

УДК 551.510.4

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НЕЙТРАЛЬНОГО СОСТАВА ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ НА РАКЕТЕ «ВЕРТИКАЛЬ-4»

*Кочнев В. А., Шютте Н. М.*

Обсуждаются результаты экспериментов по определению концентрации и состава нейтральных частиц, полученные одновременно с помощью радиочастотного масс-спектрометра типа Беннета (РМСУ-1) и сорбционным методом — по поглощению ультрафиолетового излучения Солнца различных диапазонов длин волн при использовании анализатора фотоэлектронов (АФ-1).

**1. Введение.** Многочисленные исследования верхней атмосферы последних лет показали, что, несмотря на наличие широко используемых моделей нейтральной атмосферы [1–3], результаты измерений абсолютных концентраций нейтральных частиц не потеряли своей актуальности. Так, например, известно, что как абсолютная интенсивность ионизирующих потоков солнечного ультрафиолетового излучения, так и их относительные вариации для начального периода 21 цикла солнечной активности оказались значительно более высокими, чем в конце предыдущего, 20 цикла. В то же время соответствующего увеличения плотности или температуры нейтральной атмосферы на высотах  $h \leq 300$  км не наблюдалось [4]. Этот факт позволяет сделать предположение о неоднозначной взаимосвязи между интенсивностью ионизирующего солнечного излучения и состоянием верхней атмосферы, а также об изменении этой зависимости при переходе к другому циклу солнечной активности.

В связи с этим представляет интерес получение прямых и надежных экспериментальных данных об абсолютных концентрациях и высотных зависимостях основных составляющих верхней атмосферы, особенно для текущего цикла солнечной активности.

Комплекс научных экспериментов на ракете «Вертикаль-4», запущенной в средних широтах европейской части СССР 14.X 1976 г. на высоту 1512 км (зенитный угол  $\chi = 63^\circ$ , поток солнечного радиоизлучения  $F_{10,7} = 73 \cdot 10^{-22}$  Вт  $\cdot$  м $^{-2}$   $\cdot$  Гц $^{-1}$ ), предусматривал измерения нейтрального состава двумя различными методами: масс-спектрометрическим (при помощи радиочастотного масс-спектрометра РМСУ-1 [5]) и сорбционным (по измерению поглощения различных спектральных участков солнечного ультрафиолетового излучения при помощи анализатора фотоэлектронов [6]).

Аппаратура была установлена на отделяемом от ракеты контейнере, стабилизированном по трем взаимно перпендикулярным осям и ориентированном на Солнце.

Известно, что измерение абсолютных концентраций нейтральных составляющих верхней атмосферы масс-спектрометрическим методом представляет сложную экспериментальную задачу. Методические трудности связаны с наличием так называемого «напорного» эффекта, погрешностями калибровки прибора, влиянием на результаты измерений поверхност-

ных реакций  
рения атома  
источников  
в поверхност  
верхностью,  
могут быть  
атомных пу  
сложной экс

Трудност  
ценцию нем  
волн  $\Delta\lambda \approx 15$   
ностью изме  
данного спе  
ного значен  
ленного диа

В связи с  
рений конц  
существенн  
во-первых, п  
центраций, а  
спектрометр

**2. Резуль**  
РМСУ-1 пре  
нета с электр

За время  
пиков 1, 2, 1  
пряжения ио  
 $U_i = 26$  и  $51$  В  
 $28$  и  $32$  а.е.м  
основных сос

цах.

Проведенн  
личным напр  
 $U_i = 51$  В набр  
вклада диссо  
прибора. Вып  
не позволял  
чины отноше  
практически  
и его вклад в  
зависимости  
также и такие  
ионизации ра  
от скорости ко

Абсолютны  
с использован  
стенде. Для п  
ствительность  
факторов. Ков  
но без учета  
ная точность  
 $\pm 15\%$ . Абсоли  
равнялась  $\pm 30$   
ляющих атмо  
на высотах 150

ных реакций в источнике ионов. Наибольшие трудности вызывают измерения атомарного кислорода с использованием открытого и полуоткрытого источников ионов [7, 8], поскольку кислород наиболее активно вступает в поверхностные реакции, в результате которых он либо поглощается поверхностью, либо трансформируется в  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ . Эти трудности могут быть частично преодолены путем калибровки в молекулярных и атомных пучках со сверхзвуковыми скоростями, что является довольно сложной экспериментальной задачей [9].

Трудности определения концентраций нейтральных частиц по поглощению немонахроматического солнечного излучения (в диапазоне длин волн  $\Delta\lambda \approx 150 \div 200 \text{ \AA}$ ) объясняются в основном двумя факторами: погрешностью измерений поглощения, т.е. изменений интенсивности излучения данного спектрального участка с высотой, и неопределенностью абсолютного значения «эффективного» сечения поглощения  $\sigma_{\text{эфф}}(\Delta\lambda, j)$  для выделенного диапазона длин волн  $\Delta\lambda$ .

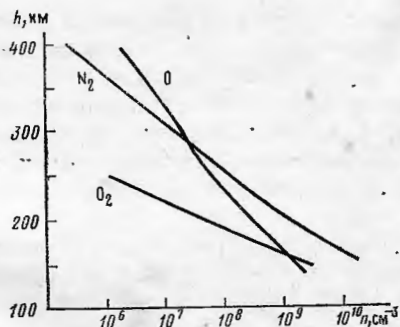
В связи с этим очевидно, что анализ результатов одновременных измерений концентраций нейтральных частиц обоими методами составляет существенный, практический и методический интерес, так как позволяет, во-первых, получить более надежные высотные профили нейтральных концентраций, а во-вторых, уточнить фактор абсолютной калибровки масс-спектрометра и используемые величины  $\sigma_{\text{эфф}}(\Delta\lambda, j)$ .

**2. Результаты масс-спектрометрических измерений.** Масс-спектрометр РМСУ-1 представляет собой радиочастотный масс-спектрометр типа Беннета с электронным множителем в качестве детектора ионов [5].

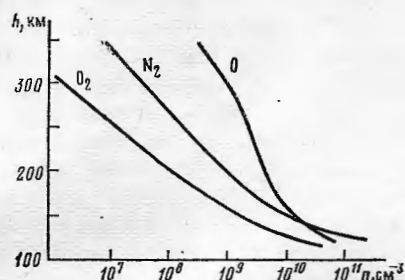
За время полета были получены высотные профили ионных токов масс-пиков 1, 2, 14, 16, 17, 18, 28, 30, 32, 40, 44 а.е.м. при двух значениях напряжения ионизации (определяющего энергию ионизирующих электронов):  $U_i = 26$  и  $51$  В. Высотные зависимости ионных токов для масс-пиков 14, 16, 28 и 32 а.е.м. были использованы для получения профилей концентраций основных составляющих атмосферы  $N_2$ ,  $O$  и  $O_2$  в относительных единицах.

Проведенный анализ ионных токов масс-пиков, соответствовавших различным напряжениям ионизации  $U_i$ , показал, что ниже 200 км при  $U_i = 51$  В наблюдалось относительное увеличение пиков 16 а.е.м. за счет вклада диссоциативной ионизации атмосферного  $O_2$  в ионном источнике прибора. Выше 250 км эффект рекомбинации атмосферного  $O$  в приборе не позволял проводить надежные измерения  $O_2$ . Среднее значение величины отношения ионных токов для  $h > 250$  км равно:  $I_i(O_2)/I_i(O) \approx 0,23$  и практически не зависит от высоты. Эффект рекомбинации атмосферного  $O$  и его вклад в наблюдаемые пики  $O_2$  учитывался при построении высотной зависимости  $[O_2]$ . При обработке результатов принимались во внимание также и такие факторы: дискриминация по массам в приборе, вероятность ионизации различных газов, эффект набегающего потока и его зависимость от скорости контейнера и массы частиц.

Абсолютные концентрации  $N_2$  определялись из профиля ионных токов с использованием данных калибровки масс-спектрометра на вакуумном стенде. Для получения абсолютных концентраций  $O_2$  рассчитывалась чувствительность прибора к  $O_2$  относительно  $N_2$  с учетом перечисленных выше факторов. Концентрация атомарного кислорода определялась аналогично, но без учета потерь атомов  $O$  на стенках масс-спектрометра. Относительная точность определения  $O$  и  $N_2$  составляла  $\pm 10\%$ , а для  $O_2$  составляла  $\pm 15\%$ . Абсолютная точность определения  $N_2$  равнялась  $\pm 25\%$ , а для  $O_2$  равнялась  $\pm 30\%$ . Высотные зависимости концентраций основных составляющих атмосферы  $O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  для нисходящей ветви траектории ракеты на высотах 150–400 км приведены на фиг. 1.



Фиг. 1



Фиг. 2

**3. Результаты измерений поглощения солнечного излучения.** Принципы и методика измерений интенсивности солнечного ультрафиолетового излучения и поглощения его в верхней атмосфере неоптическим способом, основанным на анализе энергетических распределений фотоэмиссионных электронов, подробно описаны в [6, 10]. Показано, что погрешность при оценке плотности нейтральных частиц этим методом определяется неточностью измерения поглощения солнечного излучения выделенных спектральных интервалов и неопределенностью эффективного средневзвешенного сечения поглощения  $\sigma_{эфф}(\Delta\lambda)$ , зависящего в данном случае как от точности лабораторных значений констант поглощения рассматриваемых длин волн, так и от неоднозначности спектральных границ выделяемых интервалов длин волн, а также вероятности высотных изменений распределения спектральной интенсивности солнечного излучения в пределах этих интервалов.

Проведенные оценки показали [6], что для атомарного кислорода неопределенность в значениях  $\sigma_{эфф}(O)$  не превышает 20%, а для молекулярных частиц ( $[M] = [O_2] + [N_2]$ ) возможные вариации  $\sigma_{эфф}(M)$  составляют не более 10%.

Точность определения высотных зависимостей спектральной интенсивности регистрируемого анализатором фотоэлектронов солнечного излучения для описываемого эксперимента была не хуже  $\pm 10\%$ .

Полученные сорбционно-оптическим методом (прибор АФ-1) абсолютные значения концентраций  $O_2$ ,  $O$  и  $N_2$  показаны на фиг. 2 (нисходящая ветвь траектории).

**4. Обсуждение результатов и выводы.** Сравнение высотных зависимостей концентраций нейтральных частиц, полученных одновременно при использовании двух различных методов измерений и приборов и приведенных на фиг. 1 и 2, показывает, что согласие в пределах суммарной погрешности показаний обоих приборов имеет место для  $N_2$  на высотах  $h \leq 250$  км и для  $O_2$  на высотах  $h \leq 210$  км. Для больших высот расхождение в значениях  $O_2$  и  $N_2$  существенно возрастает (до 3–5 раз); для атомарного кислорода расхождение превышает фактор 10 во всем рассматриваемом диапазоне высот. При этом значения как  $[O_2]$ , так и  $[O]$  по прибору АФ-1 систематически превышают таковые по прибору РМСУ-1. Это обстоятельство позволяет предполагать, что основной причиной расхождений в данных  $[O]$  этих приборов на  $h \leq 250$  км могла быть пониженная чувствительность РМСУ-1 к кислороду в результате взаимодействия его со стенками прибора. Разница в величинах  $[O_2]$  на  $h \geq 250$  км может быть связана с неточностью определения вклада рекомбинации  $O$  в пик  $O_2$  в масс-спектрометре.

Для сопоставления значений концентраций нейтральных частиц, полученных приборами РМСУ-1 и АФ-1, были рассмотрены высотные профили

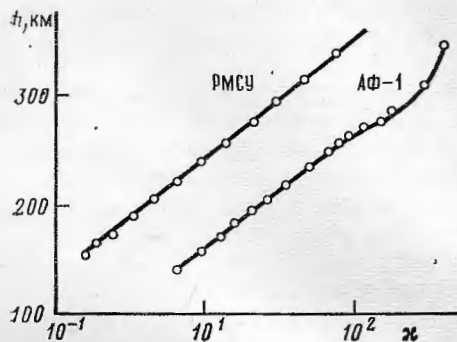


отношения  
тельного  
обоих пр  
параметр  
чем  $\kappa$  по  
данным а  
чески во  
описывае  
измерени  
прибору  
ности ма  
атомов  $O$

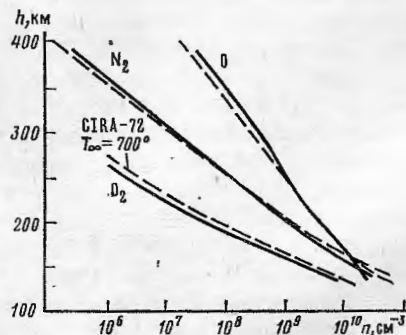
Оказа  
 $\approx 10,3 \pm 15$   
стенками  
в  $\sim 10,3$  р  
ленного к  
абсолютн  
Величина  
условий э  
потока. П  
в таком п  
определе  
ния посту  
мов  $O$  по  
для конпе  
марная ко  
попавших  
центрация  
стенками.

При о  
факторы,  
мость вхо  
лено, что  
РМСУ-1 в  
ионизаци

Следуе  
атомов ки  
данного т  
масс-спект



Фиг. 3



Фиг. 4

отношения  $\kappa = [O] / [N_2]$ , выбранного в качестве наиболее удобного сравнительного параметра. Полученные высотные зависимости величины  $\kappa$  для обоих приборов приведены на фиг. 3, из которой видно, что значения параметра  $\kappa$ , соответствующие РМСУ-1, примерно на порядок меньше, чем  $\kappa$  по данным прибора АФ-1, а также меньше значений  $[O] / [N_2]$  по данным атмосферных моделей [1]. Это соотношение сохраняется практически во всем диапазоне высот. Поскольку данные по  $N_2$ , полученные описываемыми приборами на  $h \leq 250$  км, согласуются в пределах ошибки измерений, можно полагать, что для этих высот отношение значений  $\kappa$  по прибору АФ-1 РМСУ-1 характеризует степень понижения чувствительности масс-спектрометра РМСУ-1 к атмосферному кислороду из-за потерь атомов O в приборе.

Оказалось, что на  $h = 180 - 240$  км коэффициент  $\eta = \kappa(\text{АФ-1}) / \kappa(\text{РМСУ-1}) \approx 10,3 \pm 15\%$ , т.е. в результате взаимодействия атомарного кислорода со стенками прибора его концентрация в источнике ионов снижается в  $\sim 10,3$  раза. Коэффициент  $\eta$  был использован для приведения представленного на фиг. 1 высотного профиля  $[O] = f(h)$  к реальным значениям абсолютных концентраций во всем рассматриваемом диапазоне высот. Величина коэффициента  $\eta$  может существенно меняться в зависимости от условий эксперимента, особенно от степени влияния эффекта набегающего потока. Поэтому целесообразно оценить величину потерь атомов кислорода в таком приборе, как РМСУ-1, независимо от условий эксперимента. Для определения такого коэффициента  $\gamma$ , характеризующего степень ослабления поступающего в область ионизации из полости прибора потока атомов O после соударений его со стенками, было использовано выражение для концентрации частиц в источнике ионов [7]:  $n_{\Sigma} = n_{\Sigma} + n_0 \gamma$ , где  $n_{\Sigma}$  — суммарная концентрация частиц в источнике ионов,  $n_{\Sigma}$  — концентрация частиц, попавших в область источника непосредственно из атмосферы,  $n_0$  — концентрация частиц, попавших в область источника после соударений со стенками.

При определении величин  $n_{\Sigma}$  и  $n_0$  принимались во внимание такие факторы, как скорость контейнера, тепловая скорость частиц, проводимость входного и выходного отверстий и пр. [7, 8]. В результате установлено, что уменьшение абсолютной чувствительности масс-спектрометра РМСУ-1 в 10,3 раза обусловлено уменьшением поступающего в область ионизации потока атомов O более чем на порядок, т.е.  $\gamma = 0,03 \pm 0,01$ .

Следует иметь в виду, что полученное значение коэффициента потерь атомов кислорода в масс-спектрометре характерно только для прибора данного типа и не может быть непосредственно использовано для других масс-спектрометров. Однако то обстоятельство, что  $\eta \gg 1$ , свидетельствует

о том, что при рассмотрении масс-спектрометрических измерений на ракетах и спутниках нельзя пренебрегать эффектами взаимодействия атомарного кислорода со стенками прибора.

Ранее было отмечено, что на  $h=250-350$  км расхождение в значениях  $[O_2]$  и  $[N_2]$  увеличивается до 3÷5 раз. Кроме того, из фиг. 3 видно, что на этих высотах высотный профиль параметра  $\chi$  по данным прибора АФ-1 существенно отличается от общепринятых моделей. Можно, по-видимому, полагать, что увеличение расхождений в значениях полученных концентраций выше 250 км наряду с такими причинами методического характера, как высотные изменения вероятности гибели частиц в масс-спектрометре в связи с изменением состояния поверхности его стенок, а также относительное увеличение с высотой воздействия загрязнений и возмущений, выносимых ракетой в окружающую атмосферу, можно объяснить увеличением относительной ошибки измерений поглощения солнечного излучения прибором АФ-1 за счет уменьшения плотности нейтрального газа с высотой. По этой причине в диапазоне высот 250–350 км величины концентраций прибора по данным прибора АФ-1 были скорректированы в соответствии с уточненными по результатам измерений для  $h \leq 250$  км данными прибора РМСУ-1.

Окончательные высотные зависимости концентраций  $[N_2]$ ,  $[O_2]$  и  $[O]$  представлены на фиг. 4. Нетрудно заметить, что нейтральная атмосфера находится в состоянии, близком к диффузионному равновесию при температуре экзосферы  $\sim 750$  К. Такая низкая температура дневной экзосферы, по-видимому, характерна для периода минимума солнечной активности начала 21 цикла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. CIRA — 72. COSPAR Internation Reference Atmosphere, 1972, Akademie Verlag, Berlin, 1972.
2. Hedin A. E., Mayr H. G., Reber C. A., Spencer N. W., G. R. Carignau. Empirical Model of Global Thermospheric Temperature and Composition Based on Data from the OGO-6 Quadrupole Mass Spectrometer.— J. Geophys. Res., 1974, v. 79, № 1, p. 215.
3. King-Hele D. C. The Earth's neutral upper atmosphere.— Rev. Geophys. Space Phys., 1978, v. 16, № 4, p. 733.
4. Hinteregger H. E. Development of solar cycle 21 observed in EUV spectrum and atmospheric absorption.— J. Geophys. Res., 1979, v. 84, № A5, p. 1933.
5. Кочнев В. А., Барзилович Ю. П., Гречнев К. В., Калинина И. А., Шульчишин Ю. А. Радиочастотный масс-анализатор повышенной чувствительности для исследования верхних атмосфер Земли и планет.— Препринт ИКИ АН СССР. М., 1977, Пр-332.
6. Шютте Н. М. Измерение поглощения ультрафиолетового излучения Солнца при помощи анализатора фотоэлектронов. В кн.: Ионосферные исследования. Наука, 1972, № 20, с. 36.
7. Von Zahn U. Neutral air density and composition at 150 km.— J. Geophys. Res., 1970, v. 75, № 25, p. 5517.
8. Ивановский А. И. Взаимодействие измерительного прибора с потоком разреженного газа.— Сб. Труды ЦАО, М., 1966, В. 72, с. 7.
9. Sjolander G. W. Atomic oxygen-metal surface studies as applied to mass spectrometre measurements of Upper Planetary Atmospheres.— J. Geophys. Res., 1976, v. 81, № 22, p. 3767.
10. Мартини Л., Шютте Н. М., Грингауз К. И., Шгарк Б. Измерения интенсивности излучения неоптических методами на ракете «Вертикаль-1».— Космич. исслед., 1972, т. 10, № 5, с. 255.

Институт космических исследований  
АМ СССР

Поступила в редакцию  
4.II.1980  
после доработки  
23.VI.1980