



**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

## РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ЭФФЕКТИВНОЙ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ РАКЕТНЫМИ И НАЗЕМНЫМИ РАДИОМЕТОДАМИ ВО ВРЕМЯ ЗАПУСКОВ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТ «ВЕРТИКАЛЬ»

Н. П. Данилкин, П. Ф. Денисенко, В. А. Рудаков,  
В. В. Соцкий, Ю. Н. Фаер, В. И. Водолазкин (СССР)

Комплексные эксперименты, проводившиеся при запусках геофизических ракет типа «Вертикаль», предоставляли уникальную возможность по проверке и усовершенствованию наземных методов радиодиагностики концентрации  $n_e$  и эффективной частоты соударений  $\nu_e$  электронов во внутренней ионосфере. Важность совместных наземно-ракетных измерений определялась следующими факторами. Во-первых, ракеты «Вертикаль» поднимались до высот 500 и 1500 км, что позволило уточнить методику наземных радиоизмерений на всех высотах ниже главного максимума ионосферы ( $h_{max}F$ ). Во-вторых, для этих высот были получены практически точные измерения  $n_e$ , осуществленные с помощью ракетного дисперсионного УКВ-интерферометра [1], что дало возможность корректно учесть особенности ионограмм вертикального зондирования (ВЗ). В-третьих, во время полетов ракет измерялись параметры, которые позволили провести сопоставления между эмпирическими и газокинетическими оценками  $\nu_e$ .

В настоящей работе описаны результаты определения  $n_e$  и  $\nu_e$  в четырех наземных экспериментах, проводившихся одновременно с ракетными измерениями: 15.07.75—ВЗА, 02.09.75—«Вертикаль-3», 14.10.76—«Вертикаль-4», 03.11.79—«Вертикаль-7». Высотные зависимости  $n_e(h)$  и  $\nu_e(h)$  находились по ионограммам и поглощению радиоволн, зарегистрированным вблизи старта ракет. Использовалась аппаратура, позволяющая фиксировать отдельно импульсы радиоволн разных поляризаций. С помощью поляризационного ионозонда [2] велась раздельная съемка о- и х-следов ионограммы. Многочастотная установка обеспечивала возможность измерять поглощение радиоволн любой поляризации методом А1 на десяти частотах в диапазоне 2,00—6,25 МГц (во всех экспериментах определялось поглощение о-волн) [3].

**Особенности определения  $n_e$  по данным ВЗ.** Основные трудности при расчетах  $n_e(h)$ -профилей по ионограммам ВЗ обусловлены существованием не наблюдаемых с помощью ионозонда областей ионосферы: нижележащей и межслоевой. Первая характеризуется отсутствием отраженных импульсов на частотах, меньших минимальной частоты ионограммы  $f_{min}$ . Вторая связана с участками

$n_e(h)$ -профиля, на которых высотный градиент  $dn_e/dh \leq 0$ , что приводит к скачку и разрыву следов на ионограмме. Для определения  $n_e(h)$  в указанных областях необходимо обращаться интегральное уравнение Фредгольма первого рода, что является некорректной задачей и требует привлечения дополнительной информации [4].

При восстановлении высотной зависимости  $n_e(h)$  в нижележащей области помимо действующих высот о-следа E-области ионограммы нами использовалась дополнительная информация двух видов. Во-первых, считалось, что  $n_e(h)$ -профиль можно аппроксимировать аналитическим выражением

$$n_e(h) = n_{e0} \exp(h/H_N - h_0/H_N). \quad (1)$$

Во-вторых, при определении параметров модели (1) учитывалось поглощение радиоволн, измеренное на частоте 2 МГц. Параметры  $n_{e0}$ ,  $h_0$ ,  $H_N$  и их среднеквадратичные отклонения находились в соответствии с [5, 6].

При расчетах немонотонного  $n_e(h)$ -профиля в E- и F-областях также привлекалась дополнительная информация, а именно: кроме обыкновенного следа использовались действующие высоты x-компоненты ионограммы, и предполагалось, что высотный ход  $n_e$  можно представить рядом участков с определенной функциональной зависимостью  $n_e(h)$  на каждом из них. В окрестности максимумов областей E и F принималась параболическая аппроксимация

$$n_e(h) = n_{emax} - a(h_{max} - h)^2, \quad (2)$$

на остальных участках — линейное изменение  $n_e$  с высотой. Для учета межслоевой ионизации допускалось несколько функциональных зависимостей: монотонная с параболическим изменением

$$n_e(h) = n_{emax}E + a(h - h_{max}E)^2, \quad (3)$$

монотонная с постоянным значением

$$n_{emax}(h) = n_{emax}E, \quad (4)$$

немонотонная с линейным изменением  $n_e(h)$  при  $n_e < n_{emax}E$ .

Для выбранной системы функций система двух интегральных уравнений, связывающих частотную зависимость действующих высот с высотным ходом  $n_e$ , сводится к неопределенной системе линейных алгебраических уравнений. Решение системы находилось методом наименьших квадратов, причем считалось, что ошибки действующих высот независимы. Выбор  $n_e(h)$ -профиля осуществлялся по абсолютному минимуму суммы квадратов невязок действующих высот —  $\Phi$ . Согласно общей схеме наименьших квадратов [7] проводилась оценка среднеквадратичных отклонений  $\sigma(h')$  действующих высот  $\sigma^2(h') = \Phi / (m - n)$ , где  $m$  — количество используемых действующих высот;  $n$  — число параметров, определяющих  $n_e(h)$ -профиль. Если

$\sigma(h')$  превышала допустимые пределы [8], то система функций менялась.

**Особенности определения  $\nu_e$  по данным наземного радиозондирования.** Изменение частотной зависимости поглощения радиоволн при их вертикальном распространении позволило решить задачу нахождения высотных зависимостей  $\nu_e$  в E- и F-областях. Интерес именно к этому высотному интервалу определялся следующими соображениями. Во-первых, в D-области газокинетические и основанные на экспериментах по распространению радиоволн эмпирические оценки  $\nu_e$  совпадают [2, 9]. Во-вторых, в ранних экспериментах оценки  $\nu_e$  в отдельных случаях больше газокинетических на порядок [10, 11], причем эмпирические значения  $\nu_e$  определялись в основном для максимумов слоев.

В теоретическом аспекте задача определения  $\nu_e(h)$  в E- и F-областях рассмотрена в [12]. Показано, что непосредственно из частотной зависимости поглощения радиоволн можно найти функцию

$$\varphi(n_e) = n_e(dh/dn_e) \nu_e(n_e).$$

При известном  $n_e(h)$  находится

$$\nu_e(h) = \varphi[n_e(h)] \ln n_e(h) / (dh).$$

Отсюда видно, что ошибки в определении  $\nu_e$  зависят как от погрешностей  $n_e(h)$ -профиля, так и от его логарифмической производной. Поэтому для повышения точности оценок  $\nu_e$  использовались результаты измерения  $n_e$ , полученные методом ракетного дисперсионного интерферометра. Расчеты  $\nu_e(h)$  проводились усовершенствованным вариантом метода [13].

**Результаты и их обсуждение.** Результаты измерений  $n_e(h)$ -профилей для четырех экспериментов представлены на рис. 1. Сплошные кривые — данные дисперсионного интерферометра, штриховыми линиями изображены  $n_e(h)$ -профили, рассчитанные по данным наземного радиозондирования (ВЗ). Вертикальные линии дают среднеквадратичные отклонения, полученные в результате применения метода наименьших квадратов.

Во всех случаях отмечено хорошее совпадение ракетных и наземных  $n_e(h)$ -профилей на высотах до 100—105 км, что указывает на правильность методики расчетов, учитывающей поглощение радиоволн. Точность определения высоты  $h(f_{min})$  в каждом из экспериментов не хуже 2 км. Расчеты  $n_e(h)$ -профилей по ионограммам ВЗ в E-, межслоевой и F-областях проводились с учетом особенностей результатов ракетных измерений  $n_e$ . Их анализ позволил дать однозначную интерпретацию ионограмм ВЗ и выработать рекомендацию по выбору системы функций  $n_e(h)$ , описывающих участки  $n_e(h)$ -профилей, и по методике проведения расчетов. Характерные особенности результатов ракетных измерений  $n_e$ , ионограмм

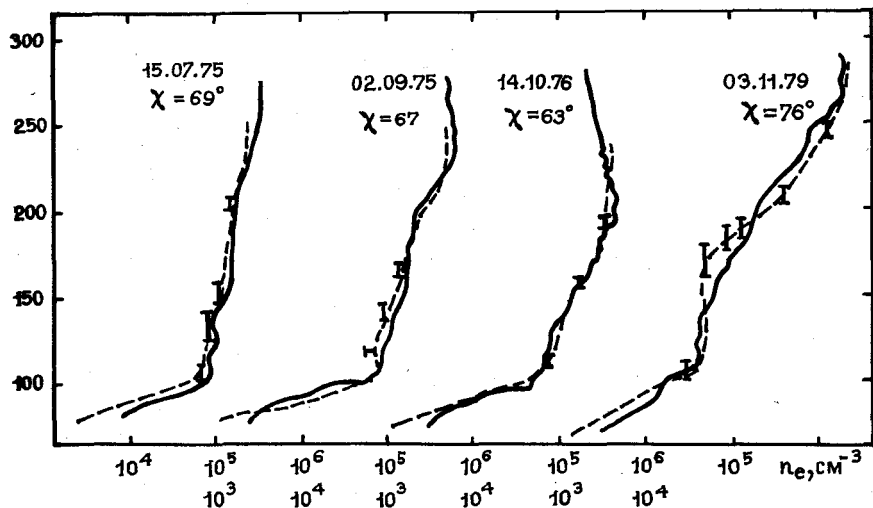


Рис. 1. Результаты измерений  $N_e(h)$ -профиля по данным дисперсионного интерферометра и вертикального зондирования

ВЗ и расчетов  $p_e(h)$  для каждого эксперимента отражены в табл. 1. В табл. 2 приведены результаты сопоставлений рассчитанных из ионограмм  $p_e(h)$ -профилей с данными дисперсионного интерферометра. В целом во всех экспериментах расчетные и ракетные  $p_e(h)$ -профили удовлетворительно согласуются друг с другом. Наибольшее расхождение  $p_e(h)$ -профилей получено в области межслоевой впадины и в основании области F (см. табл. 2), особенно для эксперимента «Вертикаль-7». Среднеквадратичные отклонения высоты максимумов областей E и F лежат в пределах 5—6 км.

Таблица 1

Характерные особенности ракетного и расчетного  $p_e(h)$ -профилей

Эксперимент, дата, зенитный угол Солнца	Особенности на ионограмме	Особенности ракетного $p_e(h)$ -профиля	Расчеты $p_e(h)$ по ионограмме	Особенности расчетов
1. 15.07.75 $\chi = 69^\circ$ до полудня	Прозрачный $E_s^c$ $i_0 F I = 3,7$ МГц	Мелкая впадина $p_e$	1. До 102 км—модель (1) 2. Впадина—линейный отрезок 3. Вблизи $h_m E$ и частотах $h_m F$ —парабола (2)	1. $E_s$ не учитывался 2. $\chi$ -компонента взята на 3. $i_x < i_x F I$

Эксперимент, дата, зенитный угол Солнца	Особенности на ионограмме	Особенности ракетного $p_e(h)$ -профиля	Расчеты $p_e(h)$ по ионограмме	Особенности расчетов
2. «Вертикаль-3» 02.09.75 $\chi = 67^\circ$ после полудня	Полупрозрачный $E_s^c (f_b E_s = 2,8 \text{ МГц})$ $f_0 F1 = 4,1 \text{ МГц}$ E2	Впадина $p_e$ выражена слабо	1. До 100 км—модель (1) 2. Впадина—линейный отрезок $p_e$ 3. Вблизи $h_m E$ и $h_m F$ —парабола (2)	1. Учет $E_s$ до $f_b E_s$ 2. Принято $f_0 E = f_b E_s$
3. «Вертикаль-4» 14.10.76 $\chi = 63^\circ$ после полудня	E2	Отсутствие впадины Локальные максимумы $p_e$ : 110 км— $7,6 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$ , 124 км— $9,1 \times 10^4 \text{ см}^{-3}$	1. До 103 км—модель (1) 2. Вблизи $h_m E$ , $h_m E2$ , $h_m F$ —парабола 3. Выше $h_m E$ и $h_m E2$ —парабола (3)	1. Монотонные расчеты по двум компонентам
4. «Вертикаль-7» 03.11.78 $\chi = 76^\circ$ после полудня	Расслоение в области E Мелкая впадина выше 116 км	Локальный максимум на 107 км	1. До 105 км—модель (1) 2. Нижний выступ $p_e$ в обл. E—параболы (2), (3) 3. Вблизи $h_m E$ и $h_m F$ —парабола (2) 4. Впадина—линейный отрезок $p_e$	1. Впадина между верхним расслоением в области E и основанием в области F

Обработка совместных наземно-ракетных экспериментов дает основание для использования в практике описанной методики расчетов  $p_e(h)$ -профилей по данным ВЗ с учетом рекомендаций, приведенных в табл. 2.

Результаты определения  $v_e(h)$ -профилей из измерений поглощения радиоволн изображены на рис. 2 непрерывными линиями. Вертикальные линии на них дают среднеквадратичные отклонения, вычисленные в предположении, что погрешности измерений на всех частотах равны 10%. Отметим, что для экспериментов 15.07.75 и 02.09.75 получены уточненные по сравнению с [14, 15] оценки  $v_e$ .

Результаты газокинетических расчетов  $v_e$  представлены на рис. 2 пунктирными кривыми. При вычислениях учитывались соударения электронов с ионами по формулам [16] и нейтральными  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $O$  согласно [17]. Во всех случаях использованы значения  $p_e$ , полученные методом дисперсионного интерферометра. Для эксперимента



## Результаты сопоставления расчетов из ионограмм с данными радиоинтерферометра

Дата проведения эксперимента	Точность определения $h(f_{min})$ , км	Область F					Впадина $p_e$				
		$p_{e_{max}}E$ , см <sup>-3</sup>		$h_{max}E$ , км			Минимальное значение $p_e$ , см <sup>-3</sup>			Ширина, км	
		Интерферометр	Ионозонд	Отклонение, %	Интерферометр	Расчеты	Интерферометр	Расчеты	Отклонение, %	Интерферометр	Расчеты
15.07.75	1,5	$1,13 \cdot 10^5$	$9,4 \cdot 10^4$	-17	112	$112 \pm 1$	$9,3 \cdot 10^4$	$(8,7 \pm 0,3) \times 10^4$	-7	33	$25 \pm 7$
02.09.75	1,0	$1,01 \cdot 10^5$	$9,9 \cdot 10^4$ ( $f_0E_s$ )	-3	110	$105 \pm 1$	$9,4 \cdot 10^4$	$(7,9 \pm 0,6) \times 10^4$	-17	10	$35 \pm 5$
14.10.76	1,0	$9,27 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^4$	2	110	$114 \pm 2$	—	—	—	—	—
03.11.78	1,0	$4,68 \cdot 10^4$	$9,4 \cdot 10^4$	2	124	$124 \pm 1$	$5,9 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^4$ ( $f_0E$ )	16	28	$58 \pm 9$
		$6,61 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$	3	107	$110 \pm 2$					
			$6,9 \cdot 10^4$	10	116	$116 \pm 1$					

Окончание табл. 2

Дата проведения эксперимента	Область F					Максимальное несовпадение $p_e(h)$ -профилей	Максимальная погрешность расчетов высоты $\sigma(h)$			Расчетные значения $\sigma(h')$ , км
	$p_{em}F2$ , см <sup>-3</sup>		$h_mF2$ , км				Высоты			
	Интерферометр	Ионозонд	Отклонение, %	Интерферометр	Расчеты		Высоты	Отклонение расчетов	Высота, км	
15.07.75	$2,9 \cdot 10^5$	$2,5 \cdot 10^5$	-13	255	$249 \pm 2$	153 км	10	136	$\pm 5$	8
02.09.75	$6,66 \cdot 10^5$	$5,9 \cdot 10^5$	-12	248	$249 \pm 1$	Обл. E и обл. впадины	26	140	$\pm 4$	4
14.10.76	$3,31 \cdot 10^5$	$3,5 \cdot 10^5$	5	226	$232 \pm 1$	Вблизи F	12-15	114	$\pm 2$	8
03.11.78	$1,65 \cdot 10^6$	$1,73 \cdot 10^6$	4	287	$287 \pm 1$	175 км	-41	174	$\pm 7$	5

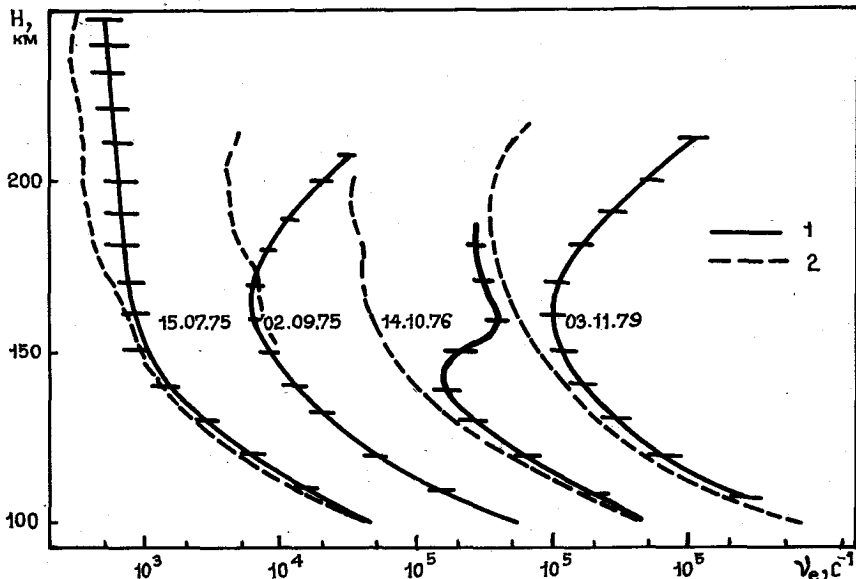


Рис. 2. Результаты определения  $v_e(h)$ -профилей с помощью измерения поглощения (1) и газокинетических расчетов (2)

02.09.75 и 14.10.76 взяты ракетные измерения нейтрального состава [15] и электронной температуры  $T_e$  [18, 19]. Для запусков 15.07.75 и 03.11.78 использованы модельные значения параметров: концентрация нейтралов из [20—22],  $T_e$  ниже 200 км из [22], а выше 200 км из [23].

Из рис. 2 видно, что в F-области во всех случаях имеются различия между эмпирическими и газокинетическими оценками  $v_e$  независимо от использования данных моделей или прямых измерений. Высота, на которой начинается расхождение, меняется от эксперимента к эксперименту (от 130 до 170 км). Летом эмпирические оценки больше газокинетических в 2 раза, осенью различие достигает порядка.

Таким образом, проведенные в комплексных экспериментах исследования эффективной частоты соударений электронов дают наиболее корректное подтверждение осуществления в области F расхождений между экспериментом и теорией.

#### Литература

1. Грингауз К. И., Шейдаков Н. Е. // См. настоящий сб. С. 94—101.
2. Данилкин Н. П., Мальцева О. А., Фаер Ю. Н. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1974. 14. 4. 636—639.
3. Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф., Фаер Ю. Н. // Геомагнетизм и аэронавигация. 1975. 15. 3. 451—456.

4. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1979.
5. Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф., Суший С. М. и др.//Physica Solariterrestris. 1977. 4. 101—111.
6. Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф., Соцкий В. В. Исследование точности оперативного контроля ионизации области D на основе данных радиозондирования//Ионосферные исследования, М., 1981. № 34.
7. Худсон Д. Статистика для физиков. 2-е изд., доп. М., 1970.
8. Васильев Г. В. Исследование погрешностей измерения параметров ионосферы методом вертикального зондирования и вопросы проектирования аппаратуры: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1970. 147 с.
9. Бишофф К., Грингауз К. И., Кляйн Г. и др.//Космические исследования. 1972. 10. 2. 228—238.
10. Thrane E. V., Piggot W. R.//J. Atmos. Terr. 1966. 28. 721—737.
11. Aggogwal K. M., Narinder N., Setty C. S. G. K.//Planet Sci. 1979. 27. 753—768.
12. Гусев В. Д., Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф. и др.//Геомagnetизм и аэрoномия. 1977. 17. 4. 645—648.
13. Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф., Суший С. М. и др.//Геомagnetизм и аэрoномия. 1976. 16. 5. 803—808.
14. Biryukov A. V., Danilkin N. P., Denisenko P. F. et al.//Space Res. 1977. 18. 451—455.
15. Бирюков А. В., Данилкин Н. П., Денисенко П. Ф. и др.//Космические исследования. 1980. 18. 5. 748—753.
16. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. 2-е изд., перераб. М., 1967.
17. Banks P.//Planet Space Sci. 1966. 14. 1085—1105.
18. Charukunov S., Gdalevich G., Petrounova M. et al.//Paper 4. 3. 1. Presented at XIX COSPAR meeting. Philadelphia, USA. June 1976.
19. Гдалевич Г. Л., Чапкынов С. К., Банков Г. Л. и др.//Космические исследования. 1978. 3. 394—398.
20. Medin A. E., Salah J. E., Evans J. V. et al.//J. Geophys. Res. 1977. 82. 16. 2139—2147.
21. Hedin A. E., Refer C. A., Newton G. P. et al.//J. Geophys. Res. 1977. 82, 10, 2148—2156.
22. Часовитин Ю. К., Ключева Н. М., Миронова Л. С.//Геомagnetизм и аэрoномия. 1982. 22. 4. 582.
23. Rawer K., Ramakrishnan S., Bilitza D.//International Reference Ionosphere. Brussels, 1978. P. 75.

УДК 551.510;550.380.8

## **ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ТЕЧЕНИЕ 1970—1981 гг. ПРИ ЗАПУСКАХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТ СЕРИИ «ВЕРТИКАЛЬ»**

**Г. Л. Гдалевич, В. Ф. Губский, В. Д. Озеров  
(СССР)**

В СССР на протяжении более чем двух 11-летних периодов солнечной активности проводились исследования верхней атмосферы