

012000/68ил
А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

ИСКУССТВЕННЫЕ СПУТНИКИ ЗЕМЛИ

Выпуск 12

2 соавтора - автор дис. Фарашич

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р

ИСКУССТВЕННЫЕ
СПУТНИКИ
ЗЕМЛИ

Выпуск 12

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР

Москва 1962

В настоящем выпуске сборника публикуются экспериментальные данные по исследованию излучений в космическом пространстве, полученные при полетах второго и третьего советских кораблей-спутников. Значительная часть работ посвящена дозиметрии в космическом пространстве и исследованиям ряда вопросов космической биологии и медицины.

Ответственный редактор
Л. В. КУРНОСОВА

К. И. Грингауз

**СТРОЕНИЕ ПОНИЖЕННОЙ ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ
ПО ДАННЫМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
ЛОКАЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ,
ПРОВЕДЕННЫХ В СССР ***

На протяжении последних трех лет в Советском Союзе проводились измерения локальных концентраций электронов и ионов во внешней ионосфере (над максимумом ионизации области F) при вертикальных пусках геофизических ракет Академии наук СССР, на третьем искусственном спутнике Земли и на первой, второй и третьей космических ракетах.

Говоря об измерениях «локальных» концентраций, мы имеем в виду измерения, состоящие из ряда определений концентрации заряженных частиц, каждое из которых относится к достаточно точно известной высоте, не требует каких-либо заранее предполагаемых (или подбираемых) законов изменения концентрации заряженных частиц по высоте или по горизонтالي, не использует измерений ионосферных станций, а также не является результатом статистической обработки ряда каких-либо неодновременных измерений; иначе говоря, каждое определение концентрации вполне локализовано в пространстве и во времени.

Совокупность результатов указанных экспериментов позволяет построить примерную картину распределения по высоте заряженных частиц в пониженной газовой оболочке Земли, определить границу этой оболочки, а также сделать некоторые заключения о степени ее изменчивости на разных высотах.

**1. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ, ПРОВЕДЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ РАДИОВОЛН,
ИЗУЧАВШИХСЯ С ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТ**

На запускаемых почти вертикально до высот 450—470 км геофизических ракетах АН СССР устанавливалось по 3 передатчика когерентных радиоволн с частотами 24, 48 и 144 *Мгц*. При приеме этих радиоволн в нескольких пунктах на поверхности Земли (в том числе вблизи проекции вершины траектории ракеты) производятся определения концентрации свободных электронов на различных высотах, причем используются два метода. Один из них основан на определении дисперсии радиоволн (попарно на частотах 144—48 и 144—24 *Мгц*), а другой — на наблюдениях эффекта Фарадея.

Для определения распределения по высоте концентрации свободных электронов по наблюдениям вращения плоскости поляризации радиоволн достаточно вести эти наблюдения над радиоволнами одной частоты, так как

* Доклад, прочитанный на Международном симпозиуме по исследованию космического пространства во Флоренции 10—14 апреля 1961 г.

используемые ракеты полностью стабилизированы на участке свободного полета (т. е. три взаимноперпендикулярные оси, жестко связанные с ракетой, во время полета не меняют своей ориентации относительно системы координат, связанной с Землей). Поэтому трудности, связанные с отделением эффекта Фарадея от действия вращения излучающих антенн, отсутствуют, и измерение поворота плоскости поляризации радиоволн любой из излучаемых частот при прохождении ракетой некоторого интервала высот позволяет определить среднюю электронную концентрацию на этом интервале. Подробное описание применяемой в этих опытах аппаратуры опубликовано в [1].

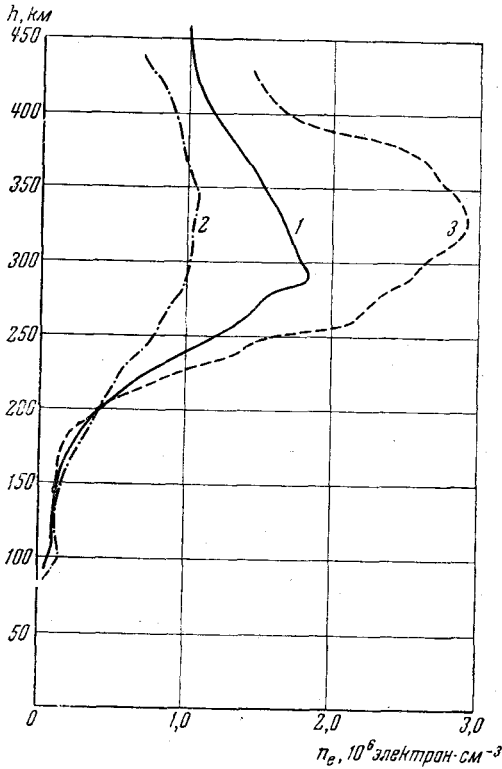


Рис. 1. Кривые зависимости электронной плотности от высоты, полученные дисперсионным методом:

1 — 21 февраля 1958 г., 11 ч. 40 м.; 2 — 27 августа 1958 г., 8 ч. 06 м.; 3 — 31 октября 1958 г., 15 ч. 54 м.

лись с помощью одинаковой аппаратуры, по одной и той же методике. Во время каждого пуска производилось радиозондирование ионосферы с Земли с помощью ионосферной станции, расположенной около места старта ракет. Во всех случаях максимальные электронные концентрации, измеренные при пуске ракет, хорошо соответствовали критическим частотам слоя F .

На рис. 1 приведены три распределения электронной концентрации по высоте, полученные во время указанных пусков ракет по измерениям дисперсии радиоволн. Местное время старта каждой из ракет таково: 21 февраля — 11 ч. 40 м.; 27 августа — 8 ч. 06 м.; 31 октября — 15 ч. 54 м.

Одновременно с измерениями дисперсии радиоволн во всех случаях регистрировались повороты плоскости поляризации радиоволн. На рис. 2 для сопоставления результатов, получаемых по фазовым измерениям дисперсии радиоволн и по измерениям эффекта Фарадея, даны зависимости электронной концентрации от высоты, полученные 27 августа 1958 г.

Распределение по высоте электронной концентрации, определенное по фазовым измерениям дисперсии радиоволн при пуске геофизической ракеты 21 февраля 1958 г. до высоты 470 км, опубликовано в [2] и доложено на V Генеральной Ассамблее МГГ в Москве в августе 1958 г. Представляет, однако, интерес сопоставление результатов, полученных 21 февраля 1958 г., с результатами, полученными во время пусков двух таких же ракет 27 августа и 31 октября 1958 г. Все три ракеты были запущены над одним и тем же геофизическим пунктом (в средних широтах Европейской части СССР); измерения электронной концентрации проводились с помощью одинаковой аппаратуры, по одной и той же методике.

по измерениям вращения плоскости поляризации радиоволн с частотой $f=48\text{ МГц}$ и по фазовым измерениям (пунктирная кривая). Длины вертикальных отрезков соответствуют интервалам высот, при прохождении которых плоскость поляризации радиоволн поворачивается на угол $\theta = \pi$.

Рис. 1 наглядно показывает, что вертикальные градиенты электронной концентрации в области внешней ионосферы, лежащей непосредственно над максимумом ионизации слоя F , сильнее всего меняются в зависимости от времени суток и года.

Для характеристики изменчивости ионосферы в этой области в табл. 1 приведены величины

n_e, \max , $\frac{|\Delta n_e|}{n_e, \max}$ (здесь

$\Delta n_e = n_e, \max - n_e(h_{\max} + 100)$, где h_{\max} — высота в км максимума электронной концентрации) и

$\overline{\text{grad } n_e} = \frac{|\Delta n_e|}{100}$, т. е.

выраженная в $\text{см}^{-3} \cdot \text{км}^{-1}$ величина среднего градиента n_e на протяжении 100 км над максимумом n_e .

В пределах настоящего доклада нет возможности останавливаться на вопросах, связанных с погрешностями наших измерений, основанных на наблюдениях радиоволн, излучаемых с высотных ракет. Эти вопросы рассмотрены в статьях [1] и [3]. Отметим лишь, что близость траектории ракеты к вертикали является важнейшим обстоятельством, в связи с которым при обработке результатов измерений не нужно делать предположений о величинах горизонтальных градиентов n_e и учитывать рефракцию.

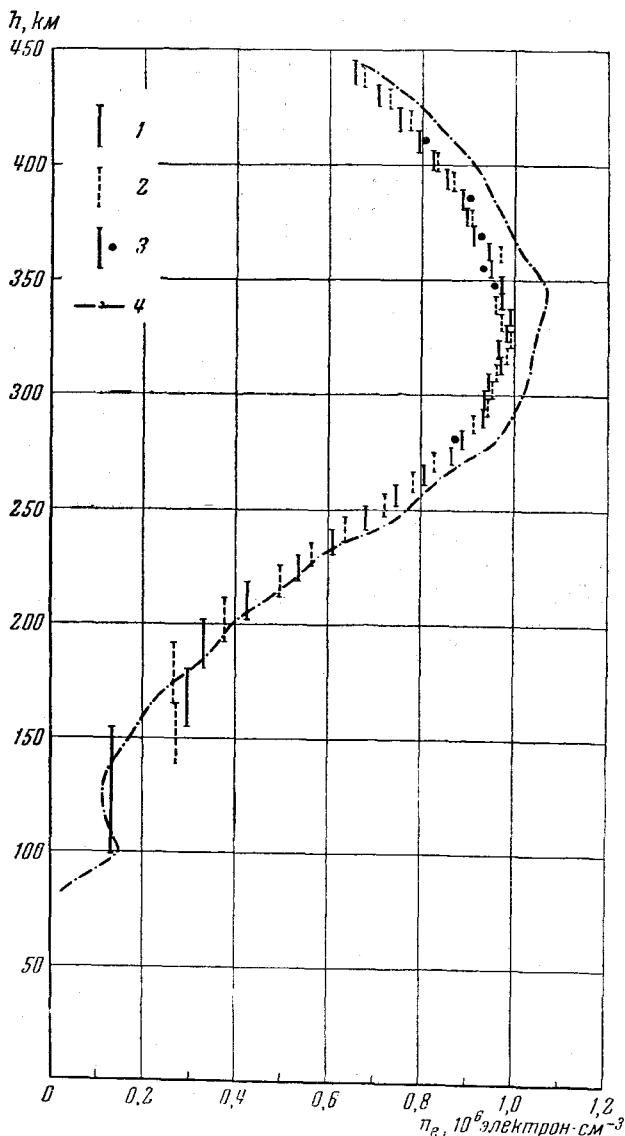


Рис. 2. Зависимость n_e от высоты, найденная по измерениям эффекта Фарадея 27 августа 1958 г.:

1 — по совпадающим данным двух пунктов; 2 — по данным третьего пункта; 3 — совпадающие значения в трех пунктах; 4 — кривая, приведенная на рис. 1

Таблица 1

Дата	Время (моск.)		n_0, max 10^8 см^{-3}	$\frac{ \Delta n_0 }{n_0, \text{max}}$	$ \overline{\text{град } n_0} $ $10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{км}^{-1}$
	час.	мин.			
21 февраля	11	40	1,83	0,126	2,3
27 августа	8	06	1,08	0,134	1,45
31 августа	15	54	2,92	0,161	4,7

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ИОНОВ n_0 МЕТОДОМ СФЕРИЧЕСКИХ ИОННЫХ ЛОВУШЕК НА ТРЕТЬЕМ ИСКУССТВЕННОМ СПУТНИКЕ ЗЕМЛИ

Опыты по измерению концентрации положительных ионов вдоль орбиты третьего ИСЗ проводились в период с 15 мая по 3 июня 1958 г. Все используемые далее данные, относящиеся к этим опытам, получены в дневные часы (от 5 до 17 час. московского времени) из области ионосферы с высотами до 1000 км, лежащей над частью поверхности Земли, ограниченной координатами от 30 до 175° В и от 25 до 65° С.

Описание эксперимента было опубликовано в 1957 г. [4] еще до его проведения и неоднократно воспроизводилось [5, 6], поэтому напомним

лишь, что измерения концентрации положительных ионов осуществлялись путем снятия ионных вольт-амперных характеристик сферических двухэлектродных ионных ловушек, укрепленных на длинных штангах над поверхностью спутника (рис. 3); под ионной вольт-амперной характеристикой понимается зависимость тока в цепи коллектора ловушки от напряжения, подаваемого на сетчатую оболочку ловушки относительно корпуса спутника.

В общей сложности относящаяся к этому опыту телеметрическая информация, полученная во время полета третьего спутника, содержала данные более чем 10 000 ионных вольт-амперных характеристик. Одна из этих характеристик была приведена (по данным предварительной обработки) на Московской Ассамблее МГГ в 1958 г. Она относилась к высоте 795 км и свидетельствовала о существовании на этой высоте концентрации $n_0 \approx 1,8 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$.

Полная обработка всей полученной первичной информации оказалась весьма трудоемкой и заканчивается лишь сейчас. В настоящем докладе мы не имеем возможности обсудить вопросы, связанные с методикой

определения по вольт-амперной характеристике концентрации положительных ионов в невозмущенной ионосфере n_0 , и, в частности, вопрос о влиянии учета тепловых скоростей ионов на результаты обработки. Эти вопросы рассмотрены в статье [6]. Отметим лишь, что основной метод оп-

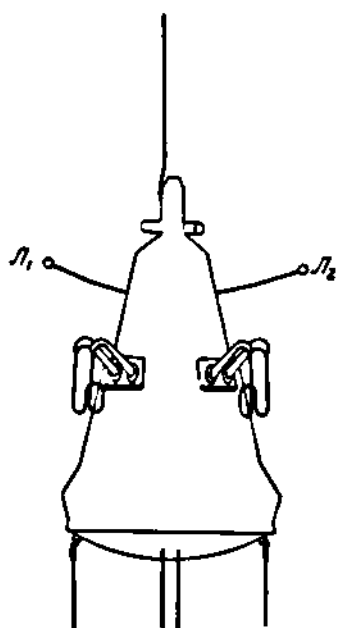


Рис. 3. Расположение ловушек на спутнике:

L_1, L_2 — ловушки

ределения n_i состоит в измерении крутизны линейного участка ионной вольт-амперной характеристики в области торможения положительных ионов и использовании соотношения

$$n_{i0} = \frac{dI_k}{d\varphi} \frac{m_i V_{сп}}{2\alpha S e^2},$$

где $\frac{dI_k}{d\varphi}$ крутизна указанного участка характеристики; $V_{сп}$ — скорость спутника; α — прозрачность сетчатой оболочки; S — площадь поперечного сечения ловушки; e — заряд электрона; m_i — масса иона.

Заметим, что согласно данным ионного масс-спектрометра, установленного на третьем ИСЗ, на высотах от 250 до 1000 км ионы атомарного кислорода составляют не менее 90% общего числа ионов [7].

В ряде случаев было проведено сопоставление величин n_{i0} , определенных по данным ионных ловушек на третьем ИСЗ при его прохождении в области максимума ионизации слоя F , с результатами одновременных измерений критических частот наземными ионосферными станциями, расположенными вблизи трассы спутника. Данные о критических частотах слоя F во время прохождения спутника на высотах около 300 км в северных областях определялись интерполяцией данных ионосферных станций в Мурманске, Салехарде, бухте Тикси и бухте Провидения, а для положения спутника южнее 40°С — экстраполяцией данных ионосферной станции в Ашхабаде (самой южной в СССР) и станций мировой сети.

Некоторые примеры такого сопоставления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Число (май 1958 г.)	Время (моск.)		Координаты спутника			Критическая частота, $f_{кр}$, Мгц	Электронная концентр. (по данным ионосферных станций), 10^6 см^{-3}	Концентр. положительных ионов, n_{i0} , 10^6 см^{-3}
	час.	мин.	высота над Землей, км	северная широта, град	восточная долгота, град			
15	10	12	288	64,5	107,5	7,8	7,5	9,6
18	10	39	356	65,1	114,6	8,3	8,5	7,5
21	9	00	311	27,5	43,9	12,2	18	14

Из приведенных примеров видно, что величина ионной концентрации n_{i0} , определенная по данным ионных ловушек на спутнике, близка (с точностью до 25%) к величине электронной концентрации, определенной по данным одновременных наблюдений ионосферы ионосферными станциями в том же географическом районе. Так как с помощью ловушек определяются локальные концентрации, а по данным ионосферных станций — средние концентрации в большой области ионосферы (которая определяется первой зоной Френеля для длины волны, соответствующей $f_{кр}$), то согласно результатам можно считать удовлетворительным.

Из этого можно сделать следующие выводы.

1. Отрицательные ионы в области F ионосферы, если и присутствуют, то лишь в незначительных количествах (так как измеренные электронные концентрации примерно равны концентрациям положительных ионов).

2. Ионизация нейтральных частиц воздуха вследствие движения спутника не оказывает заметного влияния на результаты измерений n_i с помощью ионных ловушек.

Отсутствие значительных количеств отрицательных ионов во внешней ионосфере дает основание считать, что измеренные значения концентрации

положительных ионов могут одновременно рассматриваться как значения электронной концентрации.

В результате обработки первичных экспериментальных данных получено значительное число распределений концентрации положительных ионов вдоль участков орбиты спутника, проходивших в указанной ранее области ионосферы. Так как вертикальная скорость спутника существенно меньше горизонтальной, то из полученных распределений концентрации положительных ионов вдоль участков орбиты спутника не удается выделить высотную зависимость в чистом виде. Результаты, полученные вблизи перигея, где вертикальная скорость спутника особенно мала, свидетельствуют о существовании значительных горизонтальных градиентов концентрации заряженных частиц. Однако, несмотря на наличие горизонтальных вариаций n_i , изображение результатов измерений в системе координат (h, n_i) , где h — высота над Землей, безусловно, представляет интерес. Хотя на высотный ход наложены существенные горизонтальные вариации, такие графики все же должны (при некотором сглаживании их) правильно отражать высотный ход n_i , так как при изменениях высоты на сотни километров концентрация n_i меняется на порядок, тогда как вариации по горизонтали существенно меньше. Небольшие же вариации n_i по высоте отделить от вариаций по горизонтали при измерениях ловушками на спутнике невозможно.

На рис. 4 приведены образцы изменения концентрации положительных ионов n_i с высотой, относящиеся к части 5-го оборота третьего ИСЗ

Таблица 3*

Интервал высот, км	Дата (1958 г.)	Время (моск.)		Номер оборота	$n_i(h_0)$, 10^5 см^{-3}	$\frac{ \Delta n_i }{n_i(h_0)}$	$ \text{grad } n_i $, $10^3 \text{ см}^{-3} \cdot \text{км}^{-1}$
		час.	мин.				
500÷600	20 мая	8	30	68	5,9	0,15	0,88
	31 мая	5	30	216	4	0,45	1,8
	3 июня	5	00	256	2	0,3	0,6
600÷700	15 мая	17	00	5	2,5	0,27	0,68
	18 мая	10	30	42	2,6	0,32	0,83
	19 мая	11	00	56	4,2	0,33	1,39

* Значения в последнем столбце табл. 3 несколько отличаются от приведенных в трудах симпозиума [Space Research, v. II, North-Holl. Publ. Co, Amsterdam, 1961, p. 582], где по вине автора были допущены неточности.

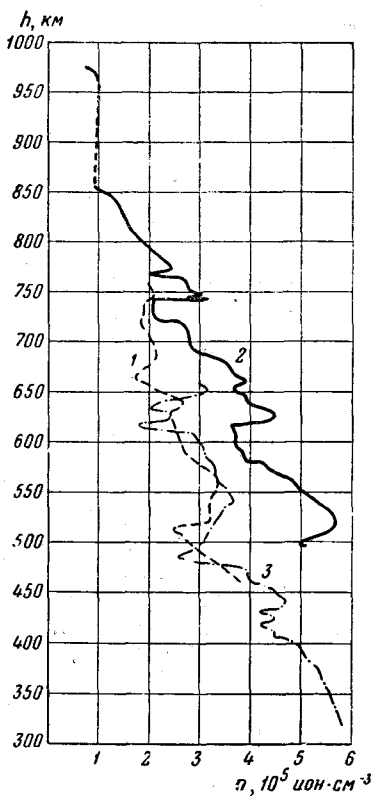


Рис. 4. Распределение концентрации положительных ионов по высоте:

- 1 — виток 5 (15.V 1958 г.; 17 ч.);
 2 — виток 56 (19.V 1958 г.; 11 ч.);
 3 — виток 68 (20.V. 1958 г.; 9 ч.)

вокруг Земли (15 мая 17 ч., график 1), к части 56-го оборота спутника (19 мая 11 ч., график 2) и к части 68-го оборота (20 мая 9 ч., график 3). Ряд других графиков $n_i(h)$, относящихся к разным высотам и различным оборотам спутника вокруг Земли, опубликованы в [6], часть материалов подготовлена к опубликованию.

Для характеристики степени изменчивости ионосферы на высотах более 500 км приводится табл. 3, в которой для двух интервалов высот (от $h_0 = 500$ км до $h_0 + \Delta h = 600$ км и от $h_0 = 600$ км до $h_0 + \Delta h = 700$ км) приведены следующие величины (определенные по данным, полученным во время различных оборотов спутника).

1. $n_i(h_0)$ — ионная концентрация на высоте h_0 .

2. Относительное убывание n_i при увеличении высоты на 100 км, т. е.

$$\frac{\Delta n_i}{n_i(h_0)} = \frac{n_i(h_0) - n_i(h_0 + \Delta h)}{n_i(h_0)}.$$

3. Среднее значение градиента ионной концентрации при увеличении высоты на 100 км, выраженное в $\text{см}^{-3} \text{км}^{-1}$, т. е.

$$|\text{grad } n_i| = \frac{n_i(h_0) - n_i(h_0 + \Delta h)}{100}.$$

3. ДАННЫЕ О КОНЦЕНТРАЦИИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПЕРИФЕРИЙНОЙ ЧАСТИ ИОНИЗОВАННОЙ ГАЗОВОЙ ОБОЛОЧКИ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ОПЫТОВ С ЛОВУШКАМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ НА СОВЕТСКИХ КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТАХ

Коллекторный ток каждой ионной ловушки, установленной на третьем спутнике, являлся суммой двух компонент: I_i , создаваемой атмосферными «тепловыми» ионами, и I_0 , определяемой воздействием на коллектор солнечного ультрафиолетового излучения и энергичных заряженных частиц. По мере уменьшения концентрации ионов (с увеличением высоты) отношение $\frac{I_i}{I_0}$ должно падать и определение n_i будет становиться затруднительным, а при достаточно малых I_i определение n_i может стать невозможным.

Поэтому для измерения малых ионных концентраций (например, $n_i < 10^3 \text{ см}^{-3}$) возникает необходимость изменить конструкцию ловушки: ввести третий электрод — дополнительную сетку, устанавливаемую между коллектором и внешней сеткой. На эту дополнительную сетку подается относительно коллектора достаточно большой отрицательный потенциал, создающий электрическое поле, которое подавляет фотоэлектронную эмиссию и вторичную эмиссию электронов с коллектора, возникающую под действием энергичных заряженных частиц.

Ловушки такой конструкции были установлены на советских космических ракетах и позволили зарегистрировать малые токи, создаваемые потоками различных заряженных частиц на разных участках траекторий этих ракет, в том числе токи, создаваемые положительными ионами ионизованной газовой оболочки Земли.

В настоящем докладе будет идти речь только о той части результатов опытов с трехэлектродными ловушками, которые получены в непосредственной близости от Земли ($h < 4R_E$); результаты, полученные на больших удалениях от Земли, будут изложены в отдельном докладе.

Так как статистические наиболее ценные результаты опытов с трехэлектродными ловушками на приземном участке траектории были получены во время полета второй космической ракеты, запущенной на

Луну 12 сентября 1959 г., то далее в основном излагаются данные именно этого опыта, хотя будут также использованы результаты, полученные на первой и третьей советских космических ракетах [8—10].

На поверхности отделившегося от второй космической ракеты сферического контейнера с научной аппаратурой были установлены четыре трехэлектродные ловушки, расположенные по вершинам вписанного в сферу тетраэдра. Каждая ловушка состояла из полусферической внешней никелевой сетки (с радиусом 30 мм), внутри которой находился плоский никелевый коллектор. Между коллектором и внешней сеткой

была расположена плоская вольфрамовая внутренняя сетка (рис. 5). Потенциалы электродов ловушек относительно корпуса контейнера были следующие. Для коллекторов $\varphi_k = (-60) \div (-40)$ в, для внутренних сеток всех ловушек $\varphi_{g2} = -200$ в; внешние сетки четырех ловушек имели потенциалы: $\varphi_{g1} = -10, -5, 0$ и $+15$ в.

Величины электрических токов, создаваемых заряженными частицами, попадающими в ловушки, передавались на Землю через посредство радиотелеметрической системы, которая при использовании усилителей коллекторных токов позволяла регистрировать положительные коллекторные токи I_k от 10^{-10} до $50 \cdot 10^{-10}$ а и отрицательные коллекторные токи от 10^{-10}

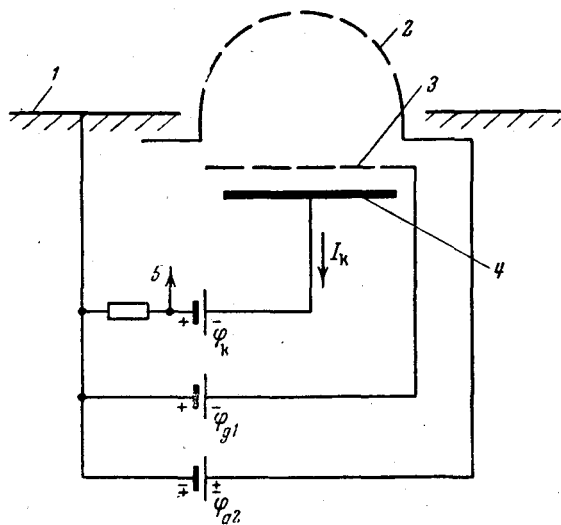


Рис. 5. Схема трехэлектродной ловушки:

- 1 — корпус контейнера; 2 — внешняя сетка;
3 — внутренняя сетка; 4 — коллектор; 5 — к усилителю коллекторного тока

до $15 \cdot 10^{-10}$ а. Мгновенные значения каждого коллекторного тока записывались два раза в минуту.

При ознакомлении с первичными материалами было замечено, что на расстояниях от поверхности Земли меньше $h \sim 20$ тыс. км во всех ловушках (кроме ловушки с тормозящим положительными ионами потенциалом $\varphi_{g2} = +15$ в) наблюдались значительные положительные токи, которые довольно резко падали в районе $h \approx (18 \div 20)$ тыс. км. При этом внутри этой области величины токов каждой ловушки довольно сильно колебались.

На рис. 6 показаны значения коллекторных токов I_k в ловушке с $\varphi_{g2} = -10$ в, а на рис. 7 — значения токов I_k в ловушках с $\varphi_{g2} = 0$ в и $\varphi_{g2} = +15$ в (токи последней ловушки обозначены крестиками). Наблюдаемые колебания токов связаны с тем, что, перемещаясь по траектории, контейнер с научной аппаратурой одновременно совершал сложные быстрые вращательные движения, вызывавшие непрерывные изменения ориентации каждой ловушки относительно вектора скорости и направления на Солнце.

Наибольшие значения токов, по-видимому, соответствуют ориентациям контейнера, близким к оптимальной ориентации для данной ловушки (при которой, очевидно, нормаль к коллектору ловушки совпадает с вектором скорости контейнера, так как при этом поток

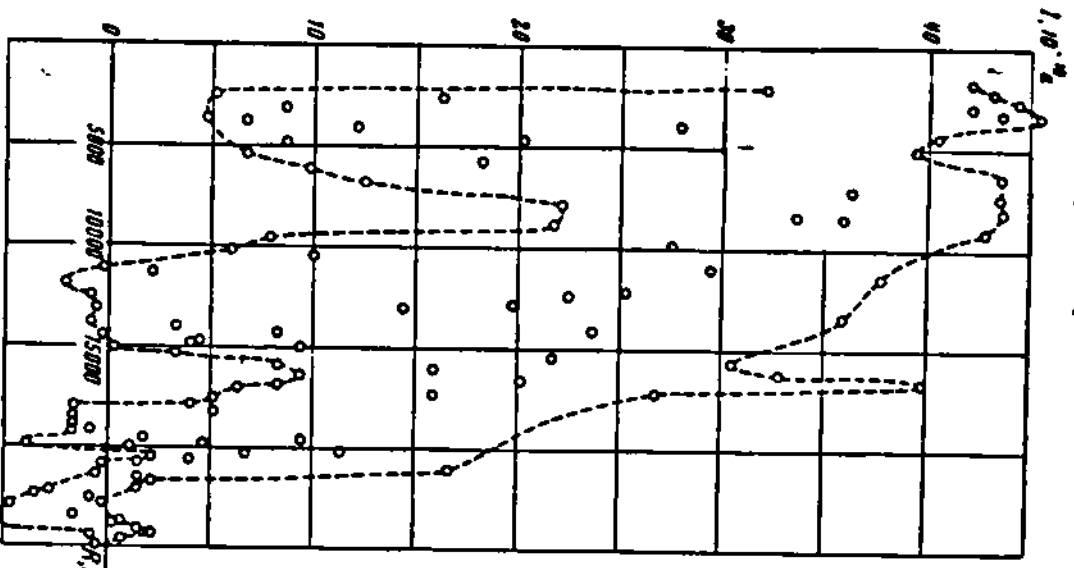


Рис. 6

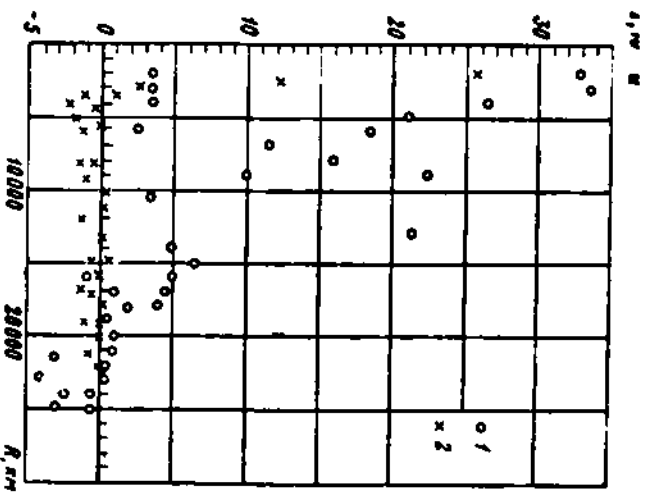


Рис. 7

Рис. 6. Значения коллекторных токов, зарегистрированные в ловушке с $\Phi_{в} = -10 \text{ e}$ на участке $R < 25 \text{ тыс. км}$

Рис. 7. Значения коллекторных токов, зарегистрированные в ловушке с $\Phi_{в} = 0 (1)$ и в ловушке с $\Phi_{в} = +15 \text{ e} (2)$

Рис. 8. Границы значений коллекторных токов на участке $R < 25 \text{ тыс. км}$
 Верхние границы: 1 — при $\Phi_{в} = -10 \text{ e}$; 2 — при $\Phi_{в} = -5 \text{ e}$; 3 — при $\Phi_{в} = 0$; 4 — при $\Phi_{в} = +15 \text{ e}$. Нижние границы: 5 — общий для ловушек с $\Phi_{в} = -10, -5$ и 0 e ; 6 — при $\Phi_{в} = +15 \text{ e}$

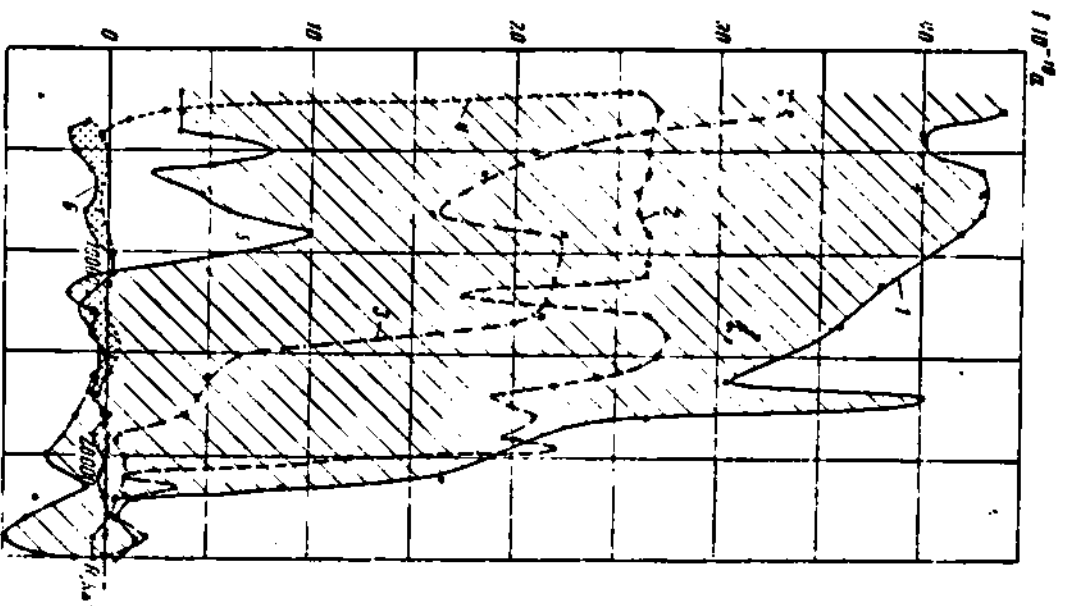


Рис. 8

ионов, попадающих в ловушку, наибольший). Поэтому изменения значений I_k вдоль траектории, зависящие главным образом от окружающей среды, могут быть описаны с помощью кривых, огибающих наибольшие значения I_k ; при этом влияние вращения контейнера на результаты опыта можно в некоторой степени исключить.

На рис. 8 показаны границы коллекторных токов разных ловушек на рассматриваемом участке. Отсутствие подобия в ходе кривых на рис. 8, по-видимому, объясняется особенностями изменений ориентации разных

ловушек относительно вектора скорости контейнера, связанными с их различным расположением на поверхности контейнера, вращавшегося сложным образом.

На рис. 9 изображена верхняя граница коллекторных токов в ловушках с $\varphi_{гг} = -10^\circ$ и 0° , измеренных во время полета контейнера первой советской космической ракеты 2 января 1959 г.

На рис. 10 показаны коллекторные токи, измеренные в ловушках с $\varphi_{гг} = -10^\circ$ и $+25^\circ$ при полете третьей советской космической ракеты 4 октября 1959 г. В этом случае вблизи Земли измерения проведены лишь до расстояния $h \approx 7000$ км, на котором был прекращен первый сеанс радиосвязи с автоматической межпланетной станцией.

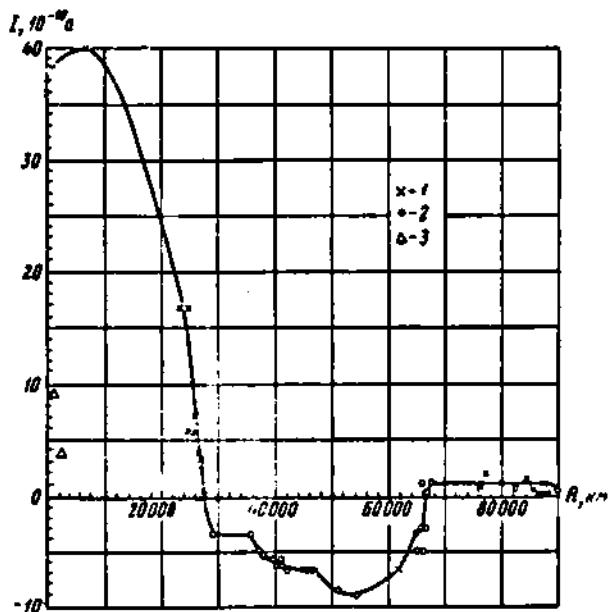


Рис. 9. Верхняя граница коллекторных токов в ловушках с $\varphi_{гг} = -10^\circ$ и с $\varphi_{гг} = 0^\circ$, установленных на первой космической ракете (2 января 1959 г.):

1 — ловушка с $\varphi_{гг} = -10^\circ$; 2 — с $\varphi_{гг} = 0^\circ$; 3 — с $\varphi_{гг} = +15^\circ$

Интересно отметить, что во всех трех указанных опытах на высотах примерно до 2000 км в ловушках с $\varphi_{гг} = +15^\circ$ систематически наблюдались заметные положительные токи, природа которых неясна.

На высотах $h > 2000$ км во всех случаях в ловушках, на внешних сетках которых имелся тормозящий положительный потенциал, вблизи Земли наблюдались только отрицательные токи, вызываемые фотозмиссией электронов с внутренней сетки.

Рассмотрение приведенных экспериментальных данных показывает, что на расстоянии от поверхности Земли примерно до четырех земных радиусов обнаружен ионизованный газ с температурой, по порядку величины не превышающей 10^4 °К. Это следует из отчетливо видного на рисунках, относящихся к полету второй космической ракеты, существенно-го влияния на величины коллекторных токов сравнительно небольших (равных 5 в) отличий одного от другого потенциалов внешних сеток ловушек.

Для получения количественных оценок концентрации положительных ионов на том участке траектории второй космической ракеты, где $h < 4R_E$

(R_E — радиус Земли), были использованы величины токов ловушки, у которой внешняя сетка была соединена с корпусом контейнера ($\varphi_{ст} = 0$), при следующих допущениях.

1. Максимальные зарегистрированные значения тока соответствуют оптимальной ориентации ловушки (в указанном выше смысле). Ясно, что это допущение может дать ошибку в определении тока, соответствующего оптимальной ориентации ловушки; в каждом отдельном случае вполне возможно, что зарегистрированный ток меньше соответствующего оптимальному положению ловушки, например, в два раза.

2. При оптимальной ориентации ловушки ток ионов, попадающих в нее, может быть рассчитан как ток на участок бесконечного плоского зонда, движущегося со скоростью движения контейнера V_0 в плазме с максвелловским распределением скоростей ионов, с концентрацией ионов n_i и температурой T_i . Это допущение основано на том, что радиус ловушки мал по сравнению с радиусом контейнера, а поверхность рассматриваемой ловушки (внешняя ее сетка) эквипотенциальна с ближайшей окрестностью поверхности контейнера. К этому можно добавить, что плотность ионного тока на участок поверхности сферы (контейнера), нормальный вектору ее скорости (которая по абсолютной величине превышает тепловую скорость ионов), зависит от потенциала сферы существенно меньше, чем плотность ионного тока на другие участки поверхности.

Соотношения, с помощью которых по измеренным токам определяется ионная концентрация, рассмотрены в [6], и мы не имеем возможности останавливаться на них в настоящем докладе. Отметим лишь, что вблизи Земли скорость контейнера заведомо превышает тепловую скорость ионов, поэтому ток, соответствующий оптимальной ориентации ловушки, должен слабо зависеть от тепловых скоростей, а следовательно, и от масс ионов и их температуры.

Если считать, что в ловушку попадают ионы водорода с температурой $T = 2000$ °К, то по данным, полученным 12 октября 1959 г., можно построить график изменения полной концентрации по высоте, показанный на рис. 11.

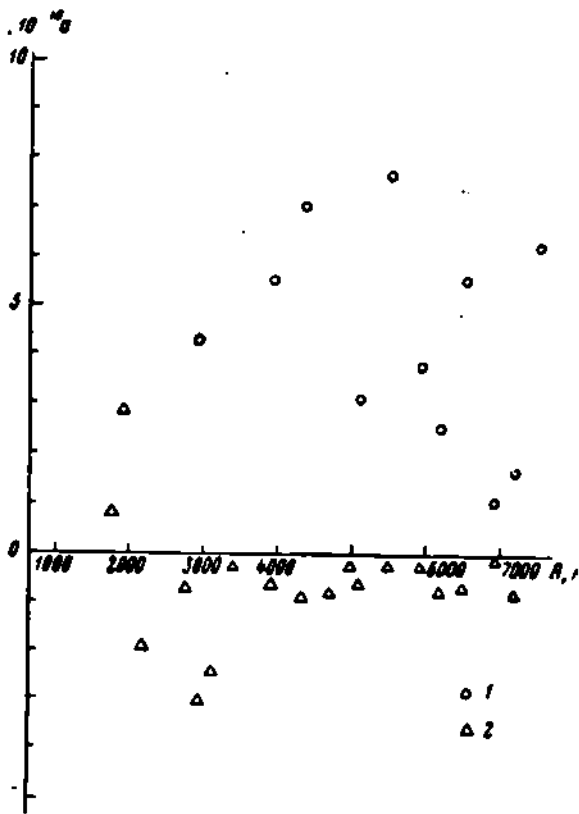


Рис. 10. Коллекторные токи, измеренные в ловушках с $\varphi_{ст} = -10$ в (1) и с $\varphi_{ст} = +25$ в (2), установленных на третьей космической ракете (4 октября 1959 г.)

Зависимость этих результатов от предполагаемой температуры весьма слабая; при $T = 50\ 000\text{ }^\circ\text{K}$ кривая лишь незначительно опускается. Предположение о том, что на рассматриваемых высотах (так же, как и ниже 1000 км) доминируют ионы атомарного кислорода, также мало меняет результаты (область малых градиентов может быть объяснена, если увеличить температуру до $15\ 000\text{ }^\circ\text{K}$). Если построить теоретическое распределение концентрации

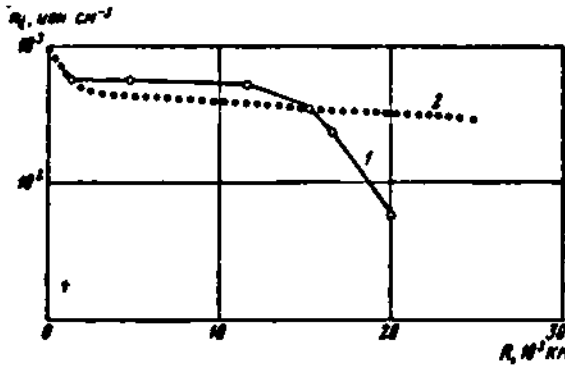


Рис. 11 Распределение по высоте концентрации заряженных частиц (по измерениям 12 октября 1959 г.):

1 — эксперимент; 2 — расчетная кривая

водорода по барометрической формуле с учетом кривизны слоев равной плотности, изображенное черными кружками на рис. 11, то сравнение этих двух кривых показывает, что область, соответствующая $h < 15\ 000\text{ км}$, легко объясняется, тогда как резкое изменение градиентов n_i по высоте в области $h > 15\ 000\text{ км}$ требует специального анализа.

Необходимо подчеркнуть, что существование этой области повышенных

отрицательных градиентов не вызывает сомнений, так как уменьшение коллекторных токов наблюдается в трех ловушках с $\Phi_{\text{от}} < 0$, ориентированных различным образом, и поэтому не может быть объяснено неблагоприятной ориентацией контейнера.

Сопоставление кривых, приведенных на рис. 11, дает основание считать, что начиная с $h \sim 1700\text{ км}$ (минимальная высота, на которой началась регистрация токов в ловушках) до $h \sim (20 \div 22)\text{ тыс. км}$ Земля окружена ионизованным водородом и что, следовательно, на высотах между $h \approx \approx 1000\text{ км}$ и $h \approx 1700\text{ км}$ ионосфера из «кислородной» делается «водородной».

Изложенные опыты показали, что Земля окружена ионизованной газовой оболочкой толщиной до $h \approx 4R_E$ с концентрацией ионов порядка 10^8 см^{-3} , существенно превышающей концентрацию в межпланетной среде. Вопрос об оценке концентрации ионов в межпланетной среде более подробно рассмотрен в [11].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенные в предыдущих разделах результаты экспериментов, проведенных во внешней ионосфере, позволяют построить примерное вертикальное распределение концентрации свободных электронов или (выше максимума области F) численно равной ей концентрации положительных ионов в газовой оболочке Земли, основанное полностью на экспериментальных данных. Так как такое распределение (рис. 12) основано на измерениях, проведенных за время с февраля 1958 г. по сентябрь 1959 г., то оно, естественно, отражает состояние ионосферы в период, близкий к максимуму солнечной активности.

При построении нижней части графика использованы данные одного из вертикальных пусков геофизических ракет (21 февраля 1958 г.), средняя часть (с $h = 500\text{ км}$ до $h = 1000\text{ км}$) построена по данным измерений на части орбиты третьего ИСЗ во время его 56-го оборота вокруг Земли;

часть графика с $h = 1400$ км до $h \approx 20\,000$ км построена по данным измерений на второй советской космической ракете. Вблизи кривой нанесены некоторые точки, полученные при измерениях, проведенных на указанных высотах в различное время (на других геофизических ракетах или на других оборотах третьего спутника, на первой и третьей космических ракетах); эти точки в известной степени характеризуют изменчивость ионосферы.

По поводу точек, относящихся к третьей космической ракете, необходимо заметить следующее. На приземном участке траектории были включены две ловушки с потенциалами на внешних сетках соответственно $\Phi_{\text{гг}} = +25$ в и $\Phi_{\text{гг}} = -10$ в. Зарегистрированные токи в ловушке с $\Phi_{\text{гг}} = -10$ в оказались примерно в четыре раза меньше, чем в ловушках с таким же $\Phi_{\text{гг}}$ на контейнерах первой и второй космических ракет. Это

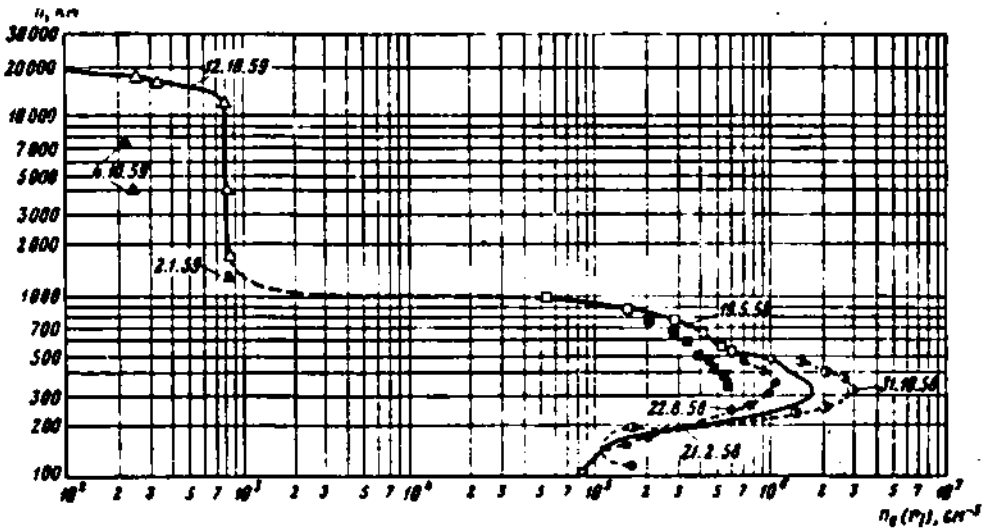


Рис. 12. Примерное распределение по высоте концентрации, заряженных частиц в период, близкий к максимуму солнечной активности

может объясняться уменьшением концентрации ионов на высотах порядка тысяч километров, но вместе с тем нельзя считать исключенным, что повышенные значения тока объясняются неблагоприятной ориентацией ловушки (проверить это утверждение нельзя, так как не было других ловушек с $\Phi_{\text{гг}} \leq 0$, включенных на этом участке траектории и иначе ориентированных на поверхности контейнера).

Измерения, на основе которых построена верхняя часть графика, были первыми прямыми опытами по изучению периферийной части ионизированной газовой оболочки Земли и представляют собой лишь начало исследования этой области.

В дальнейшем должны быть проведены многократные измерения концентрации ионов в периферийной части газовой оболочки Земли, проверена стабильность ее высоты и зависимость последней от географической широты. Следует надеяться, что подобные измерения позволят всесторонне проверить устойчивость характеристик этой области.

Во времена, когда единственным источником сведений о структуре ионизированной газовой оболочки Земли было радиозондирование с помощью ионосферных станций, были созданы теории образования ионосферы, удовлетворительно объяснявшие имевшиеся тогда экспериментальные данные. Опыты, поставленные с помощью искусственных спутников Земли

и космических ракет, заставляют искать пути для создания новой теории, которая сумеет удовлетворительно объяснить факты, ставшие известными в последнее время. К числу таких фактов, в частности, относится существенное возрастание отрицательных градиентов концентрации, обнаруженное в районе высот 15 000—20 000 км вблизи границы газовой оболочки Земли.

Кроме автора доклада, в числе участвовавших в разработке аппаратуры, проведении опытов с дисперсионным интерферометром и обработке результатов были В. А. Рудаков и А. В. Капорский, в разработке приборов и проведении опытов со сферическими ионными ловушками на третьем спутнике и в обработке результатов опытов — В. В. Безруких и В. Д. Озеров, в разработке методики опытов с трехэлектродными ловушками и приборов для этих опытов, а также в обработке их результатов — В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский. В интерпретации относящейся к настоящему докладу части экспериментальных результатов, полученных с помощью трехэлектродных ловушек на космических ракетах, участвовала группа сотрудников Астрономического института им. Штернберга — И. С. Шкловский, В. Г. Курт и В. И. Мороз.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков, А. В. Капорский. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 33.
2. К. И. Грингауз. Докл. АН СССР, 128, 1234, 1958; сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 1. Изд-во АН СССР, 1958, стр. 62.
3. К. И. Грингауз, В. А. Рудаков. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 48.
4. К. И. Грингауз, М. Х. Зеллиман. УФН, 63, 239, 1957.
5. В. И. Красовский. Proceedings of the IRE, 47, 289, 1959.
6. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 63.
7. В. Г. Истомин. Сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1960, стр. 171.
8. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Докл. АН СССР, 131, 1301, 1960; сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 101.
9. К. И. Грингауз, В. Г. Курт и др. Докл. АН СССР, 132, 1062, 1960; сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 108.
10. К. И. Грингауз, В. Г. Курт и др. Астр. ж., 37, 716, 1960.
11. К. И. Грингауз. Сб. «Искусственные спутники Земли», наст. вып., стр. 119.