

# ИНТЕРКОСМОС

Некоторые результаты научных экспериментов на ракетах  
„Вертикаль 1 и 2“ и на спутниках „Интеркосмос 2 и 5“

Издано в

АН ГДР

Институт Электроники

Редакционная коллегия:

Ю. Рустенбах, К.-Х. Бишофф, Д. Фин.

1974

ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ, ПРОВЕДЕННЫЕ  
ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКА "ИНТЕРКОСМОС-2"

К.Бишофф, Г.Л.Гдалевич, В.Ф.Губский,  
И.Д.Дмитриева, Г.Циммерман

ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ  
ЗОНДОВ ЛЕНГМЮРА

Приведены результаты измерений концентрации и температуры электронов двумя, ориентированными взаимноперпендикулярно, цилиндрическими зондами Ленгмюра для высот 200 - 1000 км. Показано, что магнитное поле не влияет на величины измеряемой концентрации и температуры электронов. Проводится сравнение результатов измерений концентрации заряженных частиц зондами Ленгмюра и сферической ионной ловушкой и измерений температуры электронов зондами Ленгмюра и высокочастотным зондом.

В в е д е н и е

На спутнике "Интеркосмос-2" были установлены два цилиндрических зонда Ленгмюра [1]. Независимость вида электронной ветви вольт-амперной характеристики от формы зонда при задерживающих потенциалах позволяет использовать для измерений концентрации и температуры

электронов зонд любой формы. Однако, измерения при помощи цилиндрических зондов Ленгмюра дают принципиальную возможность [2]: а) использовать для обработки область вольт-амперной характеристики, соответствующую притягивающим потенциалам; б) исключить влияние на измерения концентрации и температуры электронов магнитного поля Земли (при этом поверхность зонда может быть большой, хотя радиус цилиндра мал по сравнению с циклотронным радиусом электрона). По этой причине цилиндрические зонды Ленгмюра широко используются при исследованиях ионосферной плазмы [3, 4, 5]. Измерения при помощи цилиндрических зондов Ленгмюра проводились лишь при непосредственной радиосвязи со спутником. Основные задачи эксперимента с цилиндрическими зондами Ленгмюра описаны в работе [1]. В настоящем сообщении приводятся и обсуждаются результаты измерений электронной концентрации, полученные во время нескольких сеансов радиосвязи со спутником (~ 10 из общего числа 259); сравниваются результаты измерения концентрации электронов с данными измерения концентрации положительных ионов при помощи сферических ионных ловушек [6] и результаты измерений температуры электронов с данными высокочастотного зонда [7], для оценки влияния магнитного поля, приводятся результаты измерений концентрации и температуры электронов зондом 1 и зондом 2.

### Описание аппаратуры и методов обработки

Конструкция зонда Ленгмюра описана в статье [1].

На зонды Ленгмюра поочередно подавалось пилообразное напряжение относительно корпуса спутника (на охранные кольца также, причем отличие напряжений не превышало 0,1 в), меняющееся за  $\sim 3,8$  сек в пределах (-3 + +11) в. Перед каждым изменением пилообразного напряжения на зонде в течение  $\sim 0,2$  сек поддерживалось постоянное напряжение. Таким образом, период повторения составлял 8 сек. Диапазон измерения токов ( $+2 \cdot 10^{-8}$  +  $-5,5 \cdot 10^{-6}$ ) а был разбит на два поддиапазона, измерение по которым проводилось различными усилительными каналами. Для привязки значений токов, текущих на зонд, к напряжению на зонде перед началом изменения пилообразного напряжения на усилительные каналы подавались прямоугольные импульсы амплитудой 2 в, причем задний фронт импульсов совпадал с началом развертки.

При наличии распределения скоростей электронов по закону Максвелла для электронного тока собираемого зондом в области торможения ( $V < 0$ ) справедливо соотношение:

$$J_e = A \cdot \frac{n_e \cdot e}{4} \cdot v_e \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \quad (1)$$

где  $A$  - поверхность зонда ( $\text{см}^2$ ),  
 $e$  - заряд электрона  
 $K$  - постоянная Больцмана  
 $V$  - потенциал зонда относительно потенциала плазмы,  
 $v_e$  - средняя арифметическая скорость электрона, при максвелловском распределении скоростей  $v_e = \sqrt{\frac{8KT_e}{\pi m_e}}$   
 $m_e$  - масса электрона.

В области ускорения ( $V > 0$ ) для цилиндрического зонда [8]:

$$J_e = \frac{A n_e e}{4} \cdot v_e \cdot \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{eV}{KT_e}} + \exp\left(\frac{eV}{KT_e}\right) \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{eV}{KT_e}}\right)\right) \right\} \quad (2)$$

где  $\operatorname{erf}(x)$  - интеграл ошибок.

Обработка зондовых характеристик проводилась несколькими способами.

В первом случае для экспериментальных точек зондовой характеристики методом наименьших квадратов проводился поиск выражений (1) и (2) при вариации параметров  $n_e$ ,  $V$  и  $T_e$ . При этом составляющая тока положительных ионов считалась постоянной и равной максимальному значению ионного тока.

При обработке зондовых характеристик по другой методике было использовано то обстоятельство, что в

области ускоряющих потенциалов электронный ток на зонд не зависит от электронной температуры и концентрация электронов  $n_e$  может быть определена независимо.

Для случая  $\frac{eV}{kT_e} \gg 1$  из (2) получаем:

$$J_e = \frac{A \cdot n_e \cdot e}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2eV}{m_e}} = 3,02 \cdot 10^{-12} \cdot A \cdot n_e \cdot \sqrt{V} \quad (3)$$

откуда для электронной концентрации:

$$n_e = 8,8 \cdot 10^{10} \frac{J_e [a]}{\sqrt{V [b]}}$$

Это справедливо для потенциалов зонда более чем на  $I$  в превышающих потенциал плазмы [9], [10].

В области торможения электронный ток имеет экспоненциальную зависимость от напряжения; в этом случае из наклона характеристики зондового тока, построенной в полулогарифмическом масштабе, определяется электронная температура

$$T_e = \frac{e}{k} \cdot \frac{V_2 - V_1}{\ln \frac{J_2}{J_1}} \quad (4)$$

Для того, чтобы при определении температуры электронов по значениям зондового тока ослабить влияние составляющей ионного тока брались величины зондового

тока только начиная с некоторого его значения, где вклад составляющей ионного тока был мал. Вычисления  $T_e$  проводились на ЭЦВМ. Машина выдавала, кроме величины  $n_e$ ,  $T_e$  и потенциала спутника относительно ионосферной плазмы следующие данные: число точек, по которым проведены отрезки прямых аппроксимирующие участки полулогарифмической характеристики и зависимости квадрата тока от напряжения, средние квадратичные отклонения точек от прямой и другие необходимые данные для оценки надежности вычисленных данных.

#### Результаты измерений и их обсуждение

Результаты вычисления концентрации электронов  $n_e$  по первому и второму методам приведены на рис.1а, на котором одновременно показаны значения потенциала спутника, определенные из зондовой характеристики. На рисунке отчетливо видны периодические изменения концентрации электронов, совпадающие с периодом вращения спутника. Видно, что значения  $n_e$ , определенные двумя методами различаются менее чем на 10% в минимумах и менее чем на 50% в максимумах кривой хода электронной концентрации. Различие можно объяснить изменением составляющей ионного тока при вращении спутника.

На рис.1б приведены результаты измерения различными

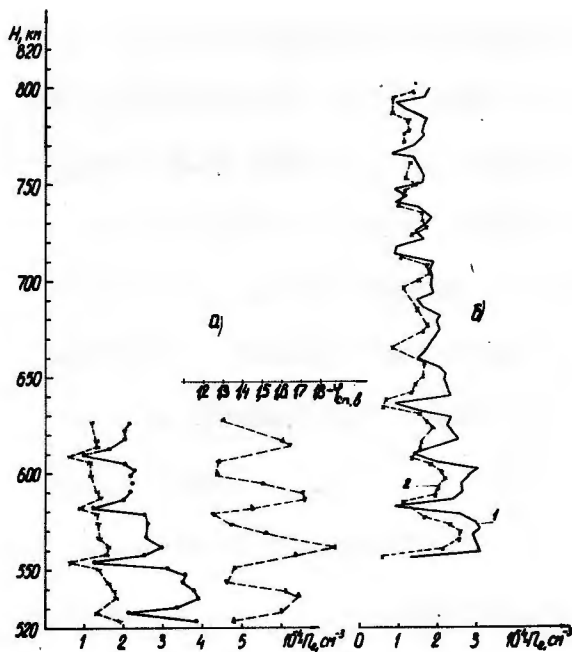


Рис.1.

зондами. Как видно из рис.1б (это видно и из рис.2а) значения концентрации электронов, определенные по взаимно-перпендикулярным зондам, отличаются не более чем на 20%. Причем фаза изменений (из-за модуляции вращением спутника) совпадает. Из этого факта следует, что магнитное

поле не влияло на измерения концентрации электронов.

На рис.2а приведены результаты измерения концентрации электронов в дневное время на высотах 260 - 460 км. На рис.2б и рис.2в приведены результаты измерения концентрации электронов на высотах 500 - 1000 км, соответственно, в утреннее и ночное время. Как видно из рис.2в концентрация электронов на высотах 600-1000 км менялась в январе 1970 г. довольно слабо. Это свидетельствует о наличии на этих высотах как основной компоненты ионосферной плазмы легких ионов ( $H^+$  или  $He^+$ ). Из рис.2б следует, что в утреннее время граница перехода от тяжелых ионов ( $O^+$ ) к легким проходит значительно выше, чем ночью.



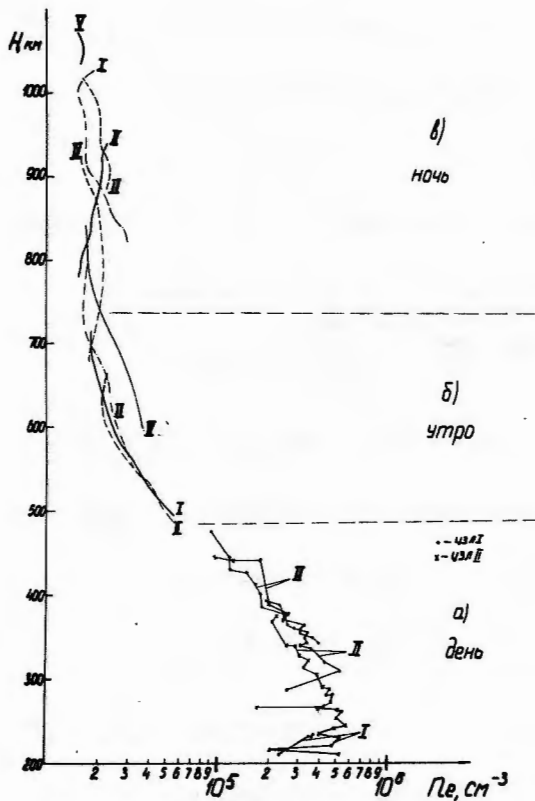


Рис.2.

Из рисунка можно заключить, что характер зарегистрированных изменений температуры различными методами

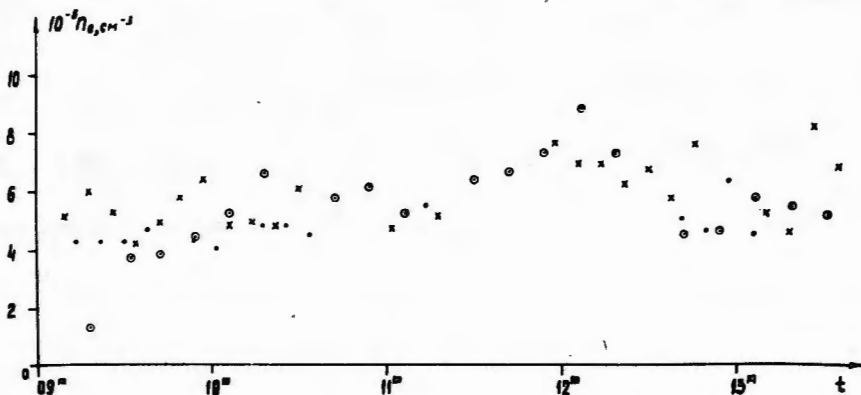


Рис.3.

На рис.3 приведены результаты измерения концентрации заряженных частиц по данным зондов Ленгмюра и сферической ионной ловушки. Из рис.3 следует, что значения концентрации, определенные различными методами, практически совпадают.

На рис.4 приведены результаты измерений температуры электронов зондов Ленгмюра и высокочастотным зондом.

совпадает, хотя значения температуры отличаются в дневное время на  $\sim 500^{\circ}$ .

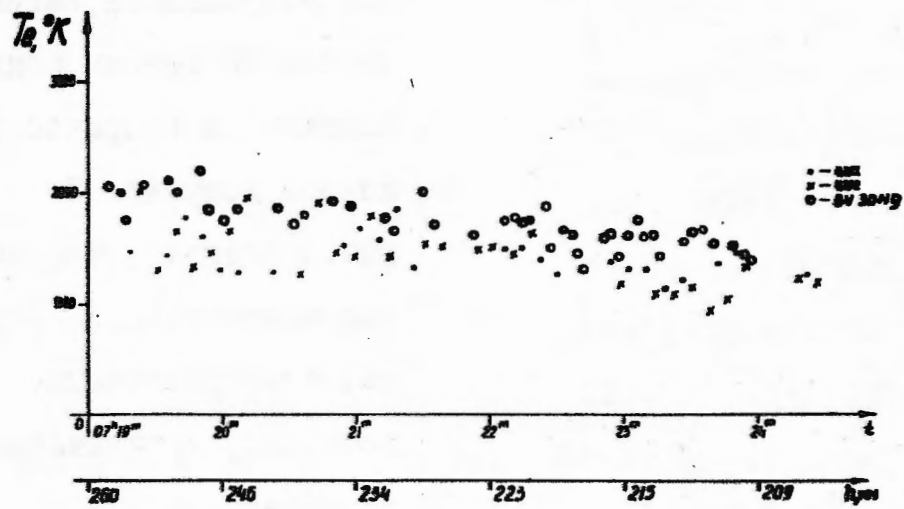


Рис.4.

Подписи к рисункам

Рис.1. Концентрация электронов.

А. Концентрация электронов  $n_e$  и потенциал спутника

х - метод 1 (сравнение экспериментальной и теоретической характеристики электронного тока);

о - метод 2 (использование зависимости  $J^2 \sim V$ );

Δ - потенциал спутника.

Б. Концентрация электронов по показаниям двух взаимно-перпендикулярных зондов

· - зонд 1, х - зонд 2, виток 290, 14.1.70 г.  
 время 05<sup>h</sup> 56<sup>m</sup> 54<sup>s</sup> ... 06<sup>h</sup> 05<sup>m</sup> 31<sup>s</sup>

Рис.2. Концентрация электронов в различное время суток на высотах 260-1000 км.

А. Концентрация электронов в дневное время на высотах 260-460 км.

Кри- вая	Ви- ток	Число	Время (московское)	широта	долгота
I	56	29.12.69	07 <sup>h</sup> 19 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> - 07 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup> 19 <sup>s</sup> 48 <sup>o</sup> ... 45 <sup>o</sup>	+105	+130 <sup>o</sup>
II	73	30.12.69	11 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 53 <sup>s</sup> - 11 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 16 <sup>s</sup> 44 <sup>o</sup> .. 48 <sup>o</sup>	+16 <sup>o</sup>	+46 <sup>o</sup>
III	145	04.01.70	09 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup> - 09 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup> 47 <sup>o</sup> ... 48 <sup>o</sup>	+32 <sup>o</sup>	+55 <sup>o</sup>

Б. Концентрация электронов в утреннее время

Кри- вая	Ви- ток	Число	Время (московское)	широта	долгота
I	26I	12.I.70	06 <sup>h</sup> 39 <sup>m</sup> 26 <sup>s</sup> - 06 <sup>h</sup> 47 <sup>m</sup> 29 <sup>s</sup>	46°...48°...46°	+18°+60°
II	276	13.I.70	07 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> 55 <sup>s</sup> - 07 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 28 <sup>s</sup>	48°...	42°+24°+55°
III	290	14.I.70	05 <sup>h</sup> 56 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup> - 06 <sup>h</sup> 05 <sup>m</sup> 31 <sup>s</sup>	45°...48°...46°	+16°+61°
IV	408	22.I.70	06 <sup>h</sup> 08 <sup>m</sup> 46 <sup>s</sup> - 06 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 36 <sup>s</sup>	47°...	33°+61°+43°

В. Концентрация электронов в ночное время

Кри- вая	Ви- ток	Число	Время(московское)	широта	долгота
I	406	22.I.70	02 <sup>h</sup> 43 <sup>m</sup> 40 <sup>s</sup> - 02 <sup>h</sup> 51 <sup>m</sup> 48 <sup>s</sup>	43°...48°	+9° +48°
II	289	14.I.70	04 <sup>h</sup> 13 <sup>m</sup> 24 <sup>s</sup> - 04 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup> 45 <sup>s</sup>	37°...48°	+20° +58°
III	42I	23.I.70	03 <sup>h</sup> 07 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup> - 03 <sup>h</sup> 17 <sup>m</sup> 52 <sup>s</sup>	46°...38°	+5° +49°
IV	422	23.I.70	04 <sup>h</sup> 50 <sup>m</sup> 32 <sup>s</sup> - 05 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup> 56 <sup>s</sup>	46°48°46°	+7° +54°
V	492	27.I.70	22 <sup>h</sup> 14 <sup>m</sup> 23 <sup>s</sup> - 22 <sup>h</sup> 24 <sup>m</sup> 54 <sup>s</sup>	32°...47°	+21° +56°

Рис.3. Концентрация заряженных частиц при измерениях зондами Ленгмюра и сферической ионной ловушкой

• - зонд I, x - зонд 2, o - ионная ловушка.

Рис.4. Температура электронов  $T_e$  при измерениях зондами Ленгмюра и высокочастотным зондом

• - зонд I, x - зонд 2, o - вч.зонд

Виток 56 29.12.69 г. Широта  $48^\circ \dots 45^\circ$ , долгота  $+99^\circ \dots +136^\circ$ .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. К.И.Грингауз, К.Б.Серафимов, К.Х.Шмеловский, Я.Шмиллауэр. (Наст.сборник) см.также *Косм.Иссл.* 11, N1,95 (1973).
2. Г.Л.Гдалевич. В сб. "Ионосферные исследования" 18, стр.95, изд-во "Наука", 1969.
3. В.В.Афонин, Т.К.Бреус, Г.Л.Гдалевич, Б.Н.Горюжанкин, К.И.Грингауз, Р.Е.Рыбчинский, Н.М.Шютте. Сб. "Исследования космического пространства", стр.151, изд-во "Наука", 1965.
4. L.H.Brace, N.W.Spencer, A.Dalgarno. *Planet.Space Sci.*, 13, 647, 1965.
5. L.H.Brace, N.M.Reddy. *J.Geophys.Res.*, 70, 5783, 1965.
6. Г.Л.Гдалевич, Б.Н.Горюжанкин, Д.Самарджиев, К.Б.Серафимов, И.Кутнев. (Наст.сборник) см.также *Косм.Иссл.* 11, N2, <sup>245</sup> (1973).
7. В.В.Афонин, Г.Л.Гдалевич, К.И.Грингауз, Я.Кайнарова, Я.Шмиллауэр. (Наст.сборник) см.также *Косм.Иссл.* 11, N2, 254 (1973).
8. L.A.Smith. *COSPAR Information Bulletin* N 17, 1964.
9. В.Л.Грановский. *Электрический ток в газе*, М., 1952.