

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

МОСКВА · 1973

УДК 551.510.41

Л. Мартини, Н. Шюitte

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАКЕТАХ
«ВЕРТИКАЛЬ-1» И «ВЕРТИКАЛЬ-II»

В работе содержатся результаты экспериментов по оценке концентрации кислорода на высотах 70–300 км, проведенных при помощи ориентированных на Солнце поляризационной камеры и анализатора фотоэлектронов на ракетах «Вертикаль-1» и «Вертикаль-II».

Вопрос о высотном распределении молекулярного кислорода, его вариациях в зависимости от местного времени и широты, сезона и солнечной активности остается пока одним из актуальных вопросов земной аэронавтики. Из целого ряда недавних экспериментов по измерению плотности O_2 [1–7] следует, что на высотах 80–160 км наблюдаются значительные вариации в плотности O_2 . Во многих случаях [2–6] полученные в экспериментах значения концентрации O_2 оказались в 2–3 раза ниже данных CIRA-1965.

Для установления возможных механизмов, ответственных за наблюдаемые вариации O_2 , лучшего понимания фотохимии кислорода, необходимо дальнейшее накопление экспериментальных данных о высотных зависимостях распределения O_2 . При этом существенный интерес представляет получение профилей O_2 как для высот верхней области D и области E , так и F -области.

В данной работе для определения концентрации молекул O_2 использованы результаты измерений поглощения солнечного излучения, проведенные при помощи ориентированных на Солнце поляризационной камеры и анализатора фотоэлектронов на ракетах «Вертикаль-1» и «Вертикаль-II». Пуск ракеты «Вертикаль-II» как и «Вертикаль-1», был проведен в средних широтах Европейской территории СССР 20.VIII 1971 г. Максимальная высота подъема ~470 км; зенитное расстояние Солнца к моменту начала подъема составляло ~78°. Установленные на ракете L_α -фотометр и анализатор фотоэлектронов были полностью аналогичны описанным ранее приборам для ракеты «Вертикаль-1» [8].

Следует иметь в виду, что определение плотности нейтральной атмосферы по поглощению солнечного излучения при ракетных экспериментах выгодно отличается от спутниковых экспериментов. Для спутниковых экспериментов наблюдаемое поглощение излучения в значительной степени оказывается обусловленным увеличением горизонтального смещения спутника по мере его движения в область меньших высот. Поэтому при определении плотности по данным спутниковых экспериментов рассматриваемая область атмосферы представляется в виде тонких сферических концентрических слоев толщиной Δh , и, пренебрегая возможными географическими и суточными вариациями плотности, предполагают, что в пределах высотного интервала Δh , поглощение солнечного излучения можно рассматривать как поглощение излучения в однородной среде. Ракетные

же эксперименты позволяют получать непосредственные данные о вертикальном распределении плотности.

По данным L_α -фотометра (ФЛА) плотность молекулярного кислорода определялась из выражения:

$$n_i = \frac{\ln i_{i-1}/i_i}{\sigma(h_{i-1}-h_i)F\left(\frac{a+h_i}{H}, Z_0\right)} \quad (1)$$

где i_{i-1} и i_i — интенсивность излучения на h_{i-1} , h_i уровнях, соответственно; σ — эффективное сечение поглощения L_α -излучения молекулярным кислородом; $F\left(\frac{a+h_i}{H}, Z_0\right)$ — фактор оптической глубины, учитывающий сферичность Земли [9]; a — радиус Земли; Z_0 — зенитное расстояние Солнца; H — шкала высот. Разрешение по высоте было ~ 50 м. Погрешность измерений интенсивности излучения не более 10%.

При определении концентраций нейтральных частиц по данным анализатора фотоэлектронов (АФ) [8] использовались сведения об изменении спектральной интенсивности солнечного излучения для следующих диапазонов длин волн: I — от мягких рентгеновских лучей до ~ 600 Å; II — $600 \div 900$ Å; III — $900 \div 1100$ Å; IV — $1100 \div 1350$ Å; V — $\lambda > 1350$ Å (от 1350 Å до «красной» границы фотокатода). Как и ранее [10], рассматривалась трехкомпонентная модель атмосферы. Поскольку в данном случае используются результаты измерения поглощения не отдельных монохроматических линий, для которых величины сечений поглощения известны более или менее точно, а спектральных интервалов шириной до нескольких сотен ангстрем, для которых неопределенность абсолютных значений эффективных сечений поглощения $\sigma_{\lambda \rightarrow \lambda_0}$ в некоторых случаях могла достигать фактора 1,5 (например, для N_2 в области $\Delta\lambda = 900 \text{ Å} \div 1100 \text{ Å}$), при оценке концентраций такой фактор как сферичность Земли не учитывался и использовалось выражение:

$$\sum_i \sigma_{\lambda \rightarrow \lambda_0}(\lambda_1 - \lambda_2) n_i = \frac{\ln \frac{i_{i-1}(\lambda_1 - \lambda_2)}{i_i(\lambda_1 - \lambda_2)}}{(h_{i-1} - h_i) \sec Z_0} \quad (2)$$

где $i_{i-1}(\lambda_1 - \lambda_2)$, $i_i(\lambda_1 - \lambda_2)$ — интенсивность излучения в диапазоне длин волн $\lambda_1 - \lambda_2$ на высотах h_{i-1} , h_i соответственно, $\sigma_{\lambda \rightarrow \lambda_0}(\lambda_1 - \lambda_2)$ — эффективное сечение поглощения излучения в интервале $\lambda_1 - \lambda_2$ на высоте h_i . Для определения $\sigma_{\lambda \rightarrow \lambda_0}(\lambda_1 - \lambda_2)$ использовались значения $\sigma_{\lambda \rightarrow \lambda_0}(\lambda)$, приведенные в работе [11], для атомарного кислорода учитывались экспериментальные данные [12, 13]. Сведения о распределении спектральной интенсивности солнечного излучения были взяты из работы [14].

Точность определения значений $i_i(\lambda_1 - \lambda_2)$ составляла $\sim \pm 15\%$. Разрешение по высоте варьировалось от $3 \div 3,5$ км до $0,5 \div 1$ км по мере увеличения высоты ракеты.

Полученные на ракетах «Вертикаль-I и II» значения потока L_α -излучения по данным прибора ФЛА приведены на рис. 1. Во время полета ракеты «Вертикаль-II» было надежно зарегистрировано прибором ФЛА солнечное излучение в диапазоне длин волн $\lambda 1150 \div 1350$ Å выше области его поглощения. Поглощение L_α -излучения ($\lambda = 1216$ Å), как и в [8] началось вблизи высоты 95 км. Обращает на себя внимание тот факт, что в отличие от «Вертикаль-I» поглощение излучения $\lambda 1150 - 1350$ Å (за исключением L_α -линии) имело место вплоть до 95 км. Можно полагать, что наблюдаемое различие в характере поглощения этого излучения для данных экспериментов обусловлено в какой-то мере различиями в зенитных расстояниях Солнца. На нисходящем участке траектории ракеты на высотах 90—70 км, когда работал прибор ФЛА, зенитное расстояние было $\sim 81^\circ$ и 75°

для «Вертикали-I и II», соответственно. Таким образом, в первом случае поглощение излучения λ 1150–1350 Å должно было быть более интенсивным. Следует заметить, что сравнение регистрируемых интенсивностей на уровнях 95 км и $h > 105$ км свидетельствует о том, что интенсивность линии $\lambda \approx 1216$ Å в диапазоне λ 1150–1350 Å составляло $\sim 90\%$.

Полученные с помощью прибора АФ значения спектральных интенсивностей для указанных диапазонов длин волн приведены на рис. 2. Значения

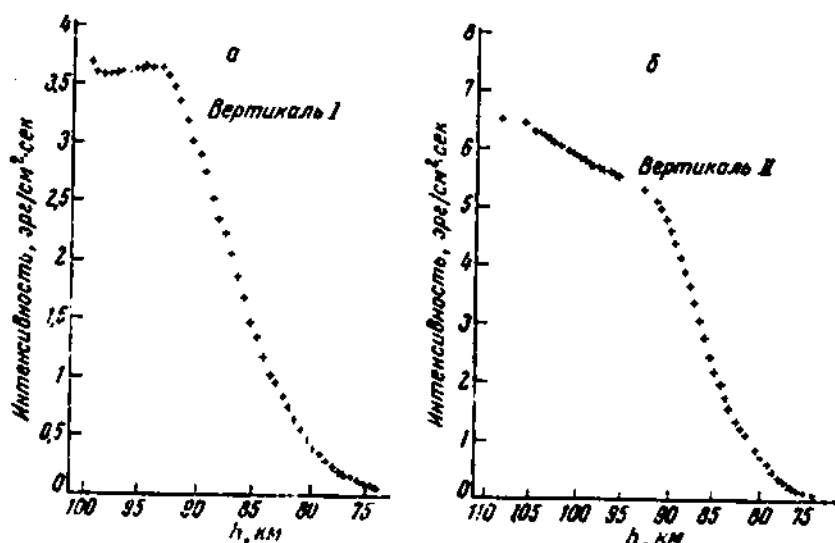


Рис. 1. Поток солнечного L_α -излучения по данным прибора ФЛА в зависимости от высоты полета

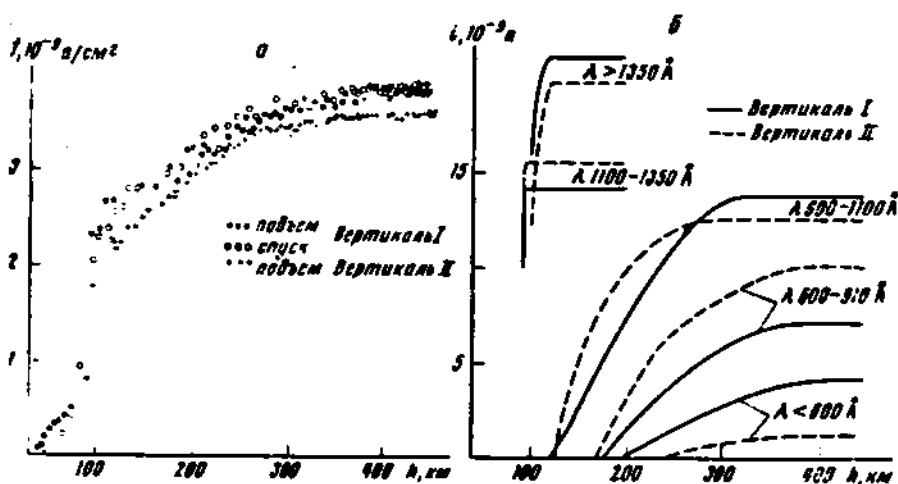


Рис. 2. Зависимость фотоэмиссии для различных диапазонов длин волн от высоты полета

ния фотоэмиссии на одних и тех же высотах для $h > 80$ км при подъеме ракеты и спуске были практически одинаковы. Из рисунка также следует, что во время измерений на «Вертикали-II» интенсивность солнечного излучения в диапазоне длин волн λ 1100–1350 Å несколько возросла. Большие значения потока L_α -излучения были зарегистрированы и прибором ФЛА (см. рис. 1). В таблице приведены абсолютные значения интенсивности L_α -излучения для описываемых экспериментов.

Обращает на себя внимание тот факт, что для описываемых экспериментов наблюдалось некоторое изменение в распределении спектральной интенсивности солнечного излучения в диапазоне длин волн $\lambda < 900 \text{ \AA}$. Хотя интегральная фотоэмиссия для $\lambda < 900 \text{ \AA}$ была практически одинаковой, однако для области $\lambda 600-900 \text{ \AA}$ 20.VIII 1971 г. фототоки были почти вдвое выше чем 28.XI 1970 г. В то же время для $\lambda < 600 \text{ \AA}$ 20.VIII 1971 г. фотоэмиссия была, наоборот, в несколько раз меньше.

| Дата эксперимента | Используемый прибор | Интенсивность L_{Σ} -излучения, $\text{эрг/см}^2\cdot\text{сек}$ |
|-------------------|---------------------|---|
| 28.XI 1970 г. | ФЛА АФ | 3,6 4,4 |
| 20.VIII 1971 г. | ФЛА АФ | 5,3 4,8 |

Из приведенных на рис. 2 высотных зависимостей спектральных интенсивностей для данных диапазонов длин волн следует, что для вычисления концентраций основных трех компонент атмосферного газа система из трех уравнений (2) может быть определена только для довольно ограниченного интервала высот $\sim 200-300 \text{ км}$, где наблюдается одновременное поглощение в трех спектральных поддиапазонах длин волн. Кроме того, проведенный анализ показал, что точность полученных высотных зависимостей «спектральных» фототоков недостаточна для совместного решения такой системы из трех уравнений. Поэтому для $h < 120 \text{ км}$ молекулярные компоненты рассматривались суммарно, как одно целое $O_2 + N_2 = M$, характеризуясь эффективным средневзвешенным сечением поглощения $\sigma_{M, \text{eff}}(\lambda_1 - \lambda_2)$:

$$\sigma_{M, \text{eff}}(\lambda_1 - \lambda_2) = \frac{\sum_j \sigma_{M, \text{eff}}(\lambda_1 - \lambda_2) n_j}{\sum_j n_j} \quad (3)$$

Для определения значений O_2 по данным M использовались высотные зависимости модельных значений отношения N_2/O_2 по данным Стандартной атмосферы 1966 г. [15], в которой отражены вариации нейтрального состава как от высоты, так и от температуры. Для этого полученные на высотах $\sim 200-300 \text{ км}$ экспериментальные значения отношения O/M сравнивались с соответствующими значениями по данным Стандартной атмосферы 1966 г., для различных температур. После этого выбирались те модельные высотные зависимости отношений концентраций нейтральных частей, которые наилучшим образом отвечали экспериментальным значениям на высотах $\sim 200-300 \text{ км}$.

Для высот $h < 120 \text{ км}$ можно считать, что наблюдаемое поглощение солнечного излучения с $\lambda > 1100 \text{ \AA}$ обусловлено в основном молекулярным кислородом. Однако, для этих высот данные о O_2 по показаниям прибора АФ следует рассматривать как приближенные. Дело в том, что энергетические распределения фотоэлектронов для $\lambda = 1216 \text{ \AA}$ и $\lambda = 1607 \text{ \AA}$ практически, аналогичны и отличаются лишь в области, соответствующей фотоэлектронам с максимальной энергией [8]. На высотах $h > 120 \text{ км}$, где отсутствует поглощение излучения с $\lambda > 1100 \text{ \AA}$ и где в связи с уменьшающейся скоростью ракеты регистрируется большое число вольтамперных характеристик, излучение спектральных областей $\lambda 1100-1350 \text{ \AA}$ и $\lambda > 1350 \text{ \AA}$ было разделено без особых затруднений. Однако на высотах $h < 120 \text{ км}$, где начинается поглощение излучения с $\lambda > 1100 \text{ \AA}$, по виду вольтамперных характеристик выделить спектральные участки $\lambda 1100-$

$\div 1350 \text{ \AA}$ и $\lambda > 1350 \text{ \AA}$ невозможно. Для области $\lambda 1100\div 1350 \text{ \AA}$, как известно, примерно 90% излучения определяется излучением в линии L_{α} , для которого эффективное сечение поглощения молекулярным кислородом можно считать равным $1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ [16]. Поскольку для $\lambda > 1350 \text{ \AA}$ эффективное сечение поглощения оказывается более, чем на два порядка выше, при обработке результатов было принято, что за счет разницы в значениях

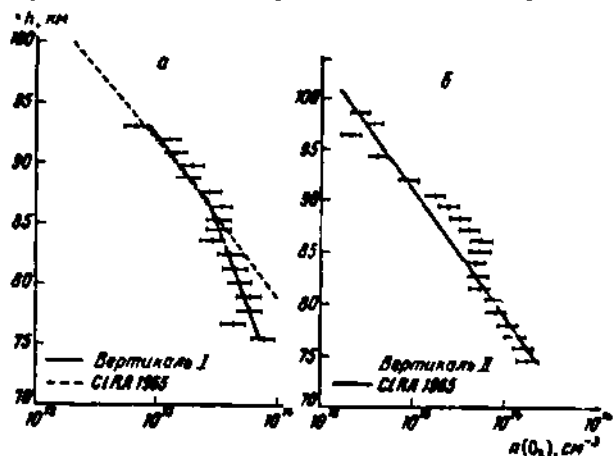


Рис. 3

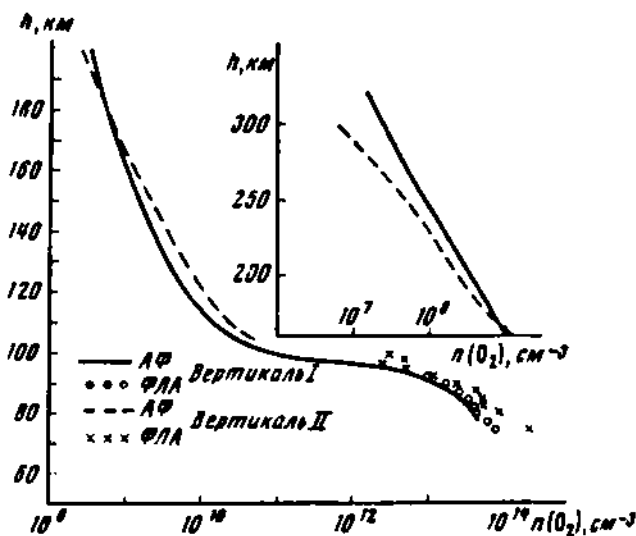


Рис. 4

Рис. 3, 4. Распределение концентрации молекулярного кислорода по данным приборов ФЛА и АФ

сечений поглощения при поглощении излучения с $\lambda > 1100 \text{ \AA}$ первоначально происходит поглощение излучения в области $\lambda > 1350 \text{ \AA}$ и после его полного поглощения начинается поглощение излучения с $\lambda 1100\text{--}1350 \text{ \AA}$.

На рис. 3 и 4 приведены значения концентраций O_2 по данным приборов ФЛА и АФ, соответственно. Следует отметить, что, так как эффективное сечение поглощения L_{α} -излучения зависит от высоты [17], вычисленные для высот 95–80 км абсолютные значения O_2 , примерно на 20–25% завышены. Сравнение полученных с помощью данных приборов значений O_2 свидетельствует о их неплохом согласии между собой. Из приведенных на рис. 3 зависимостей следует, что вблизи $h=85 \text{ км}$ в высотных профилях O_2 наблюдается излом. Более того, на участке 85–81 км концентрация O_2 практически не менялась. Это означает, что на этих высотах для описы-

важных экспериментов имело место отклонение распределения плотности O_2 от барометрической зависимости. Аномальное высотное распределение O_2 на этих высотах наблюдалось и в других экспериментах [18]. В этой работе было показано, что причиной такой аномалии на высотах 60–130 км может являться турбулентная диффузия, обусловленная флуктуациями плотности, температуры и скорости.

На рис. 3 следует, что на высотах $h < 160$ км абсолютные значения O_2 20.VIII 1971 г. были больше, чем 28.XI 1970 г. Поскольку уровни солнечной и геомагнитной активности для этих экспериментов были несколько различны (R , для ноября и августа равнялось 89 и 82, а ΣK -индексов — 12 и 8, соответственно), по-видимому нельзя предполагать, что причиной наблюдаемых изменений абсолютных значений O_2 является только сезонный эффект [19]. Тем более, что на всех высотах отношение O/M во время ноябрьских измерений было меньше, чем в августе.

Дата поступления
18 августа 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. H. Carver, P. Mitchell, E. L. Murray. *J. Geophys. Res.*, 69, 3755, 1964.
2. L. H. Weeks, L. G. Smith. *J. Geophys. Res.*, 73, 4835, 1968.
3. P. J. L. Wildman, M. J. Kerley, M. S. Shaw. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 31, 951, 1969.
4. C. V. Orall, N. W. Moos. *J. Geophys. Res.*, 74, 2398, 1969.
5. B. J. Brannon, J. M. Hoffman. *J. Geophys. Res.*, 76, 4630, 1971.
6. D. Felske, L. Martini, B. Stark, Y. Taubenheim. *Nature*, 228, 1298, 1970.
7. В. В. Катюшина. *Космич. исслед.*, 3, 3, 496, 1965.
8. Л. Мартини, Н. М. Шютте, К. И. Грингауа, Б. Штарк. *Космич. исслед.*, 10, 2, 255, 1972.
9. W. J. Swider. *Planet. Space Sci.*, 12, 781, 1964.
10. К. И. Грингауа, Г. Л. Гдалевич, В. А. Рудаков, Н. М. Шютте. *Геомагнетизм и аэронавтика*, 8, 224, 1968.
11. H. E. Hinteregger, L. A. Hall, G. Schmidtke. *Space Res.*, 5, 1175, 1965.
12. R. V. Cairns, Y. A. R. Samson. *Phys. Rev.*, 139, 5A, A1403, 1965.
13. R. E. Huffman, J. C. Larrabee, Y. Tanaka. *Phys. Rev. Lett.*, 16, 23, 1033, 1966.
14. H. E. Hinteregger. *Ann. Géophys.*, 26, 547, 1970.
15. U. S. Standard Atmosph., Suppl., 1966.
16. M. Oga wa. *J. Geophys. Res.*, 71, 6759, 1968.
17. J. E. Hall. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 34, 1337, 1972.
18. C. M. Tchen. *Space Res.*, 11, 899, 1971.
19. D. F. Strobel, M. B. McElroy. *Planet. Space Sci.*, 18, 1181, 1970.