



**Ракетное  
зондирование  
верхней  
атмосферы  
и ионосферы**

СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ



*Ракетное  
зондирование  
верхней атмосферы  
и ионосферы  
до высоты 1500 км*

*Ответственный редактор  
доктор физико-математических наук  
К. И. Грингауз*

Ростов-на-Дону

Издательство Ростовского университета  
1989

P19  
УДК 551.510:550.380.8;629.79

*Печатается по решению отделения физики  
и атомной энергетики Северо-Кавказского научного центра  
высшей школы*

Рецензенты

доктор физико-математических наук М. Н. Изаков,  
доктор физико-математических наук Е. Г. Фесенко,  
кандидат физико-математических наук Н. В. Кривошеев

Редакционная коллегия:  
*К. И. Грингауз* (отв. редактор),  
*П. Ф. Денисенко, В. Г. Истомин,*  
*Н. Е. Шейдаков, Н. М. Шютте*

Редактор *В. И. Литвиненко*

P  $\frac{1704060000-060}{M175(03)-89}$  24-89

ISBN 5-7507-0208-1

## ИОНОСФЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТАХ «ВЕРТИКАЛЬ-1» И «ВЕРТИКАЛЬ-2»\*

К. И. Грингауз (СССР), К. Серафимов (НРБ),  
К. Шмеловски (ПНР), Я. Шмилауер (ЧССР)

Обе ракеты были запущены в ранние утренние часы практически вертикально до высот 500 км в одном и том же пункте в средних широтах европейской территории СССР 28.11.70 и 20.08.71. Ракеты во время полета были стабилизированы относительно трех возможных осей вращения. В состав научной аппаратуры каждой из ракет входили приборы, предназначенные для ионосферных исследований (таблица).

Ионосферные эксперименты  
на ракетах «Вертикаль-1» и «Вертикаль-2»

Эксперимент (измеряемый параметр)	Исполнитель	Прибор и размещение датчиков
Интенсивность поглощения УФ излучения Солнца в нескольких спектральных диапазонах	СССР	Анализатор фотоэлектронов с металлической поверхности, нормаль к которой направлена на Солнце ( $\pm 1^\circ$ )
Интенсивность и поглощение в линии	ГДР	Ионизационная камера, нормаль к окну направлена на Солнце ( $\pm 1^\circ$ )
Концентрация электронов	СССР	Дисперсионный УКВ-радиоинтерферометр $f_1 = 48$ МГц и $f_2 = 144$ МГц
	ГДР	Радиочастотный емкостной зонд $f = 20$ МГц на штанге
Концентрация электронов $n_e$ и температура электронов $T_e$	СССР	Плоский и цилиндрический зонды Ленгмюра, плоский — на корпусе ракеты в тени от Солнца, цилиндрический — на штанге

Существенную роль в программе ионосферных измерений, проведенных на этих ракетах, играли приборы для регистрации поглощения солнечного УФ излучения, которые позволили оценить характеристики нейтральной верхней атмосферы и ионизирующего излучения вдоль траектории ракет [1, 2]. Принцип работы анализатора фотоэлектронов (СССР) таков: освещенный Солнцем платиновый фотокатод защищен сеткой с соответствующим электрическим потенциалом от попадания на него ионосферных положительных ионов. Отрицательный потенциал самого катода исключает

\* Опубликовано в сб.: На орбитах «Интеркосмоса»/Под ред. Г. С. Нариманова. М., 1976.

попадание на него ионосферных электронов. Меняющийся тормозящий потенциал на анализирующей сетке позволяет получить распределение фотоэлектронов по энергиям и, следовательно, информацию о спектре излучения, создающего фотопоток.

Для получения сведений о спектральном характере зарегистрированного излучения фотоанализатор в лабораторных условиях облучался монохроматическим излучением различных длин волн: 584 Å, 740, 1026, 1216, 1607 Å. Зарегистрированные прибором во время полета вольт-амперные характеристики вместе с градуировочными данными вводились в ЭВМ «Урал-11», которая разделила каждую из них на несколько ВАХ, соответствовавших по форме одной из лабораторных «градуировочных» вольт-амперных характеристик, а их сумма наилучшим образом соответствовала картине, полученной при полете ракеты. При этом анализ начинался с выделения того участка полетной ВАХ, который на данной высоте наилучшим образом соответствовал наиболее коротковолновой лабораторной характеристике.

Ионизационная камера (ГДР) была заполнена окисью азота при давлении 17 мм рт. ст. и имела входное окно из MgF толщиной 1,2 мм. Спектральная чувствительность ее 1156—1350 Å с максимумом вблизи линии  $L_{\alpha}$ .

Регистрация  $L_{\alpha}$ -излучения при помощи ионизационной камеры осуществлялась только на нисходящей части траектории ракеты.

На рис. 1 приведены измеренные значения интенсивности излучения в верхних слоях атмосферы. Разрешение по высоте при этом было  $\sim 50$  м. Погрешность измерения интенсивности — меньше 10%.

Во время полета ракеты «Вертикаль-2» было измерено регистрируемое камерой солнечное излучение в диапазоне длин волн 1150—1350 Å вне области поглощения. Поглощение  $L_{\alpha}$ -излучения ( $\lambda = 1216 \text{ Å}$ ) началось вблизи высоты 95 км. В отличие от «Вертикали-1» поглощение для  $\lambda = 1150—1350 \text{ Å}$  (за исключением  $L_{\alpha}$ -линии) имело место вплоть до 95 км. Можно полагать, что наблюдаемое различие для этих экспериментов обусловлено в какой-то мере разницей зенитных расстояний Солнца. На нисходящем участке траектории ракеты на высотах 90—70 км, когда работал ионизационный фотометр, зенитное расстояние было  $81^{\circ}$  и  $75^{\circ}$  для «Вертикали-1» и «Вертикали-2» соответственно. Таким образом, на «Вертикали-1» поглощение УФ излучения должно было быть более интенсивным. Известно, что  $L_{\alpha}$ -излучение поглощается молекулярным кислородом. Результаты измерений поглощения  $L_{\alpha}$ -излучения в атмосфере позволили оценить концентрацию молекулярного кислорода на этих высотах (рис. 1, 2). Из приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что вблизи  $\sim 85$  км в высотных профилях наблюдается излом. На участке 85—81 км концентрация  $O_2$  практически не менялась.

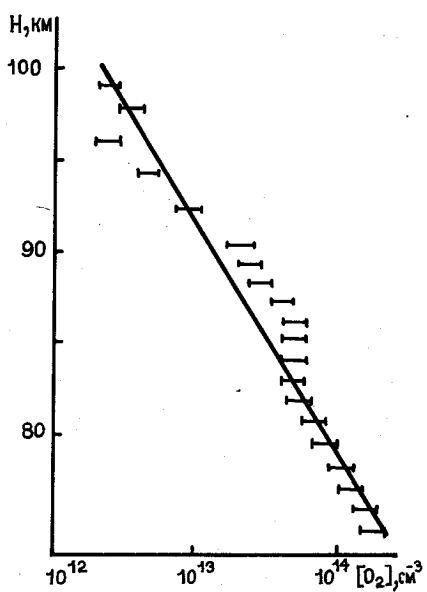
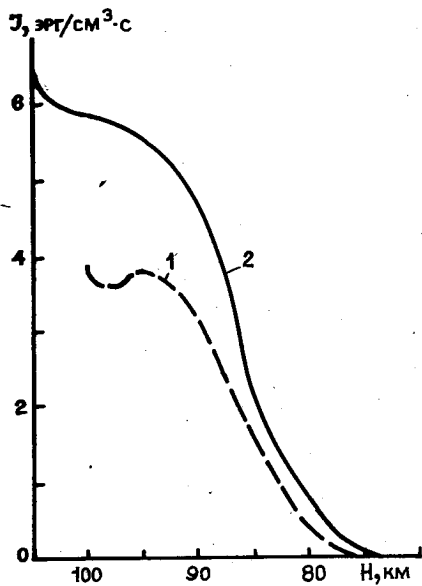


Рис. 1. Высотные зависимости распределения интенсивности  $L_2$ -излучения: 1 — 28.11.70; 2 — 20.08.71

Рис. 2. Профили распределения молекулярного кислорода

Это означает, что на этих высотах для описываемых экспериментов имело место отклонение от барометрической зависимости. Аномальное высотное распределение  $O_2$  на этих высотах наблюдалось иногда и в других экспериментах.

Высотные зависимости значений интегрального фототока (фототока «насыщения», т. е. тока, создаваемого фотоэлектронами с платинового эмиттера при отсутствии тормозящего электрического поля) по данным анализатора фотоэлектронов показаны на рис. 3. Для сравнения характера поглощения интегрального солнечного излучения в атмосфере во время обих пусков ракет на рисунке приведены высотные зависимости фототоков насыщения в относительных единицах, нормированные своим значением в вершине траектории ракеты. Сравнение этих зависимостей указывает на то, что высотный ход поглощения излучения во время двух рассматриваемых полетов ракет неодинаков, т. е. состав и плотность атмосферы в этих двух случаях различны.

В результате проведенного на ЭВМ анализа вольт-амперных характеристик были выделены приблизительно следующие интервалы длин волн: от мягких рентгеновских лучей до 600 Å, 600—900 Å, 900—1100, 1100—1350 и 1350 Å (от 1350 Å до красной границы фото тока). Высотные зависимости этих спектральных фототоков показаны на рис. 4.

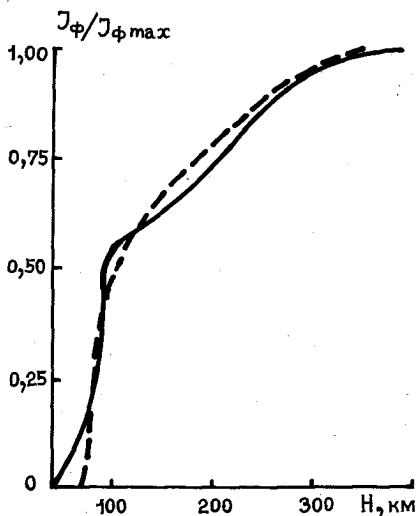


Рис. 3. Высотные зависимости интегрального фототока

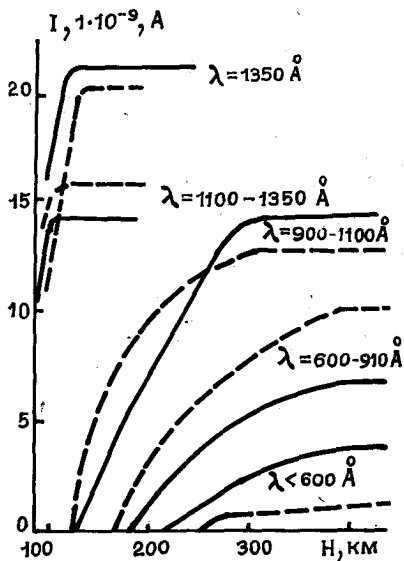


Рис. 4. Высотные зависимости спектральных фототоков

Полученные с помощью анализатора фотоэлектронов значения интенсивности  $L_{\alpha}$ -излучения на «Вертикали-1» и «Вертикали-2» составляли 4,4 и 4,8 эрг/см<sup>2</sup>·с соответственно, что практически в пределах абсолютной экспериментальной точности хорошо совпадает с данными ионизационной камеры (см. рис. 1).

Сведения о поглощении солнечного излучения указанных диапазонов длин волн, полученные в экспериментах с анализатором фотоэлектронов, использовались для оценки концентрации нейтральных частиц. При этом рассматривалась плоская модель атмосферы и для каждого спектрального интервала оценивались эффективные сечения поглощения излучения тремя основными составляющими атмосферного газа. Поскольку точность высотных зависимостей «спектральных» фототоков оказалась недостаточной для совместного решения систем трех уравнений поглощения, молекулярные компоненты рассматривались суммарно как одно целое (рис. 5).

На высотах 130—400 км общая концентрация нейтральных частиц изменялась примерно от  $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ , при этом концентрация атомарного кислорода начинает превышать концентрацию молекулярных частиц только на высотах, больших 200 км. Сравнение полученных значений  $O_2$  на высотах 90—75 км с результатами измерений, проведенных с помощью ионизационной камеры, свидетельствует об их соответствии.

Используя эти значения концентраций нейтральных частиц, а также потоков солнечного излучения, можно оценить скорость ионообразования, величина которой сравнивается со значениями электронной концентрации, полученными на этих же ракетах при использовании дисперсионного радиоинтерферометра (рис. 6). Вариации высотных профилей электронной концентрации соответствуют классическим представлениям об ее сезонных изменениях в средних широтах. По-видимому, причиной наблюдаемых вариаций в вертикальных распределениях нейтральной и ионизированной составляющих верхней атмосферы является совокупность целого ряда факторов: интенсивность потоков заряженных частиц их плазмосферы и сопряженного полушария, высотных изменений плотности и состава нейтральных частиц ветров и скоростей ионосферных дрейфов и пр.

Приведенные на рис. 6 данные позволили оценить эффективный коэффициент рекомбинации для Н-200 км. Первоначально в этих оценках при рассмотрении члена движения в уравнении баланса ионизации учитывалась только вертикальная диффузия. Оказалось, что при этом эффективный коэффициент рекомбинации  $\beta$  для Н больше 200 км принимал значения  $\sim (0,5—3) 10^{-3} \text{ с}^{-2}$  [2]. В дальнейшем были определены коэффициенты рекомбинации для обоих рассматриваемых пусков с учетом влияния ионосферных дрейфов, рассчитанных по методу Дж. Кинга (по просьбе авторов экспериментов расчеты скоростей ионосферных дрейфов были приведены самим Дж. Кингом).

Учет влияния ионосферных дрейфов заметно сказался на высотном ходе  $\beta$  в области F. При скоростях ионосферных дрейфов выше 10 м/с движение заряженных частиц влияет на процесс деионизации в области F сильнее, чем изменение химического состава нейтральной верхней атмосферы (см. следующую статью в настоящем сборнике).

На рис. 7 приведены результаты измерения температуры электронов зондами Ленгмюра на ракетах «Вертикаль-1» и «Вертикаль-2».

Во время полета ракет «Вертикаль-1» и «Вертикаль-2» наряду с ракетной регистрацией вертикального распределения электронной концентрации методом дисперсионного радиоинтерферометра (СССР) проводились наземные наблюдения ионосферного поглощения радиоволн методом А1 (ГДР) [3].



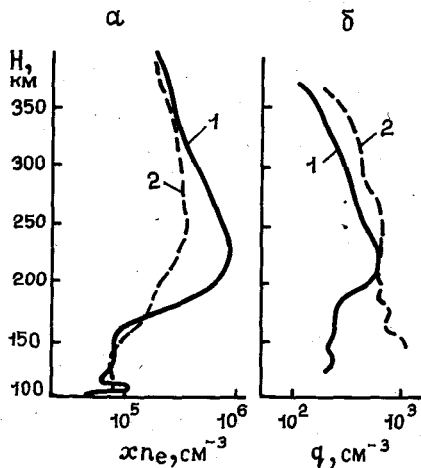
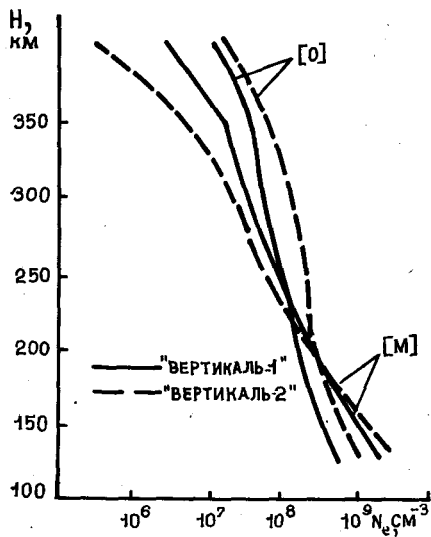


Рис. 5. Высотные зависимости концентраций нейтральных частиц

Рис. 6. Сравнение величины скорости ионообразования и электронной концентрации: а — профили электронной концентрации; б — скорости ионообразования. 1—28.11.70; 2—20.08.71

Установка ин-та им. Г. Герца для измерения поглощения радиоволн располагалась вблизи места старта ракеты и работала на частотах 1,0; 1,5; 2 МГц. Поглощение радиоволн с определенной длиной волны в некоторой области ионосферы зависит от величины  $n_e$  и от эффективной частоты соударений электронов с другими частицами. Упрощенно это можно представить так: радиоволны вызывают упорядоченное колебательное движение электронов, которые возвращают энергию, переизлучая радиоволны. Соударения нарушают упорядоченное движение электронов, и часть энергии радиоволн при этом расходуется на нагрев ионосферы. По данным о поглощении радиоволн и известным из эксперимента с дисперсионным радиоинтерферометром величинам можно получить на основе соотношений магнитоионной теории значения эффективной частоты соударений  $\nu_e$ .

По экспериментальным данным о высотном ходе и результатам измерений поглощения радиоволн методом оптимизации было получено высотное распределение  $\nu_e$ , наилучшим образом удовлетворяющее при данном распределении  $n_e$  экспериментально наблюдавшимся значениям поглощения радиоволн на трех частотах (рис. 8). Необходимые расчеты на ЭВМ были выполнены в ГДР.

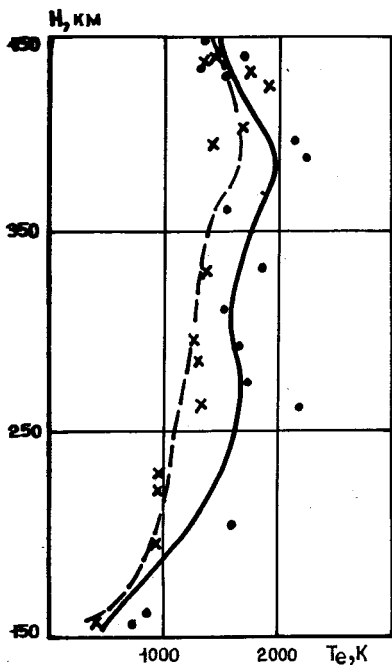


Рис. 7. Результаты измерения температуры электронов

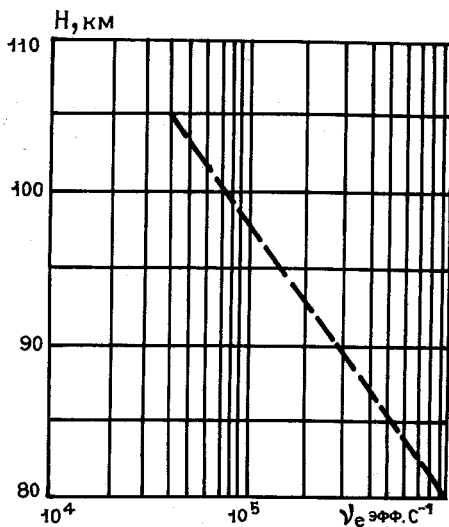


Рис. 8. Высотные распределения  $\nu_e$  по данным метода А1

В результате исследования был сделан вывод о том, что по крайней мере при восходе Солнца главная часть поглощения радиоволн попадает на область вблизи высоты отражения (для частот 1,5 и 2,0 МГц), а высота отражения находится в нижней части области F.

#### Литература

1. Бишофф К., Грингауз К. И., Кляйн Г. и др.//Космические исследования. 1972. 10. 228.
2. Мартини Л., Шютте Н. М.//Космические исследования. 1973. 11. 718.
3. Мартини Л., Шютте Н. М., Грингауз К. И. и др.//Космические исследования. 1972. 10. 253.