состояний 2P , 3P , 4P , 2D и 3D в связи с излучением запрещённых линий в спектрах туманностей, в которых они играют важную роль. Эти данные Пастернака являются в настоящее время наиболее точными; в таблице VII мы приводим его данные для атомного азота, а также для атомного кислорода, поскольку и этого последнего нам придётся коснуться в связи с обсуждаемой проблемой.

По этим данным, для азотных линий мы имеем:

$$\frac{I_{3466}}{I_{5200}} = 269 \cdot \frac{N_a}{N_b}.$$

Если бы число атомов N_a в возбуждённом состоянии 2P было равно числу атомов N_b в возбуждённом состоянии 2D , то отношение интен-

сивностей этих двух линий было бы равно 269. Поскольку в спектрах полярных сияний линия 3466 \AA имеет небольшую интенсивность, то линия 5200 \AA , как в 269 раз более слабая, едва ли может быть

Таблица VII
Вероятности переходов для запрещённых линий атомов азота и кислорода (по уточнённым данным Пастернака)

Атом	Переход	Длина волны в \AA	A (сек^{-1})
N_1	$2P_{3/2} \rightarrow 4S_{3/2}$	3466,4	0,0067
	$2P_{1/2} \rightarrow 4S_{3/2}$	3466,4	0,0027
	$2D_{5/2} \rightarrow 4S_{3/2}$	5200,7	0,000021
	$2D_{3/2} \rightarrow 4S_{3/2}$	5198,5	0,000014
O_1	$1S_0 \rightarrow 1D_2$	5577,8	2,2
	$1S_0 \rightarrow 3P_1$	2972,3	0,090
	$1S_0 \rightarrow 3P_2$	2958,3	0,00080
	$1D_2 \rightarrow 3P_0$	6391,7	0,0000022
	$1D_2 \rightarrow 3P_1$	6363,9	0,0026
	$1D_2 \rightarrow 3P_2$	6300,2	0,0078

обнаружена в спектре. Но каково в действительности отношение $\frac{N_a}{N_b}$? Чтобы попытаться составить себе хотя бы некоторое суждение об этом, необходимо обратиться к вопросу о возможном механизме образования атомов азота в верхних слоях атмосферы, т. е. механизме диссоциации молекул азота.

7. О ДИССОЦИАЦИИ АЗОТА В ВЕРХНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ

Обращаясь к схеме энергетических уровней молекулы азота (рис. 3), мы видим, что диссоциация невозбуждённой молекулы азота, т. е. находящейся в состоянии $X^1\Sigma$ требует энергии 7,38 электрон-вольт, что значительно превосходит энергию диссоциации кислородной молекулы (5,09 эл.-в.). Если фотодиссоциация молекул кислорода может производиться радиацией $\lambda < 2500 \text{ \AA}$, то для диссоциации молекул азота требуется гораздо более коротковолновая радиация $\lambda < 1680 \text{ \AA}$. Благодаря быстрому убыванию энергии солнечной радиации в сторону коротких длин волн, диссоциация молекул азота солнечными лучами должна считаться гораздо более затруднённой сравнительно с диссоциацией кислородных молекул; эта последняя, согласно известной фотохимической теории атмосферного озона и светимости ночного неба, разработанной Чепменом, играет основную роль в явлениях в высоких слоях атмосферы⁵.

Гораздо легче может протекать диссоциация возбужденных молекул азота, находящихся в состоянии $A^3\Sigma$: она требует не более 3,56 эл.-в. Поскольку состояние $A^3\Sigma$ является метастабильным, вероятность двухступенчатого возбуждения — сначала с переходом из нормального состояния X в возбужденное A , а затем диссоциация — не

может считаться пренебрежимой. Следует обратить внимание на тот факт, что полосы Вегарда-Каплана $A^3\Sigma \rightarrow X^1\Sigma$ являются наиболее интенсивными в спектрах светимости ночного неба, что прямо указывает на наличие большого числа молекул азота в состоянии A .

К аналогичному выводу мы приходим в результате анализа формы потенциальных кривых молекулы азота. Оказывается (см., например, статью Гоzi⁴⁶, опубликованную в 1944 г.), что их форма делает весьма маловероятным поглощение с основного уровня, которое сопровождалось бы диссоциацией молекулы (вероятность ионизации азотной молекулы значительно превосходит вероятность её

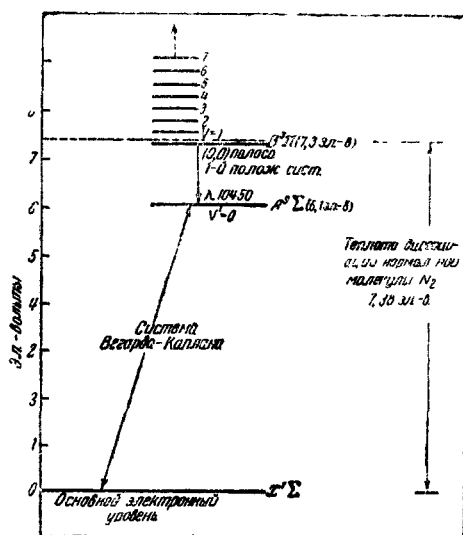
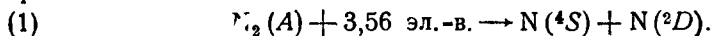


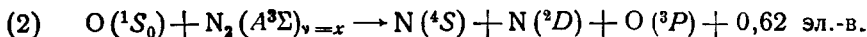
Рис. 3. Схема энергетических уровней молекулы азота N_2 .

диссоциации). Но вероятность диссоциации в результате поглощения с возбужденного уровня значительно больше. Мыслима такая схема процесса:



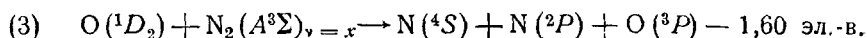
Источником энергии диссоциации могут быть, например, возбужденные атомы кислорода $O(^1S_0)$, имеющие избыток энергии 4,18 эл.-в. (удары второго рода).

Однако реакция

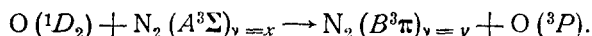


должна считаться маловероятной по двум причинам: а) малая продолжительность жизни атомов $O(^1S_0)$, а именно $1/2$ сек. (см. табл. VII); б) освобождение значительной энергии в кинетической форме в количестве $E_k = 0,62$ эл.-в. плюс E_x (энергия колебаний молекул $A^3\Sigma$); известно, что вероятность ударов второго рода убывает при возра-

стании величины освобождающейся энергии. С этой точки зрения является более вероятной²⁶ реакция при ударах второго рода с атомами $O(^1D_2)$, обладающими гораздо большей длительностью жизни (107 сек.):



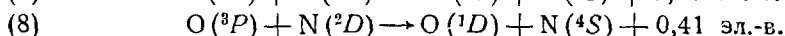
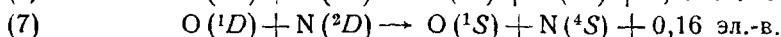
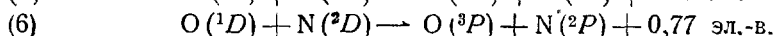
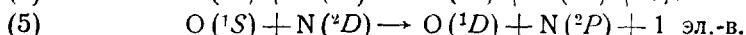
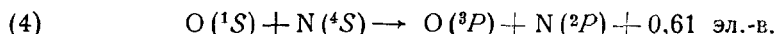
Однако для того чтобы эта реакция была возможной, нужно иметь дополнительный участника, покрывающего недостаток энергии 1,60 эл.в. Таковым может быть, вообще говоря, азотная молекула $A^3\Sigma$, находящаяся на колебательном уровне $v=10$, хотя изучение полос Вегарда-Каплана в спектрах ночного неба показывает, что такие состояния не представлены сколько-нибудь значительно²⁶. Возможно предварительное добавочное возбуждение молекулы (до диссоциации) путём столкновения с кислородным атомом 1D_2 :



Эта реакция переводит молекулу азота из состояний $A^3\Sigma$ ($0 < v < 10$) в состояния $B^3\Pi$ ($3 < v < 12$), наличие которых подтверждается структурой 1-й положительной системы азота.

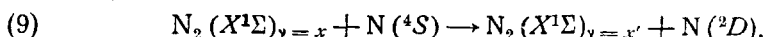
Для суждения о том, какие возбуждённые состояния атомов азота могут быть более частыми, Николь⁴³ и Бернар²⁶ рассматривают различные варианты ударов второго рода азотных атомов с другими частицами. По всем имеющимся данным, главная роль в высоких слоях атмосферы принадлежит атомам кислорода и молекулам азота, и столкновения с ними должны учитываться в первую очередь.

А. Столкновения с атомами кислорода:

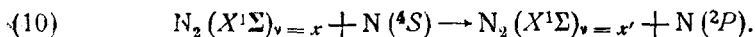


Реакции (4) и (5) мало вероятны из-за малой продолжительности состояния 1S_0 и большого выхода кинетической энергии. Более вероятны реакции (6) и (7), особенно (7), поскольку в ней освобождается весьма малая кинетическая энергия (0,16 эл.-в.). Наконец, реакция (8) должна играть заметную роль, несмотря на освобождение немалой кинетической энергии (0,41 эл.-в.), поскольку главная часть кислородных атомов находится в основном состоянии 3P .

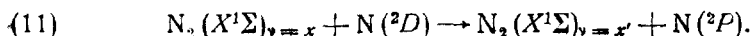
В. Столкновения с молекулами азота, для которых должны приниматься во внимание 2 состояния: основное $X^1\Sigma$ и метастабильное $A^3\Sigma$.



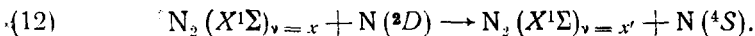
Величина энергии возбуждения атомов (2,38 эл.-в.) делает эту реакцию возможной только при $x > 8$.



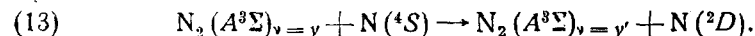
Возбуждение атомов 2P требует энергии 3,56 эл.-в., так что реакция возможна при $x > 12$. В спектрах полярных сияний есть полосы системы Вегарда-Каплана, подтверждающие наличие состояний $X^1\Sigma$ ($7 < v < 18$). Ввиду большой длительности жизни таких молекул реакции (9) и (10) являются достаточно вероятными²⁶.



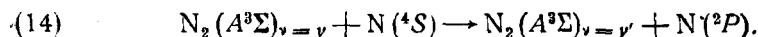
Здесь дополнительная энергия возбуждения для перевода атомов 2D в состояние 2P равна 1,18 эл.-в., так что достаточно $x > 4$. Эта реакция весьма вероятна.



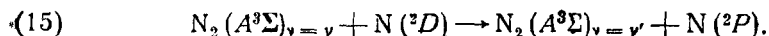
Возвращение атомов 2D на основной уровень освобождает энергию 2,38 эл.-в., которая идёт на возбуждение колебательных уровней. Если до удара $x=0$, то $x'=8$. Эта реакция также весьма вероятна.



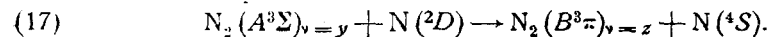
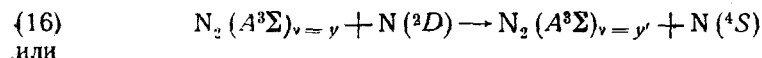
Реакция возможна при $y > 16$, но, как показывают спектры, такие состояния крайне редки.



Эта реакция невозможна, так как за счёт колебаний молекула не может дать энергию 3,56 эл.-в., необходимую для перевода атомов 4S на уровень 2P .



Реакция весьма вероятна, так как может происходить при $y=7$.



Обе эти реакции одинаково существенны, так как энергия 2,38 эл.-в., выделяемая при возвращении атомов 2D на уровень 4S , просто поглощается молекулой азота в форме колебательной энергии (16) или частично в форме колебательной энергии и частично в форме перехода на более высокий электронный уровень (17). В первом случае конечное состояние молекулы суть $A^3\Sigma_{v=y'}$ при $y' > 16$; во втором — это состояние $B^3\pi_{v=z}$ при $z > 5$.

Какие же выводы можно сделать из приведённого краткого анализа основных реакций? Из 14 реакций типа ударов 2-го рода между атомами азота, молекулами азота и атомами кислорода только одна

реакция (9) производит атомы $N(^3D)$, три реакции (10), (11) и (15) производят атомы $N(^2P)$ и семь (7), (8), (11), (12), (15), (16), (17) разрушают возбуждённые состояния $N(^2D)$.

«При таких условиях, — пишет Бернар²⁶, — число атомов 2D , имеющих в высоких слоях атмосферы, является много меньшим числа атомов в состоянии 2P , и, следовательно, отношение интенсивностей линий $^2P \rightarrow ^4S$ и $^2D \rightarrow ^4S$:

$$\frac{I_{3466}}{I_{5200}} = 269 \frac{N_a}{N_b}$$

при $N_a > N_b$ много больше, чем 269».

К аналогичным выводам, правда без столь подробного обоснования, пришёл и Николь⁴³.

8. СТЕПЕНЬ ДИССОЦИАЦИИ АЗОТНЫХ МОЛЕКУЛ В ОБЛАСТИ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Измерение яркости отдельных спектральных линий на разной высоте полярных сияний позволило Бернару²⁶, а затем Дюфэ оценить степень диссоциации азота. В основе их способа лежит сравнение интенсивности азотных линий с кислородными и предположения, что атмосфера является «перемешанной», т. е. отношение числа молекул $\frac{O_2}{N_2} = \frac{1}{4}$ на всех высотах, и что выше 100 км кислород полностью диссоциирован.

Бернар нашёл²⁶ из своих измерений, что линия $N(^2P \rightarrow ^4S)$ имеет интенсивность 1,2 в нижней части полярных сияний и 14 в верхней. По этой же шкале интенсивность зелёной кислородной линии $O(^1S \rightarrow ^1D)$ составляет примерно 400. Считая, что интенсивность $I = NAh\nu$ (N — число атомов, A — вероятность перехода, $h\nu$ — энергия излучаемого кванта), для отношения интенсивностей можно положить:

$$\frac{I_a}{I_b} = \frac{N_a}{N_b} \cdot \frac{A_a}{A_b} \cdot \frac{\lambda_b}{\lambda_a}.$$

Для линии $\lambda_a = 5577 \text{ Å}$ $A_a = 2 \text{ сек}^{-1}$ и для $\lambda_b = 3466 \text{ Å}$ $A_b = 1.25 \cdot 10^{-2} \text{ сек}^{-1}$, поэтому

$$\frac{I_a}{I_b} = 100 \frac{N_a}{N_b},$$

что даёт для нижнего края полярных сияний $\frac{I_a}{I_b} = 400$ и $N_a = 4N_b$,

а для верхнего края $\frac{I_a}{I_b} = \frac{400}{40}$ и $N_b = 3N_a$. Если, кроме указанных выше предположений, допустить ещё, что число возбуждённых атомов 1S или 2P остаётся пропорциональным полному числу атомов, то получается, что в нижней области полярных сияний степень диссоциации азота составляет $\frac{1}{15}$ от числа молекул N_2 , а в верхней части — $\frac{3}{4}$.

Дюфэ⁸⁷ из своих измерений нашёл в верхней части полярных сияний полную диссоциацию молекул азота.

Итак, можно считать установленным, что в области полярных сияний присутствует атомный азот, причём в самых верхних слоях атмосферы степень диссоциации азота, повидимому, весьма велика.

9. ОБ ИНФРАКРАСНОМ ИЗЛУЧЕНИИ АТОМНОГО АЗОТА

Является ли присутствие атомного азота характерным только для периода полярного сияния или же оно имеет место постоянно?

В этом вопросе решающее слово должно принадлежать спектрам светимости ночного неба. Если атомный азот постоянно присутствует в верхних слоях атмосферы и притом не только в области полярных сияний, но и на всех широтах, то естественно ждать наличия азотных линий в спектрах светимости ночного неба. Однако мы видели (§§ 3 и 4), что предположения о присутствии в этих спектрах азотных линий 3466 и 5200 Å не получили пока бесспорных доказательств. Но если взглянуть снова в таблицу вероятностей переходов для линий атомного азота (см. табл. VI), то нельзя не обратить внимания на то, что наибольшей вероятностью, значительно превосходящей вероятность других переходов, отличается переход ${}^2P \rightarrow {}^2D$ с излучением инфракрасной линии $\lambda = 10\,400$ Å. Присутствие атомного азота должно обнаружиться в первую очередь излучением этой линии. К сожалению, эта область спектра является очень трудной для исследования.

Таким образом, складывается следующая интересная ситуация: если бы удалось произвести надлежащие исследования в области 10 400 Å, то можно было бы сразу же продвинуть проблему атомного азота. Такая ситуация сложилась к 1942—1944 гг. И вот случилось так, что именно к этому времени Стеббинсу, Вайтфорду и Свингсу удалось проникнуть в указанную область спектра излучения ночного неба с помощью фотоэлектрической установки на Моунт Вильсон. Что же они нашли?

Мы уже знаем (см. §§ 1 и 2), что было обнаружено излучение с длиной волны очень близкой к 10 400 Å, а именно, $10\,440 \pm 25$ Å. Более того, по первоначальным определениям Стеббинса, Вайтфорда и Свингса было сразу же получено как раз то значение длины волны, «какое нужно»: $\lambda = 10\,400$ Å.

Конечно, при таких обстоятельствах возникал большой соблазн немедленно опубликовать предварительное сообщение об открытии инфракрасного излучения атомного азота. Но Стеббинс, Вайтфорд и Свингс встали на другой путь. Они задержали публикацию до окончания более точных измерений длины волны с помощью трёх вспомогательных линий 10 336 Å, 10 407 Å и 10 478 Å, что позволяло «взять в вилку» исследуемую линию $\lambda = 10\,400$ Å, а следовательно,

определить её длину волны более надёжно. Конечно, такая осторожность и тщательность похвальны. В результате более тщательных измерений длины волны Стеббинс, Вайтфорд и Свингс пришли к выводу, что эта линия не связана со спектром атомного азота и предложили совсем другую идентификацию.

Забегая вперёд, следует сказать, что предложенная Стеббинсом, Вайтфордом и Свингсом идентификация весьма интересна и серьёзно ими разработана. Но нельзя до того не отметить, что скептицизм этих авторов по отношению к гипотезе атомного азота пока обоснован ими, на наш взгляд, в меньшей степени, чем это получается по их формулировкам в цитируемой их работе. Сейчас, когда вопрос об окончательной идентификации нельзя ещё, как мы постараемся показать дальше, считать решённым, а проблема атомного азота в высоких слоях атмосферы ещё будет, несомненно, предметом многих работ, открытий и широкой дискуссии в течение ряда лет, уместно отметить, что упомянутый скептицизм Стеббинса, Вайтфорда и Свингса имеет, по нашему впечатлению, некоторую подоплёку.

В развернувшейся с 1939 г. дискуссии об атомном азоте американские авторы не приняли непосредственного участия, хотя одним из важных вопросов полемики был как раз анализ спектрограмм, опубликованных Бэбкоком (см. §§ 3—4). Но по существу отношение американских астрофизиков к предположениям об атомном азоте было, несомненно, отрицательным. Например, в работе Эльви, Свингса и Линке о спектрах ночного неба (1941 г.) говорится*): «Тщательное изучение нашего материала убедило нас в том, что много анонсированных линий в действительности не присутствует на наших спектрограммах... За последнее время была опубликована обширная дискуссия о наличии в спектрах ночного неба запрещённой линии атомного азота $3466,5 \text{ \AA}$. Но линии с такой длиной волны сколько-нибудь заметной интенсивности безусловно нет...» Остается впечатление, что американские астрофизики, открыв линию $10\,400 \text{ \AA}$, которая могла оказаться основным доказательством отвергнутой ими ранее гипотезы атомного азота, пришли в некоторое замешательство, но потом мобилизовали все ресурсы, чтобы все-таки показать несостоятельность этой гипотезы.

Однако обратимся к фактическому материалу.

10. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА

Стеббинс, Вайтфорд и Свингс указывают два возможных способа идентификации линии $\lambda = 10\,440 \pm 25 \text{ \AA}$. Первый — это известное нам, давно предсказанное излучение атомного азота, запрещённый мульт

*) Elvey, Swings and Linke, *Astrophys. Journ.* 93, № 2 (1941 г.), стр. 337—338.

типлет $^2P \rightarrow ^2D$ (см. рис. 1). Второй вариант связан с полосатым спектром молекулярного азота: первая положительная система азота, $B^3\pi \rightarrow A^3\Sigma$. О первом варианте в работе говорится коротко, и этот вариант быстро отвергается. Второй вариант разбирается подробно, причём приводятся, следует признать, новые и очень важные соображения. Другое дело, насколько убедителен их окончательный вывод.

Стеббинс, Вайтфорд и Свингс приводят таблицу линий атомного азота (табл. VIII), в которой указаны также значения потенциала возбуждения в электрон-вольтах и вероятности соответствующих переходов.

Большинство наблюдателей, отмечают наши авторы, сходится на том, что в спектрах светимости ночного неба нет дублета 5198—5200, что и неудивительно, поскольку вероятность соответствующего перехода очень мала. Иначе дело обстоит с линией 3466,4.

Линии атомного азота

Таблица VIII

Переход	Длина волны в Å	Потенциал возбуждения	Вероятность перехода
$^2D \rightarrow ^4S$	5197,8	2,4	0,000021
	5200,1	2,4	0,000014
$^2P \rightarrow ^4S$	3466,5	3,6	0,0094
$^2P \rightarrow ^2D$	10 407,3	3,6	0,21
	10 397,8	3,6	0,25

Хотя самой интенсивной линией должен быть инфракрасный дублет 10 397,8—10 407,3 Å со средней длиной волны 10 402,7 Å, но тот же верхний уровень является исходным для излучения линии 3466,5, которая должна иметь интенсивность лишь в $(0,21 + 0,25):0,0094$ раз, т. е. в 49 раз меньшую; между тем такой линии в спектре ночного неба либо нет вовсе, либо, во всяком случае, её можно лишь едва заметить на спектрограммах. Линия в 50 раз более интенсивная, чем 3466 Å, была бы слабой сравнительно с зелёной или красной линией кислорода O_1 , но зелёная линия не оказывала никакого влияния на описываемые фотоэлектрические измерения, в то время как инфракрасное излучение оказывает очень большое действие на фотоэлемент. Следует полагать, что не излучение N_1 вызывает мощный эффект в области 10 440 Å. «Более того,— пишут Стеббинс, Вайтфорд и Свингс², — измеренная длина волны максимума интенсивности излучения ночного неба составляет величину определённо большую, чем у линии атомного азота, и разность длин волн представляется большей, чем ошибка измерений».

Итак, аргументация Стеббинса, Вайтфорда и Свингса основана, с одной стороны, на фотометрических данных, а с другой — на измерении длины волны. Но нам кажется, что и в том и в другом случае авторы преувеличивают основания, из которых исходят их выводы. В самом деле, что касается фотометрических измерений, то правильнее будет сказать, что в работе Стеббинса, Вайтфорда и Свингса нет таких измерений, на которых можно было бы делать выводы фотометрического характера. Какими величинами, количественными данными они располагают для своих выводов? Эти данные таковы: 1) Цифра «49» — линия 3466 \AA должна быть «только» в 49 раз менее интенсивной, чем линия 10400 \AA . 2) Зелёная линия 5577 \AA не оказывала влияния на фотоэлектрические измерения, а влияние инфракрасной линии было очень большим (см. табл. I). Но для того чтобы делать количественные выводы, нужно учесть различие спектральной чувствительности фотоэлемента для $\lambda = 5577 \text{ \AA}$ и $\lambda = 10400 \text{ \AA}$ и различие в пропускании светофильтров. Ни то, ни другое в работе не учтено, а между тем известно, что кислородно-цезиевый фотоэлемент имеет максимум чувствительности в инфракрасной области спектра и что светофильтры, выделяющие узкую зону в зелёной части спектра, неизбежно обладают малым пропусканием (15—30%) в максимуме, в то время как инфракрасные фильтры отличаются высокой прозрачностью.

Нам представляется, что отрицать вариант атомного азота на основании фотометрических оценок указанного рода преждевременно ввиду недостаточности последних. Что же касается измерения длины волны, то полученное Стеббинсом, Вайтфордом и Свингсом значение $10440 \pm 25 \text{ \AA}$ на 33 \AA отличается от теоретического значения 10407 \AA одной из компонент инфракрасного дуплета и на 38 \AA от среднего значения длины волны дуплета 10402 \AA . Это больше, чем указанная ошибка измерений $\pm 25 \text{ \AA}$. Но как определена величина этой ошибки? Сами авторы пишут²: «Мы не нашли лучшего способа, как взять среднее из двух полученных значений 10427 и 10452 и оценить вероятную ошибку величиной такого же порядка, как разность двух определений». Несомненно, что этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении. Может быть окажется возможным получить spectroграмму в этой части.

Переходим ко второму варианту отождествления инфракрасного излучения ночного неба.

11. ПОЛОСА (с,о) ПЕРВОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АЗОТА

Эта полоса исследована в лабораторных условиях Поткером⁴⁷, а также Фростом и Ольденбергом⁴⁸. Измерения с термометром на призмённом спектрографе дали максимум у 10420 \AA , а с помощью диф-

фракционной решётки было обнаружено 4 пика между 10350 \AA и 10460 \AA , из которых 2 самых интенсивных у 10410 \AA и 10430 \AA . При фотографических измерениях отдельные линии были различимы, но их не удалось измерить точно.

Фрост и Ольденберг приводят часть спектра полосы (0,0), снятого с помощью вогнутой дифракционной решётки с фокусом 21 фут; на снимке видно много отдельных разрешённых линий, но указанные авторы не приводят анализа полосы.

Можно попытаться оценить интенсивность максимума полосы (0,0) исходя из хорошо измеренных полос N_2 в видимой части спектра⁴⁹, но, как справедливо указывают Стеббинс, Вайтфорд и Свингс², такой путь труден и ненадёжен, особенно из-за специфического влияния температуры тех высоких слоёв атмосферы, где возникает инфракрасное излучение ночного неба. Подобная оценка даёт длину волны максимума $\lambda = 10450 \text{ \AA}$.

Сопоставляя все указанные данные, можно заключить об удовлетворительном совпадении длины волны излучения ночного неба и полосы (0,0) молекулярного азота².

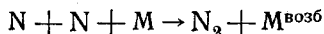
По интенсивности полоса (0,0) должна быть одной из самых сильных полос всей первой положительной группы, так как она соответствует переходам при $\Delta v = 0$. Отсутствие полосы N_2 в спектре поглощения солнечных лучей обусловлено высокой энергией (6,1 эл.-в.) нижнего уровня $A^3\Sigma$.

Однако, если приписать интенсивное излучение ночного неба полосе (0,0), то в спектре ночного неба должны быть достаточно интенсивными и другие полосы первой положительной группы, во всяком случае, если судить на основании данных о свечении азота в газовом разряде при лабораторных исследованиях. Некоторые компоненты спектра ночного неба в области от 5000 \AA до 6000 \AA предположительно приписываются полосам первой положительной группы, но это излучение ночного неба крайне слабо и многое в отождествлении является ещё весьма сомнительным. Кроме того, Стеббинс, Вайтфорд и Свингс отмечают, что им не удалось обнаружить на своей фотоэлектрической установке никакого излучения заметной интенсивности у $\lambda = 8910 \text{ \AA}$, где находится максимум полосы (1,0). По их мнению это означает, что лишь небольшое число молекул N_2 находится в возбуждённом состоянии $v' = 1$ уровня $B^3\Pi$. Следовательно, отождествление инфракрасного излучения ночного неба с полосой молекулярного азота заставляет предположить особый механизм возбуждения, специфически усиливающий полосу (0,0) относительно других вибрационных переходов. Стеббинс, Вайтфорд и Свингс высказывают в этом направлении некоторые соображения.

Теплота диссоциации молекулярного азота обычно принималась⁵⁰ равной $D(N_2) = 7,383$ эл.-в. (из данных о явлении преддиссоциации),

но недавно были получены указания⁵¹ на более высокое значение $D(N_2) = 9,764$ эл.-в. Стеббинс, Вайтфорд и Свингс принимают в своих вычислениях $D(N_2) = 7,383$ эл.-в. Нужно заметить, что предполагаемый ими механизм возбуждения полосы (0,0) целиком зависит от правильности принятого значения $D(N_2)$. На рис. 3 была дана схема энергетических уровней молекулы N_2 . Значение 7,38 эл.-в. почти точно совпадает с энергией возбуждённого состояния $\nu' = 0$ электронного уровня $B^3\pi$, который является верхним уровнем первой положительной системы излучения $N_2: B^3\pi \rightarrow A^3\Sigma$. Теплота диссоциации молекулы N_2 как раз немного больше, чем энергия возбуждения уровня $B^3\pi$, $\nu' = 0$, но меньше, чем энергия возбуждения уровня $B^3\pi$, $\nu' = 1$.

Предположим теперь, что в течение дня молекулы N_2 или другие молекулы, содержащие атомы N, диссоциированы на атомы N, благодаря поглощению далёкой ультрафиолетовой радиации. Эти атомы N воссоединяются в течение ночи. Но реакция рекомбинации



требует третьего участника M, чтобы были выполнены законы сохранения энергии и момента количества движения. Поскольку молекулы N_2 являются (согласно гипотезе «перемешанной атмосферы») главной составной частью атмосферы на всех высотах, именно они часто могут быть третьим партнёром M в реакции. Если энергия диссоциации 7,38 эл.-в., освобождаемая при рекомбинации $N + N$, передаётся третьей частице (N_2), то за этот счёт может возбуждаться уровень $B^3\pi$, $\nu' = 0$. Состояние $\nu' = 1$ или ещё более высокое вибрационное состояние электронного уровня $B^3\pi$ может возбудиться путём таких процессов только при условии использования дополнительной кинетической энергии. Но необходимые для этого большие скорости атомов N или молекул N_2 должны быть крайне редкими даже в относительно тёплых верхних слоях атмосферы. Поэтому, если описанный механизм правилен, то мы должны ожидать, что интенсивной будет только полоса, возникающая при переходе с уровня $\nu' = 0$. Второй по интенсивности должна быть полоса у $\lambda = 12\,253 \text{ \AA}$, соответствующая переходу (0,1), а третьей — полоса (0,2) у $\lambda = 14\,790 \text{ \AA}$. Обе эти полосы не могли быть обнаружены фотоэлектрическими измерениями Стеббинса, Вайтфорда и Свингса, поскольку фотоэлемент не чувствителен в этой далёкой области спектра.

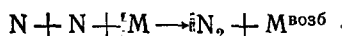
Изложенная гипотеза Стеббинса, Вайтфорда и Свингса заслуживает серьёзного внимания. Впредь до получения более определённых данных, она, безусловно, должна рассматриваться наравне с гипотезой атомного азота. Но считать её более обоснованной, чем гипотезу атомного азота, по нашему мнению, пока нельзя по следующим причинам.

а) Гипотеза происхождения новой инфракрасной линии за счёт молекулярного азота целиком зависит от принятого значения теплоты

диссоциации $D(N_2) = 7,38$ эл.-в. Увеличение этой цифры даже на несколько десятых долей эл.-в. опрокинуло бы гипотезу, поскольку в этом случае было бы непонятным отсутствие в свечении ночного неба другой интенсивной инфракрасной линии $\lambda = 8910 \text{ \AA}$. Между тем более новые определения Гэйдона⁵¹ дают для теплоты диссоциации совсем другое значение $D(N_2) = 9,76$ эл.-в.

б) Имеющиеся данные о длине волны новой инфракрасной линии по своей точности не позволяют отличить атомную линию азота $10\,397 - 10\,407 \text{ \AA}$ от молекулярной полосы, для которой лабораторные измерения дают в одном случае максимум у $10\,420 \text{ \AA}$, а в другом случае 4 пика, из них 2 более интенсивных у $10\,410$ и $10\,430 \text{ \AA}$.

Наконец, нельзя не отметить внутреннего противоречия в рассуждениях Стеббинса, Вайтфорда и Свингса. Они отрицают существование атомного азота в верхних слоях атмосферы, но выдвигаемая ими гипотеза потеряла бы смысл в том случае, если бы атомного азота не было в атмосфере. В самом деле, в этом случае реакция



была бы невозможной.

Дальнейший существенный прогресс в обсуждаемом вопросе может быть достигнут в том случае, если окажется возможным получить хорошие спектрограммы в области $10\,300 - 10\,500 \text{ \AA}$. Не исключена возможность, что в этом случае были бы обнаружены оба излучения азота в области $10\,400 \text{ \AA}$: и атомное, и молекулярное.

Новое излучение ночного неба в инфракрасной области спектра представляет собой весьма интересный и важный объект для дальнейших исследований, значимость которого увеличивается тем, что это излучение, повидимому, связано с фундаментальной проблемой атомного азота в высоких слоях атмосферы.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. J. Stebbins, A. E. Whitford and P. Swings, A strong infrared radiation from molecular nitrogen in the night sky, *Phys. Rev.* **66**, No 7/8, 225—226 (1944).
2. J. Stebbins, A. E. Whitford and P. Swings, A strong infrared radiation from molecular nitrogen in the night sky, *Astrophys. Journ.* **101**, 39 (1945).
3. И. А. Хвостиков, Свечение ночного неба, *УФН.*, **17**, вып. 2, 121—174 (1937).
4. V. M. Slipher, *Monthly Not.* **93**, 666 (1939).
5. И. А. Хвостиков, Очерки по физике атмосферы, *УФН.*, **19**, вып. 1, 49—83 и вып. 2, 145—194.
6. Georges Dejaridin, Light of the night sky, *Rev. of Modern Physics*, **8**, No.1, 1—21 (1936).

7. Jean Dufay, Sur la présence de l'azote atomique dans la haute atmosphère, *Annales d'Astrophysique*, 2, No. 2 (1939).
8. M. Nicolët, *Naturwiss.* 51, 839 (1938).
9. K. T. Compton and J. C. Boyce, *Phys. Rev.* 33, 145 (1929).
10. J. Dufay, *Comptes Rendus*, 198, 107 (1934).
11. J. Dufay, Observation du spectre d'émission du ciel nocturne dans l'ultra-violet, *Journ. d. Phys. et le Rad.*, 5, 523—526 (1934).
12. J. Dufay, *Public. Observatoire Lyon*, 1, No. 9 (1934).
13. J. Gauzit, L'extrémité ultraviolette du spectre du ciel nocturne, *Comptes Rendus*, 199, 29 (1934).
14. J. Gauzit, L'extrémité ultraviolette du spectre du ciel nocturne, *Journ. de Phys. et le Rad.* 5, 527—532 (1934).
15. J. Gauzit, *Annales d'Astrophysique*, 1, 334 (1938); *Public. Observatoire Lyon*, 2, 253 (1938).
16. L. Kaplan, 4-ème Rapport de la Commission pour l'étude des relations entre les phénomènes solaires et les phénomènes terrestres, 140 (1936).
17. J. Kaplan, *Nature*, 141, 645, 1139 (1938).
18. R. Bernard, *Nature*, 141, 1140 (1938).
19. J. Kaplan, *Phys. Rev.* 54, 541 (1938).
20. R. Bernard, *Bull. Soc. Française de Physique*, No. 426, 157 (1938).
21. L. Vegard, *Geofysiske Publikasjoner*, XIII, 5, 11 (1941).
22. R. Bernard, A. propos de la longueur d'onde de la raie de l'azote atomique dans l'aurore boréale, *Journ. Phys. et le Radium (VIII)*, 6, No. 12, 29 (1945).
23. A. Arnulf, *Comptes Rendus*, 202, 1412 (1936).
24. V. M. Slipher und Z. A. Sommer, *Naturwiss.* 17, 802 (1929).
25. H. W. Babcock, *Public. Astron. Soc. Pacific*, 51, No. 299, 47 (1939).
26. René Bernard, L'azote atomique dans l'atmosphère supérieure, *Annales d'Astrophysique*, 4, No. 1 (1941).
27. R. Bernard, *Journ. de Phys.*, 8, 157 (1939); *Phys. Rev.* 55, 511 (1939).
28. R. Bernard, *Comptes Rendus*, 208, 1331 (1939).
29. A. Arnulf, R. Bernard, D. Cavassilas et Déjardin, *Comptes Rendus*, 208, 1331 (1939).
30. C. Hoffmeister, Das Spektrum des Nachthimmels und des Sodiakallichts nach Beobachtungen auf der Astronomischen Station bei Windhuk, Südwesafrika, *Zeits. für Astrophysik*, 19, No. 2, 116—131 (1939).
31. L. Vegard, *Naturwiss.* 17, 980 (1929).
32. J. Cabannes, Sur l'origine des radiations émises par le ciel nocturne, *Journ. de Phys. et Rad.*, 5, 607—613 (1934).
33. C. T. Elvey, P. Swings and Walter Linke, The spectrum of the night sky, *Astrophys. Journ.* 93, No. 2, 337—348 (1941).
34. J. Kaplan, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, 14, No. 4, 16 (1939).
35. S. Störmer, Photographische Höhenmessungen und Spektre des grossen Nordlichtes vom 25. bis 26. Januar 1938, *Naturwiss.* 26, 63 (1938).
36. Z. Harang, Das Polarlicht und die Probleme der höchsten Atmosphärenschichten. Probleme der Kosmischen Physik, Bd. XX, Leipzig (1940).
37. Jean Dufay, Les raies interdites de l'atome d'azote dans les spectres des aurores et du ciel nocturne, *Annales d'Astrophysique*, 6, No. 3—4, 81—89 (1943).
38. J. Dufay, J. Gauzit et Tcheng Mao-Lin, *Cahier de Physique*, 1, 61 (1941); *Public. Observatoire Lyon*, 3, No. 3.
39. P. Götz, *Naturwissenschaften*, 29, 690, 1941; *Zeitschrift f. Angewandte Meteorologie*, 58, 357 (1941).
40. J. Dufay et Tcheng Mao-Lin, *Bull. Soc. Astron. Populaire Toulouse*, 32, 252 (1941); *Comptes Rendus*, 213, 692 (1941); *Cahier de Physique*, 8, 51 (1942); *Public. Observatoire Lyon*, 3, No. 8.
41. J. Gauzit, *Nature*, 142, 572 (1938).

42. J. Dufay et G. Déjardin, *Cahier de Physique*, 12, 36 (1942); *Public. Observatoire Lyon*, 3, No 11.
 43. M. Nicolet, *Le problème d'arête atomique dans l'atmosphère supérieure, Ciel et Terre*, 55, 257 (1939); *Institut Royal Météor. de Belgique, Mémoire*, T.IX.
 44. S. Pasternack, *Publ. Astr. Soc. Pac.*, 51, No.361, 160 (1939).
 45. S. Pasternack, *Transition probability of forbidden lines, Astrophys. Journ.*, 92, No.2, 129—155 (1940).
 46. J. Gauzit, *The composition of the upper atmosphere according to the dissociation of oxygen and nitrogen molecules, Bulletin American Meteorol. Society*, 25, 245—250 (1944).
 47. A. H. Poetker, *Phys. Rev.* 30, 812 (1928).
 48. A. A. Frost and O. Oldenberg, *Phys. Rev.* 48, 66 (1935).
 49. Pearse and Gaydon, *The identification of molecular spectra, London* (1941).
 50. G. Herzberg und H. Spöner, *Zeits. f. Phys. Chem.* 26, 1 (1934).
 51. A. G. Gaydon, *Nature*, 153, 407 (1944).
-