

СУМЕРЕЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СВЕЧЕНИЯ НАТРИЯ В ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

С тех пор как В. И. Черняев и М. Ф. Вукс¹ открыли «вспышку» жёлтой линии натрия в спектре сумеречного неба, вопрос о высотном распределении натрия в земной атмосфере не раз подвергался экспериментальному и теоретическому изучению (см., например,²).

Брикяр и Кастлер³ показали, что линия натрия в сумерки имеет малую ширину и слабо поляризована ($\sim 9\%$). Этот результат позволил заключить, что сумеречное свечение натрия обусловлено резонансным рассеянием прямых лучей Солнца. Учитывая ослабление и рефракцию солнечных лучей на пути сквозь атмосферу, Брикяр и Кастлер нашли, что натрий должен располагаться сравнительно тонким слоем на высоте 75 км. К тем же результатам привели их измерения ширины натриевой линии, что позволило оценить высоту слоя, используя зависимость ширины линии от температуры и резко выраженную высотную зависимость температуры на соответствующих уровнях. Барбье⁴ оценил высоту слоя натрия в 70 км и пришёл к выводу, что у верхней границы слоя концентрация натрия убывает экспоненциально со шкалой высот $H = 8$ км.

Использование более совершенной аппаратуры и более тщательный теоретический анализ метода обработки сумеречных данных позволили авторам реферируемых работ^{5,6} внести дальнейшие уточнения в этот вопрос.

Измерения велись при помощи фотоэлектрического спектрометра обеспечивавшего получение соответствующего участка спектра свечения сумеречного неба в течение минуты. Первоначально (при зенитных расстояниях Солнца Z от $94^\circ,5 \div 96^\circ$ до $98^\circ,5 \div 99^\circ$) спектрометр направлялся в зенит, а затем направлялся под малым углом к горизонту ($75^\circ \div 85^\circ$), и наблюдения продолжались до $Z = 102 - 103^\circ$. (Во время утренних сумерек порядок измерений обращался.) Таким образом, удавалось получить до 30 спектров в зените и 30 спектров у горизонта в течение одних сумерек. Измерения велись при спектральной ширине щели 5 Å и 10 Å, вследствие чего дублет не разрешался. Для ослабления фона сравнительно сильно поляризованного рассеянного света использовался поляроид. Это позволяло растянуть измерения до высот земной тени порядка 20—30 км; при меньших высотах тени эмиссионная линия натрия полностью маскировалась фраунгоферовой линией поглощения. Наличие последней учитывалось при определении интенсивности эмиссионной линии.

Обработка данных измерений велась следующим образом. Поток рассеянного атомами натрия солнечного излучения, достигающий поверхности Земли по направлению в надир, равен

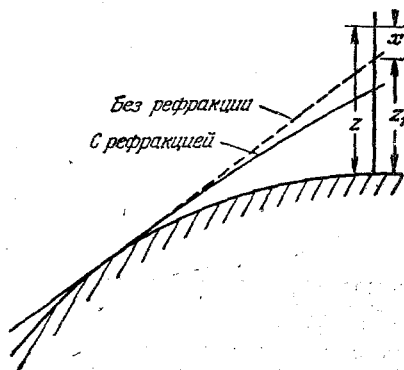


Рис. 1.

$$K(z_1) = \int_{-25}^{\infty} J_0 T(x) \sigma n(z) dx \text{ квантов/см}^2 \text{сек стерадиан},$$

где z — высота рассеивающего слоя (см. рис. 1), z_1 — высота тени Земли без учёта рефракции, $x = z - z_1$, J_0 — интенсивность излучения Солнца за пределами атмосферы, σ — поперечное сечение рассеяния, n — концентрация атомов натрия и $T(x)$ — функция, учитывающая ослабление и рефракцию прямых лучей Солнца на пути до зенита наблюдателя. При расчёте функции $T(x)$ принималось во внимание, помимо рассеяния света воздухом и рефракции, поглощение озона, а также угловые размеры Солнца. Вид этой функции показан на рис. 2.

Далее предполагались три различных типа высотного распределения натрия (A , B и C на рис. 2). Расчёты показали, что во всех трёх случаях $K(z_1) = J_0 \sigma n_c f(y)$, где n_c — концентрация натрия на высоте z_c (рис. 2), $y = z_c - z_1$ и $f(y)$ имеет различный вид для различных предположений

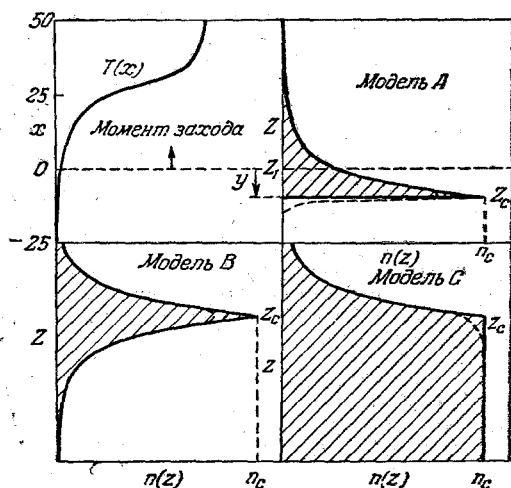


Рис. 2.

о высотном распределении натрия. Найденные таким путём значения $K(y)$ сопоставлялись затем с наблюдаемыми значениями интенсивности натриевой линии для различных z_1 . Наблюдения у горизонта редуцировались к зениту с учётом зависимости видимой яркости слоя от угла наблюдения, что осуществлялось путём деления наблюдаемой яркости на 3,3.

Пример получаемой экспериментально зависимости $\lg K(z_1)$ от z_1 показан на рис. 3. Из рисунка видно, что данные измерений в зените и у горизонта находятся в хорошем согласии. Линиями показаны результаты теоретического расчёта при различных предположениях о высотном распределении натрия. Очевидно, что предположение C полностью отпадает, тогда как выбор между предположениями A и B затруднителен вследствие малой чувствительности метода к виду распределения. Однако авторы указывают, что совокупность данных свидетельствует скорее в пользу предположения B , чем A . Определение высоты максимума концентрации натрия производилось путём отыскания значения z_1 , соответствующего $y=0$ на теоретической кривой $K(y)$, наилучшим образом лежащей на экспериментальные точки (на рис. 3 эти значения $z_1 = z_c$

отмечены вертикальными черточками). Найденные таким способом значения высоты расположения максимума концентрации натрия z_c сведены в таблице.

Результаты определения высоты максимума концентрации натрия

Дата	z_c в км	Дата	z_c в км
Утро 14 июля 1952 г.	86	Вечер 25 мая 1953 г.	79
Утро 28 июля 1952 г.	91	Утро 26 мая 1953 г.	85
Вечер 18 апреля 1953 г. . . .	84	Вечер 5 июня 1953 г.	87
Вечер 19 апреля 1953 г. . . .	84	Утро 6 июня 1953 г.	88
Утро 19 мая 1953 г.	86	Вечер 6 июня 1953 г.	85
Вечер 19 мая 1953 г.	86	Утро 20 августа 1953 г. . . .	80
Утро 20 мая 1953 г.	86	Вечер 20 августа 1953 г. . .	91
Вечер 20 мая 1953 г.	76	Вечер 28 августа 1953 г. . .	87
Утро 21 мая 1953 г.	80		

Среднее $z_c = 84,7 \pm 0,7$ км

В таблице указана статистическая ошибка $\pm 0,7$ км. Однако возможны и систематические ошибки. В частности, переход от модели В к модели А приводит к уменьшению высоты z_c примерно на 5 км. Поэтому авторы в качестве окончательного результата приводят значение $z_c = 85 \pm 3$ км.

В случае модели В предполагалось, что концентрация натрия убывает в обе стороны от максимума по экспоненциальному закону с масштабом высот $H = 7,5$ км. Авторы считают, что это предположение справедливо

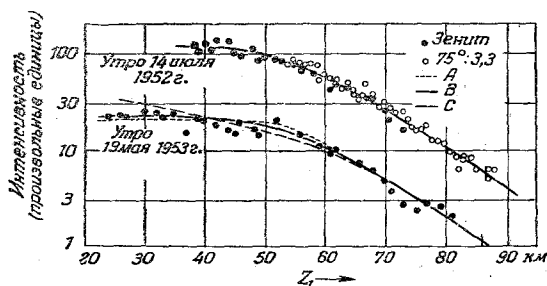


Рис. 3.

от 85 км вплоть до высот порядка 100, а возможно и 115 км, но что по направлению вниз концентрация натрия в действительности падает гораздо быстрее. Абсолютных измерений яркости натриевого свечения авторы не производили. Однако по данным Брикара и Кастлера они оценивают концентрацию атомов натрия в максимуме как $n_e \cong 10^4$ атомов/см³.

Обращаясь к рассмотрению химического равновесия и считая, что на таких высотах тройные соударения практически неэффективны, авторы

ограничиваются двумя реакциями:



Это приводит их к выводу, что

$$\frac{n(\text{Na})}{n(\text{NaO})} \cong 3 \cdot 10^{-4} \frac{n(\text{O})}{n(\text{O}_3)}.$$

Таким образом, натрий должен находиться преимущественно в атомарном состоянии, если отношение концентрации атомарного кислорода к концентрации озона превышает $3 \cdot 10^3$. Поскольку концентрация атомарного кислорода растёт, а концентрация озона убывает с высотой, относительная концентрация атомарного натрия должна возрастать с увеличением высоты. Следовательно, максимальную концентрацию атомарного натрия следует ожидать на высоте, где $\frac{n(\text{O})}{n(\text{O}_3)} \cong 3 \cdot 10^3$.

По данным Батеса и Николе⁷ такое соотношение между концентрациями O и O₃ имеет место на высоте около 80 км. Это находится в хорошем согласии с полученной авторами^{5,6} высотой расположения максимума концентрации атомарного натрия.

Далее, исходя из ракетных данных о коротковолновом излучении Солнца, авторы^{5,6} оценивают концентрацию атомарного натрия и строят зависимости ожидаемой относительной интенсивности суммарного свечения натрия от продолжительности светлого времени суток для различных значений коэффициента рекомбинации. Эти зависимости различны для утренних и вечерних сумерек.

Таким образом, должны иметь место сезонные и суточные вариации интенсивности свечения. Ожидаемый суточный эффект ярче всего выражен в период равноденствия, но не велик. Сезонный эффект на больших широтах много больше, и авторы полагают, что дальнейшие измерения позволят оценить коэффициент рекомбинации.

Как известно, сезонные и суточные вариации действительно наблюдаются². Однако Брикар и Кастлер³ объясняют их вариациями в содержании водяного пара, сказывающимися на ослаблении натриевой линии толщей атмосферы. Очевидно, дальнейшие измерения выяснят, какой из этих механизмов имеет место в действительности.

P.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Черняев и М. Ф. Вукс, ДАН 14, 77 (1937).
2. И. А. Хвостиков, Свечение ночного неба, Изд. АН, 1948.
3. J. Bricard et A. Kastler, Ann. Geophys. 1, 59 (1944); 6, 283 (1950); Mem. Soc. Roy. Sci. Liège 12, 87 (1952).
4. D. Barbier, Ann. Geophys. 4, 193 (1948).
5. D. M. Hunten, J. Atm. and Terrest. Phys. 5, 44 (1954).
6. D. M. Hunten and G. G. Shepherd, J. Atm. and Terrest. Phys. 5, 57 (1954).
7. D. R. Bates and M. Nicolet, J. Geophys. Res. 55, 301 (1950).