

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

Том XI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

2

МОСКВА · 1973

УДК 550.385.41

**ИССЛЕДОВАНИЯ ИОСФЕРЫ, ПРОВЕДЕННЫЕ
ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКА «ИНТЕРКОСМОС-2»**

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

**IV. ИЗМЕРЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗОНДОВ
ЛЕНГМЮРА**

Приведены результаты измерений концентрации и температуры электронов двумя, ориентированными взаимно перпендикулярно, 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 полной ловушкой и измерений температуры электронов зондами Ленгмюра и высокочастотным зондом.

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—5]. Измерения с помощью 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 229); 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 использовавшегося зонда Ленгмюра описана в статье [1]. На зонды Ленгмюра поочередно подавалось пилообразное напряжение относительно корпуса спутника (на оградные кольца также, причем

отличие напряжений не превышало 0,1 в, меняющееся за 3,8 сек в пределах $(-3 \div +11)$ в. Перед каждым изменением пилообразного напряжения на зонде в течение 0,2 сек поддерживалось постоянное напряжение. Таким образом, период повторения составлял 8 сек. Диапазон регистрирующихся токов $(+2 \cdot 10^{-6} \div -5,5 \cdot 10^{-6})$ 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 распределении скоростей электронов по закону Максвелла для электронного тока, собираемого зондом в области торможения ($V < 0$) справедливо соотношение

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

где A — поверхность зонда, см^2 ; e — заряд электрона $1,6 \cdot 10^{-19}$ кул; k — постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ эрг/град; V — потенциал зонда относительно потенциала плазмы; v_e — средняя арифметическая скорость электрона, при максвелловском распределении скоростей $v_e = \sqrt{8\pi m_e / kT_e}$; m_e — масса электрона; n_e — электронная концентрация. В области ускорения ($V > 0$) для цилиндрического зонда [8]:

$$I_s = A \frac{n_e \cdot e}{4} v_e \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{eV}{kT_e}} + \exp\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \left(1 - \text{erf} \sqrt{\frac{eV}{kT_e}}\right) \right\}, \quad (2)$$

где $\text{erf}(x)$ — 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

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

откуда для электронной концентрации

$$n_e = 8,8 \cdot 10^{10} \frac{I_s [a]}{\sqrt{V [e]}}.$$

Это справедливо для потенциалов зонда, более чем на 1 в превышающих потенциал плазмы [9].

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

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{(V_2 - V_1)}{\ln \frac{I_2}{I_1}}. \quad (4)$$

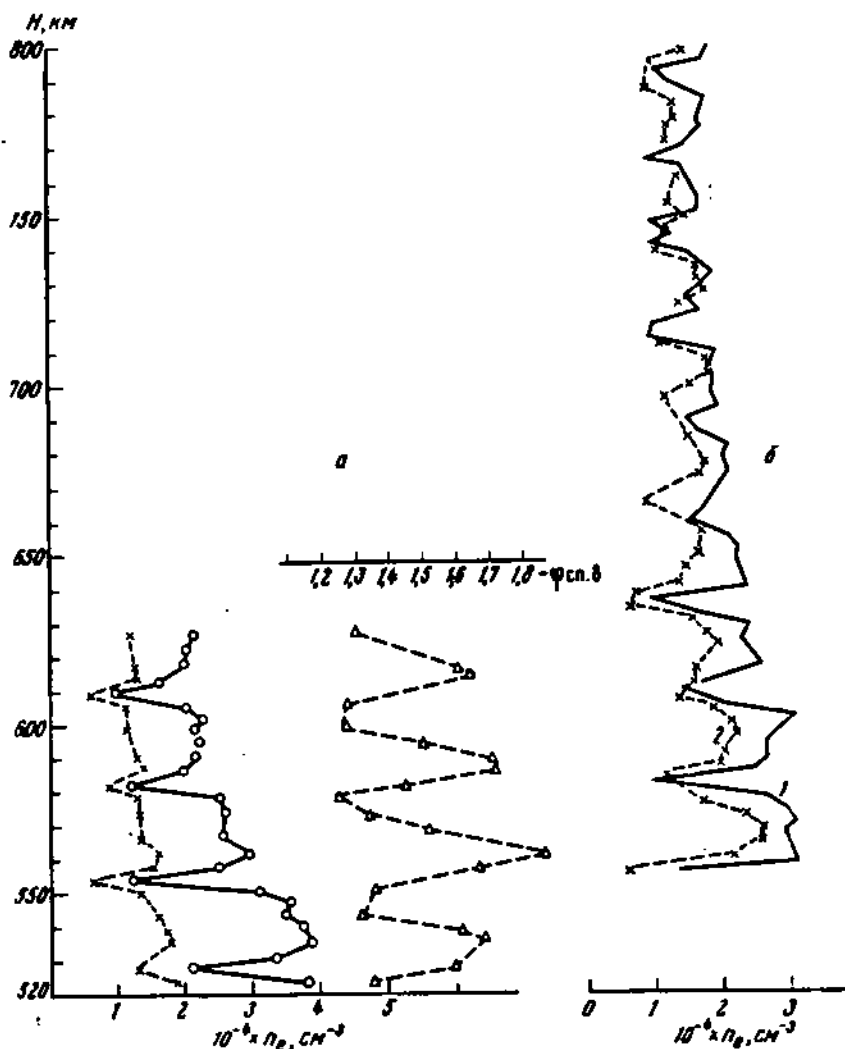


Рис. 1. Концентрация электронов:

a — концентрация электронов n_e и потенциал спутника $\phi_{\text{сп.б}}$; крестики — метод 1 (сравнение экспериментальной и теоретической характеристик электронного тока), кружки — метод 2 (использование зависимости $I \sim V$); *б* — концентрация электронов по показаниям двух взаимно перпендикулярных зондов: 1 — зонд 1; 2 — зонд 2, вбито 14.I 1970 г., время 05^h36^m54^s — 06^h05^m31^s.

Для того чтобы при определении температуры электронов по значениям зондового тока ослабить влияние составляющей южного тока, брались величины зондового тока только начиная с некоторого его значения, где вклад составляющей южного тока был мал. Вычисления T_e проводились на ЭЦВМ. Машина выдавала кроме величин 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. 1, *a*, на котором показаны также значения потенциала спутника, определенные из зондовой характеристики.

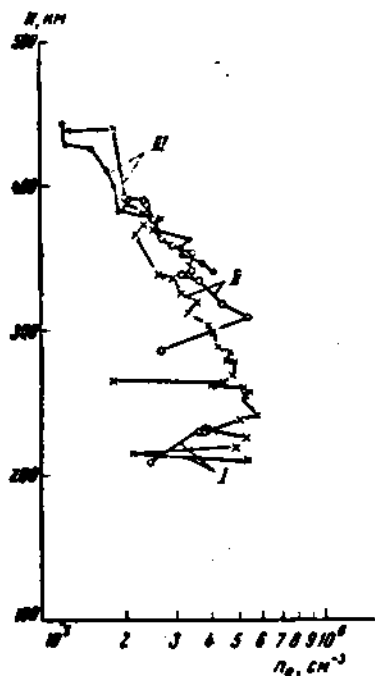


Рис. 2

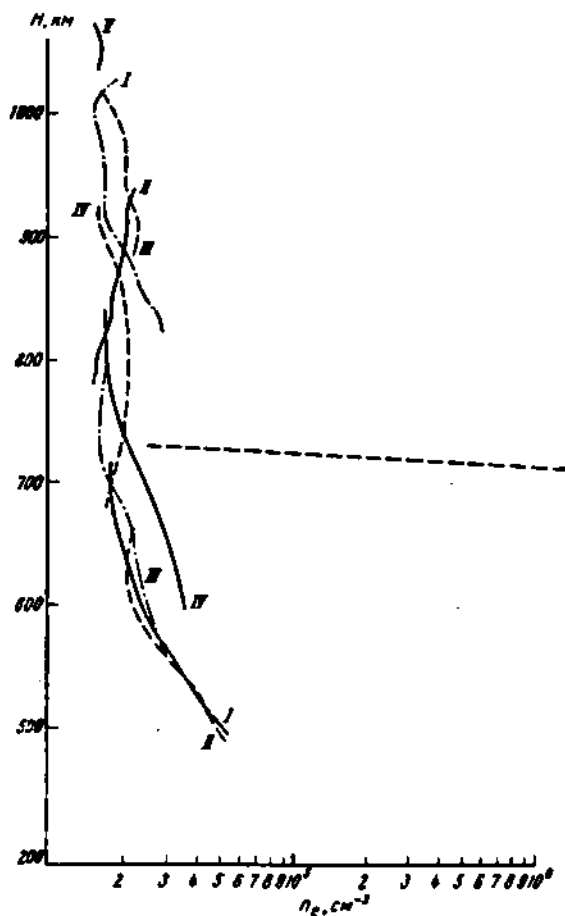


Рис. 3

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. 1, б приведены результаты измерения различными зондами. Как видно из рис. 1, б и из рис. 2, 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.

Таблица 1

Дневное время

Кривая	Высот	Число	Время (моск. время)	Широта	Долгота
I	56	29.XII 1969 г.	07 ^h 19 ^m 23 ^s —07 ^h 24 ^m 19 ^s	48°—45°	+105°—+136°
II	73	30.XII 1969 г.	11 07 53 —11 13 16	44—48	+16 — +46
III	145	04.I 1970 г.	09 07 24 —09 11 24	47—48	+32 — +55

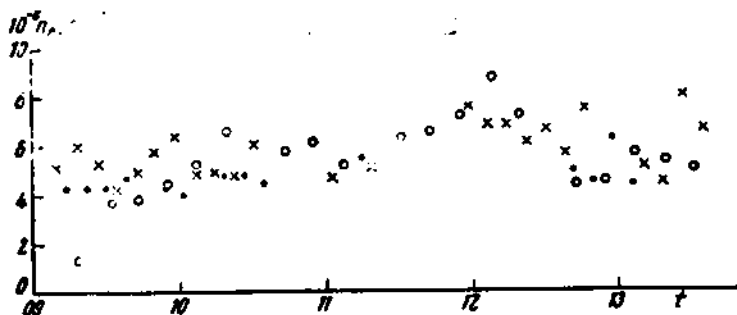


Рис. 4. Концентрация заряженных частиц при измерениях зондами Ленгмюра и сферической ионной ловушкой:

Точки — зонд 1; крестики — зонд 2, кружки — ионная ловушка

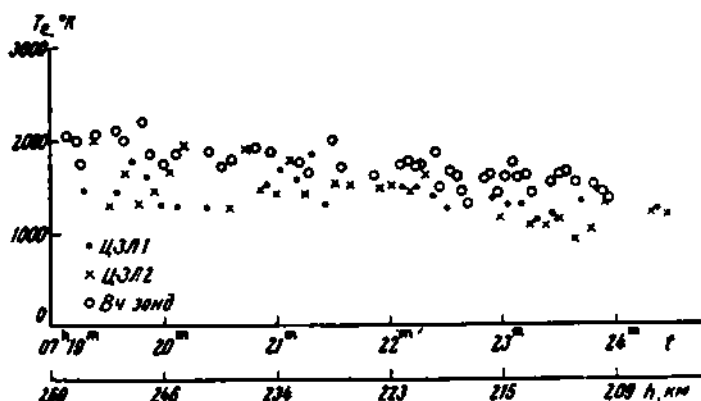


Рис. 5. Температура электронов T_e при измерениях зондами Ленгмюра и высокочастотным зондом:

Точки — зонд 1, крестики — зонд 2, кружки — вч. зонд. Виток 56-я 29.XII 1969 г. Широта $48^\circ - 45^\circ$, долгота $+99^\circ - +130^\circ$

На рис. 2 приведены результаты измерения концентрации электронов в дневное время на высотах 260—460 км (см. табл. 1).

На рис. 3 приведены результаты измерения концентрации электронов на высотах 500—1000 км (см. табл. 2 и 3).

Как видно из рис. 3, б 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. 3, а следует, что в утреннее время (после восхода Солнца) граница перехода от тяжелых ионов (O^+) к легким проходит значительно выше, чем ночью.

На рис. 4 приведены результаты измерения концентрации заряженных частиц по данным зондов Ленгмюра и сферической ионной ловушки.

Таблица 2

Утреннее время

Кривая	Виток	Число	Время (моск. время)	Широта	Долгота
I	261	12.1 1970 г.	06 ^h 39 ^m 26 ^s —06 ^h 47 ^m 29 ^s	46°—58°—46°	+18°—+60°
II	276	13.1	07 10 55 — 07 17 28	48—42	+24 — +55
III	290	14.1	05 56 54 — 06 05 31	45—48—48	+16 — +61
IV	408	22.1	06 08 46 — 06 17 36	47—33	+61 — +43

Ночное время

Кривая	Высот	Число	Время (московское)	Широта	Долгота
I	406	22.I 1970 г.	02 ^h 43 ^m 40 ^s —02 ^h 51 ^m 48 ^s	43°—48°	+9°—+48°
II	289	14.I	04 13 24—04 22 45	37—48	+20—+58
III	421	23.I	03 07 52—03 17 52	46—38	+5—+49
IV	422	23.I	04 50 32—05 00 56	46—48—46	+7—+54
V	492	27.I	22 14 28—22 24 54	32—47	+21—+56

Из рис. 4 следует, что значения концентрации, определенные различными методами, практически совпадают. На рис. 5 приведены результаты измерений температуры электронов зондами Ленгмюра и высокочастотным зондом. Из рисунка можно заключить, что характер зарегистрированных изменений температуры различными методами совпадает, хотя значения температуры отличаются в дневное время на $\sim 500^\circ$.

Дата поступления
14 апреля 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, К. Б. Серафимов, К. Х. Шмеловский, Я. Шмилауэр. Космич. исслед., 11, вып. 1, 95, 1973.
2. Г. Л. Гдалевич. Сб. «Ионосферные исследования», № 18, М., «Наука», 1969, стр. 95.
3. В. В. Афонин, Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич, Б. Н. Горожанкин, К. И. Грингауз, Р. Е. Рыбчинский, Н. М. Шютте. Сб. «Исследования космического пространства», М., «Наука», 1965, стр. 151.
4. L. H. Brace, N. W. Spencer, A. Dalgarno. Planet. Space Sci., 13, 647, 1965.
5. L. H. Brace, V. M. Reddy. J. Geophys. Res., 70, 5783, 1965.
6. Г. Л. Гдалевич, Б. Н. Горожанкин, Д. Самарджиев, К. Б. Серафимов, И. Кутнев. Космич. исслед., 11, вып. 2, 245, 1973.
7. В. В. Афонин, Г. Л. Гдалевич, К. И. Грингауз, Я. Кайнарлова, Я. Шмилауэр. Космич. исслед., 11, вып. 254, 1973.
8. L. A. Smith. COSPAR Information Bulletin, No. 17, 1964.
9. В. Л. Грабовский. Электрический ток в газе. М., 1952.