

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОЗОННОГО СЛОЯ ДО ВЫСОТЫ 70 км

Косвенные методы определения структуры озонного слоя (например, при помощи так называемого умкер-эффекта) позволили получить достаточно достоверные данные о содержании озона только до высот порядка 50 км¹. Эта граница не только не была преодолена, но и не достигнута в результате измерений, произведённых путём подъёма спектрографов на ракетах². Между тем получение детальных сведений о строении верхней границы озонного слоя представляется весьма важным как с точки зрения уточнения фотохимической теории образования слоя и объяснения температурного максимума на высотах порядка 50 км, так вообще для развития наших представлений об образовании и структуре ионосферных слоёв, механизме свечения ночного неба и других процессах, совершающихся в высоких слоях атмосферы. Напомним, что из-за отсутствия необходимых данных о поперечных сечениях различного рода реакций и соударений, могущих иметь место в условиях стратосферы, оценки содержания озона в верхней части слоя, производимые на основе фотохимической теории, расходятся до 1000 раз. Поэтому непосредственное определение содержания озона на высотах до 70 км, выполненное авторами реферируемой работы³, представляет несомненный интерес.

В основных чертах методика измерений была идентична применённой теми же авторами ранее². С помощью автоматического спектрографа, поднимаемого на ракете, получался набор спектров прямого солнечного света, снятых с различной глубины озонного слоя. Однако наряду со спектрографом, который применялся в предыдущей работе (спектрограф А) и описание которого можно найти, например, в⁴, был использован и спектрограф иной конструкции (Б), показанный на рис. 1, вверху. По существу он представлял собой сочетание в одном кожухе двух независимых спектрографов с алюминиевыми решётками (радиус кривизны 40 см, 15 000 штрихов на дюйм). Основное отличие состояло в устройстве светоподводящей системы, которая должна обеспечить попадание в спектрограф прямых лучей Солнца в условиях вращения и рыскания ракеты.

Вместо шарика из фтористого лития, заменявшего щель в спектрографе прежнего типа, здесь использована щель своеобразной конструкции, образованная парой наклонённых друг к другу зеркальных пластинок (рис. 1, внизу). Собственно щелью служил зазор (шириной 0,03 мм и длиной 2 мм) в вершине угла, образованного зеркалами. Угол между зеркалами составлял 10°. Раствор пучка, освещающего решётку, — 5°. В результате на решётку попадали лучи, падающие на щель в следующем интервале углов относительно биссектрисы системы зеркал: $0^\circ \pm 2,5^\circ$ — прямые лучи, $\pm(10^\circ \pm 2,5^\circ)$ — после однократного отражения от зеркала, $\pm(20^\circ \pm 2,5^\circ)$ — после двукратного отражения и $\pm(30^\circ \pm 2,5^\circ)$ — после трёхкратного отражения. Биссектрисы щелей, соответствовавших двум половинам спектрографа, были наклонены друг относительно друга на угол 5° (см. рис. 1, вверху), в результате чего в поле зрения спектрографа оказывался (учитывая вращение ракеты) интервал углов $\pm 30^\circ$ относительно горизонта.

Ввиду отсутствия других светонаправляющих приспособлений поле зрения каждой из половин спектрографа было ограничено в горизонтальной плоскости углом 4°. Плёнка находилась в непрерывном движении со скоростью 2 м/сек. Скорость вращения ракеты вокруг своей оси (составлявшая около 1 оборота в секунду) ограничивала время экспозиции. (В спектрографе старой конструкции время экспозиции составляло 1 сек. с интервалом 0,2 сек.) Для количественного измерения

спектрального распределения интенсивности плёнка предварительно маркировалась при помощи стандартизованной угольной дуги и секторного диска.

Подъём был осуществлён 14 июня 1949 г. в Белых Песках ($32^{\circ}24,4'$ сев. широты и $106^{\circ}20,4'$ зап. долготы) в 19 часов 03 минуты по местному времени.

Достигнув высоты 112 км, ракета упала на 34,77 мили севернее и 3,4 мили западнее места подъёма. Во время полёта были получены точные данные о траектории, благодаря чему имелась возможность рассчитать долготу и высоту ракеты в момент экспозиции каждого из спектров. Всего было получено более 200 спектров, охватывающих интервал высот от 19 до 110 км, однако часть из них оказалась непригодной для дальнейшей обработки.

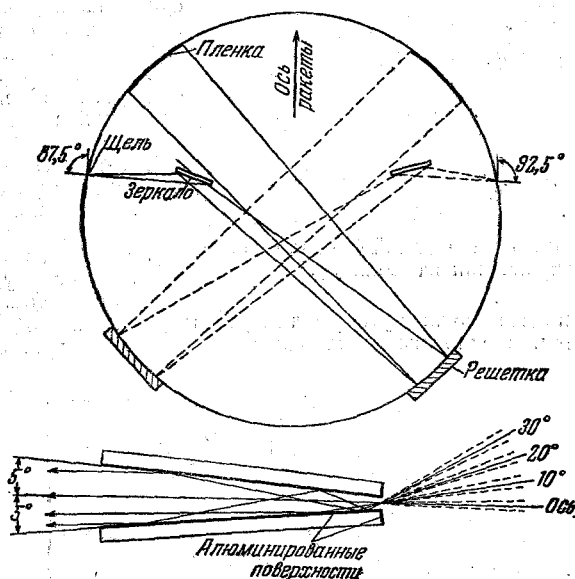


Рис. 1. Вверху — схема спектрографа; внизу — схема щели.

Отличительной особенностью данных измерений являлось то, что Солнце в момент подъёма ракеты находилось у самого горизонта (около 1°), вследствие чего путь лучей через атмосферу значительно удлинялся, и поглощение света атмосферным озоном, весьма слабое выше 50 км, оказывалось измеримым. Однако и в этих условиях выше 70 км поглощение становилось столь незначительным, что полученные на этих высотах спектры практически не различались между собой и определение концентрации озона становилось невозможным. Авторы отмечают, что в этом интервале высот (70—110 км) не было обнаружено и других газов, поглощение которых заметно менялось бы с высотой.

Определение поглощения озоном производилось путём фотометрического сличения спектров, полученных на различных высотах, со спектрами, полученными на высотах > 70 км. При этом оно не ограничивалось какой-нибудь определённой длиной волны, а велось в достаточно широком спектральном интервале, что существенно снизило погрешность измерений.

Для интервала высот 60—70 км использовалась вся область полосы поглощения озона, вплоть до 2500 Å. После учёта релеевского рассеяния и внесения других поправок авторы получили для

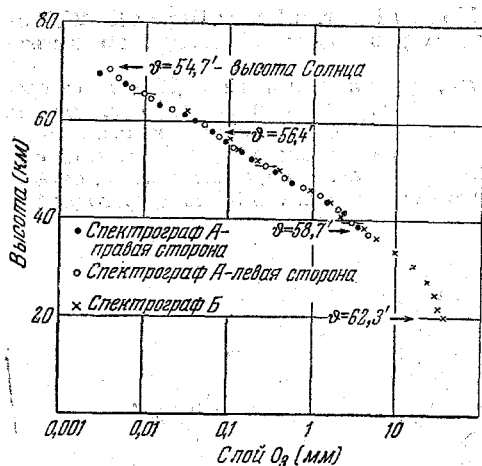


Рис. 2. Результаты измерений (толща озона в направлении на Солнце).

каждый и подсчитывали путь луча через каждый из слоёв в функции высоты ракеты. Предполагая однородность слоёв на всём их протяжении,

и внесения других поправок авторы получили для количества озона на пути светового луча в функции высоты ракеты данные, приведённые на рис. 2 (количество озона, как обычно, указывается в единицах толщины эквивалентного слоя чистого озона при нормальных условиях). Из рисунка видно, что данные, полученные с различными спектрографами, находятся в хорошем согласии друг с другом и погрешность измерений невелика.

Поскольку Солнце находилось у горизонта, было необходимо учесть кривизну земной поверхности (и соответственно озоновых слоёв). Для этого авторы разбили атмосферу на сферические слои толщиной 2 км

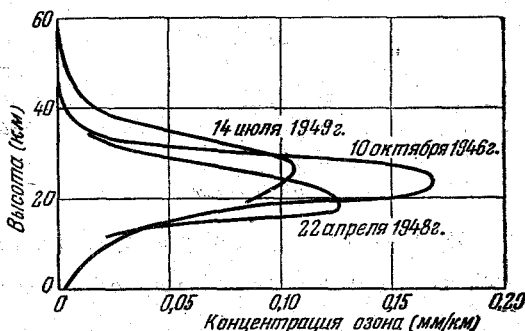


Рис. 3. Концентрация озона в функции высоты.

для количества τ_i озона, располагающегося на пути луча до i -го уровня, получается приближённое соотношение

$$\tau_i = \sum_j p_j (\Delta s_i)_j,$$

где p_j — плотность озона в j -м слое, а $(\Delta s_i)_j$ — путь луча через j -й слой, когда наблюдение ведётся из i -го слоя.

Далее, авторы линейно экстраполировали кривую рис. 2 до высоты 87 км (где предполагалось практически полное отсутствие озона), а затем

Высота (км)	Концентрация озона (мм/км)	Высота (км)	Концентрация озона (мм/км)
20	$9,1 \cdot 10^{-2}$	46	$6,4 \cdot 10^{-3}$
22	$9,6 \cdot 10^{-2}$	48	$3,2 \cdot 10^{-3}$
24	$9,3 \cdot 10^{-2}$	50	$2,2 \cdot 10^{-3}$
26	$1,08 \cdot 10^{-1}$	52	$1,1 \cdot 10^{-3}$
28	$1,03 \cdot 10^{-1}$	54	$7,4 \cdot 10^{-4}$
30	$8,3 \cdot 10^{-2}$	56	$5,1 \cdot 10^{-4}$
32	$7,5 \cdot 10^{-2}$	58	$3,6 \cdot 10^{-4}$
34	$5,7 \cdot 10^{-2}$	60	$3,0 \cdot 10^{-4}$
36	$3,9 \cdot 10^{-2}$	62	$1,9 \cdot 10^{-4}$
38	$2,5 \cdot 10^{-2}$	64	$1,2 \cdot 10^{-4}$
40	$1,6 \cdot 10^{-2}$	66	$6,5 \cdot 10^{-5}$
42	$1,2 \cdot 10^{-2}$	68	$3,8 \cdot 10^{-5}$
44	$9,4 \cdot 10^{-3}$	70	$2,5 \cdot 10^{-5}$

последовательно находили значения ρ_i на основании соотношений:

$$\tau_{85} = \rho_{85} (\Delta S_{85})_{86};$$

$$\tau_{83} = \rho_{84} (\Delta S_{83})_{84} + \rho_{86} (\Delta S_{83})_{86} \text{ и т. д.}$$

Авторы отмечают, что эффект экстраполяции кривой рис. 2 над уровнем 70 км заметно сказывается только выше 65 км (при 70 км пренебрежение поглощением вышележащих слоёв даёт ошибку 100%).

Полученные результаты приведены в таблице и на рис. 3. На рис. 3 приведены также данные, полученные во время предыдущих подъёмов². Расхождения являются вполне естественными, поскольку форма и положение максимума должны зависеть от солнечной активности и метеорологических условий. Соответствие с данными, полученными косвенными методами (умкер-эффект), вполне удовлетворительное. На рис. 4 те же данные представлены в логарифмическом масштабе. Как явствует из рисунка, выше 35 км концентрация озона меняется с высотой практически по экспоненциальному закону.

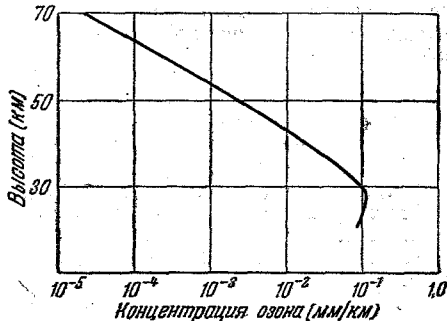


Рис. 4. Концентрация озона в функции высоты.

На рис. 5 показана зависимость полного количества озона, находящегося над данным уровнем, от высоты. Измерения, проведенные в тот же день в том же географическом пункте с земной поверхности дали значение $\tau = 1,9$ мм и на высоте гор (высота 9200 футов, расстояние от места

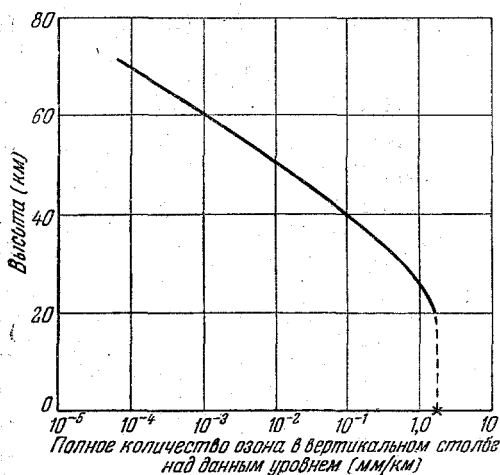


Рис. 5. Полное количество озона в вертикальном столбе воздуха над данным уровнем. Крестиком показаны результаты измерений с земной поверхности.

подъема ракеты 40 миль) $\tau = 1,78 \div 1,86$ мм; оба значения хорошо ложатся на экстраполяционную (пунктирную) кривую для малых высот.

В заключение авторы сравнивают полученные ими результаты с различными вариантами фотохимической теории (в том числе с их собственным вариантом) и приходят к заключению, что экспоненциальное изменение концентрации озона с высотой выше 40 км находится в хорошем согласии с фотохимической теорией, но только в том случае, если учесть тройные соударения.

Г. Р.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. См., например, F. W. Götze, A. R. Meetham and G. M. B. Dobson, Proc. Roy. Soc., 145 A, 416 (1934); 148, 598 (1935); E. Tonsberg a. K. L. Olsen, Geofys. Pub., 13, № 12 (1944); R. V. Karandikar a. K. R. Ramanathan, Proc. Ind. Acad. Sci. 29 A, 330 (1949).
2. F. S. Johnson, J. D. Purcell a. R. Tousey, J. Geophys. Res., 56, 383 (1951).
3. F. S. Johnson, J. D. Purcell, R. Tousey a. K. Watanabe, J. Geophys. Res. 57, № 2, 157 (1952).
4. С. Л. Мандельштам, УФН, 46, 145 (1952); Г. В. Розенберг, УФН, 31, 281 (1947).