

экз. N178

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

ТОМ
VII
ВЫП.
3

МОСКВА • 1965

Предисловие

Настоящий выпуск "Научных трудов" целиком посвящен результатам экспериментов, выполненных в ионосфере при помощи спутника "Космос-2". Из четырех помещенных здесь статей три полностью посвящены описанию указанных экспериментов и их результатов, и лишь в одной ("Ионы гелия в ионосфере"), помимо материалов, непосредственно относящихся к опытам на "Космосе-2", приводится довольно обширный обзор других опубликованных теоретических и экспериментальных работ по рассматриваемой проблеме.

Подобная публикация в одной книге полученных одновременно и взаимно дополняющих друг друга экспериментальных результатов весьма удобна, хотя практически трудно осуществима в журналах.

Можно надеяться, что публикуемые в настоящем выпуске материалы представят интерес не только для специалистов, занимающихся космическими исследованиями, но и для специалистов по распространению радиоволн, так как они содержат, в частности, результаты прямых измерений концентраций заряженных частиц до высот ~ 1500 км.

К.И.Грингауз, Б.Н.Горожанкин, Г.Л.Гдалевич,
Р.Е.Рыбчинский, Н.М.Шютте

ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОВЕДЕННЫЕ В ИОНОСФЕРЕ ПРИ ПОМОЩИ ПРИБОРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА СПУТНИКЕ "КОСМОС-2" *

Указываются задачи физических экспериментов, выполненных на спутнике "Космос-2"; кратко описывается устройство применявшихся приборов и приводятся результаты, относящиеся к исследованиям ионной и электронной компонент ионосферной плазмы (часть которых была выполнена вдоль всей орбиты спутника, включая ее участки, лежащие над южным полушарием Земли). Кроме того, кратко изложены результаты опытов по изучению фотоэмиссии электронов с металлов в верхней атмосфере и по определению ориентации спутника относительно его вектора скорости при помощи системы ионных ловушек. Обсуждаются некоторые вопросы методики измерений.

* В статье частично использованы материалы докладов, представленных на международные конференции:

1) К.И.Грингауз, Б.Н.Горожанкин, Н.М.Шютте, Г.Л.Гдалевич. Препринт доклада, представленного на XIУ Международный астронавтический конгресс. Париж, 1963.

2) К.И.Грингауз, Б.Н.Горожанкин, Г.Л.Гдалевич, В.В.Афонин, Р.Е.Рыбчинский, Н.М.Шютте.

Труды V Международного симпозиума по исследованию космического пространства, Флоренция, 1964 [1].

Некотор
и его

Спутник "Космос-2" на орбиту с наклоном и апогеем ~ 1546 км. системы, работавшей с приемными пунктами, имелась система записи данных ряда измерений, производившихся вблизи радиоприемных пунктов на спутнике экспериментальной ионосферы; другие опыты (к их числу относятся измерения скорости электронов вдоль орбиты с помощью ультрафиолетового излучения в ионосфере). Измерения производились только на тех участках орбиты, на которых имелась приемная система (то есть их результаты).

Электронная компонента плазмы (методом импульсной спектроскопии нескольких десятков лет назад изучалась лишь после взрыва ядерных бомб).

К числу характеристик плазмы можно отнести состав и температуру, благодаря нейтральности плазмы, что, как показывает опыт на спутнике, на высотах практически отсутствующей плазмы можно считать, что

Концентрация ионов в ионосфере, лежащей на высотах ~ 1000 км), впервые измерена на спутнике при помощи спектрометра ионов. Полученные результаты на исследуемом участке орбиты известны до опытов измерений ионной температуры, принимавшихся.

Некоторые сведения о спутнике и его научной аппаратуре

Спутник "Космос-2" был запущен 6 апреля 1962 г. на орбиту с наклоном к экватору 49° , с перигеем ~ 212 км и апогеем ~ 1546 км. На спутнике, помимо телеметрической системы, работавшей при непосредственной радиосвязи с приемными пунктами, расположенными на территории СССР, имелась система запоминания, позволявшая консервировать данные ряда измерений вдоль всей орбиты спутника и воспроизводить полученную информацию при пролете спутника вблизи радиоприемных пунктов. Большинство проведенных на спутнике экспериментов относилось к исследованиям ионосферы; другие опыты были связаны с этими исследованиями (к их числу относятся изучение изменений фотоэмиссии электронов вдоль орбиты спутника, связанных с поглощением ультрафиолетового излучения Солнца в ионосфере). Измерения, относящиеся к части опытов, производились только на тех участках орбиты спутника, на которых имелась непосредственная радиосвязь с Землей (то есть их результаты не запоминались).

Электронная компонента ионосферной плазмы изучается (методом импульсного радиозондирования) в течение нескольких десятков лет, а ионная компонента плазмы стала изучаться лишь после начала полетов ракет и спутников.

К числу характеристик ионной компоненты ионосферной плазмы можно отнести концентрацию ионов n_i , их массовый состав и температуру T_i . Следует иметь в виду, что благодаря нейтральности ионосферной плазмы и благодаря тому, что, как показали опыты на третьем советском спутнике, на высотах более ~ 200 км отрицательные ионы практически отсутствуют, вдоль всей орбиты Космоса-2 можно считать, что $n_i = n_e$.

Концентрация и массовый состав ионов в области ионосферы, лежащей выше максимума слоя F (до высоты ~ 1000 км), впервые были измерены на третьем советском спутнике при помощи ионных ловушек и масс-спектрометра ионов. Полученные результаты относились только к освещенным участкам орбиты спутника [2, 3]. Насколько нам известно, до съездов на "Космосе-2" попыток прямых измерений ионной температуры в ионосфере вообще не предпринималось.

Гдалевич,
ге

ИОНОСФЕРЕ
ЗВЛЕННЫХ
*

сперимен -
:-2"; крат-
тся прибо-
цнеся к ис-
компонент
ла выпол-
чая ее
ем Земли).
ты опытов
металлов
ориента-
скорости
Обсужда -
арений.

териалы докладов,
нции:

Н.М.Шютте,
ленного на XIУ
Париж, 1963.
Г.Л.Гдалевич,

по исследованию
64 [1].

Основными задачами экспериментов, поставленных на "Космос-2", были:

а) исследование областей ионосферы, обследованных на третьем спутнике, во время иной фазы солнечной деятельности (при уменьшении солнечной активности);

б) получение данных, относящихся к не исследованным на третьем спутнике областям ионосферы (выше 1000 км над земной поверхностью) и к ночным и сумеречным условиям;

в) опыт измерения ионной температуры впервые примененным методом сотовых ионных ловушек с весьма узкой диаграммой направленности;

г) изучение зондовыми методами не только ионной компоненты ионосферной плазмы (как на третьем спутнике), но и электронной ее компоненты с целью измерения концентрации и температуры электронов;

д) использование системы плоских ионных ловушек для определения ориентации спутника относительно вектора его скорости.

Кроме того, на спутнике были поставлены уже упоминавшиеся опыты по изучению фотоэмиссии электронов и некоторые опыты, имеющие методологический характер и связанные с уточнением влияния на зондовые измерения ионосферной плазмы ряда факторов, степень воздействия которых на результаты измерений в условиях полета спутника была не вполне ясна (например, влияние особенностей конструкции ионных ловушек и степени их удаления от корпуса спутника).

В соответствии с этими задачами на спутнике "Космос-2" были установлены следующие приборы:

три сферические ионные ловушки (две на штангах длиной 65 см и одна на штанге 25 см);

две полусферические ионные ловушки на поверхности спутника;

восемь плоских ионных ловушек на поверхности контейнера;

три цилиндрических зонда Лэнгмюра;

три анализатора фотоэлектронов;

две ионные ловушки с сотовой насадкой.

Приведем краткие описания этих приборов.

Сферические ионные ловушки. Сферические ионные ловушки предназначены для измерений концентраций положительных ионов вдоль орбиты спутника "Космос-2".

Опыты с этими ловушками сферических опытов со с проведенными на трехэлектродными ловушками ракетах.

Фотография и чертеж приведены на фиг.1 и сферических электронов диаметром 20 мм - положительные ионы, коллектор вольфрамовый коллектором и этой ловушкой 90 в. Электрическая внутренняя сетка обеспечивает эмиссию с коллекторной сеткой тефлон. Третий электрод представляющая собой оболочку из нержавеющей стали которую подается на корпус спутника при помощи

Установка сферических ловушек спутника при помощи получить данные о в спутник, на результата части зондовыми м

Полусферические и чертеж этих ловушек сферической ловушки плоские, а внешняя вторая и третьей со были близки к этой. диаметрально против и соединенные параллельную ловушку с нулевыми их показания могут с плоских ловушек, удаленных электродах такие же

Плоские ионные ловушки показана на ловушка представляющая которого внутренняя сферической ловушек, при

итов, поставленных на
феры, обследованных на
зы солнечной деятель-
тивности);

ся к не исследованным
феры (выше 1000 км над
сумеречным условиям;
ературы впервые приме-
вушек с весьма узкой

и не только ионной
на третьем спутнике),
целью измерения кон-
; их ионных ловушек для
осительно вектора его

поставлены уже упо-
эмиссии электронов
ологический характер
а зондовые измерения
степень воздействия
условиях полета
мер, влияние особен -
и степени их удаления

ачами на спутнике
щие приборы:
(две на штангах длиной
ушки на поверхности
на поверхности контей-
ора;

исадкой.
приборов.
тки. Сферические
измерений концентраций
путника "Космос-2".

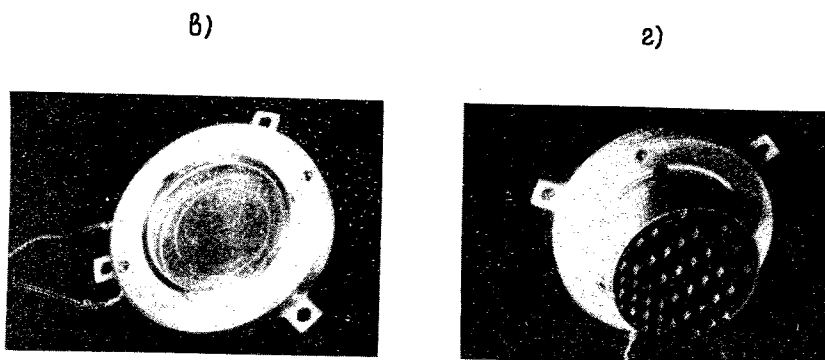
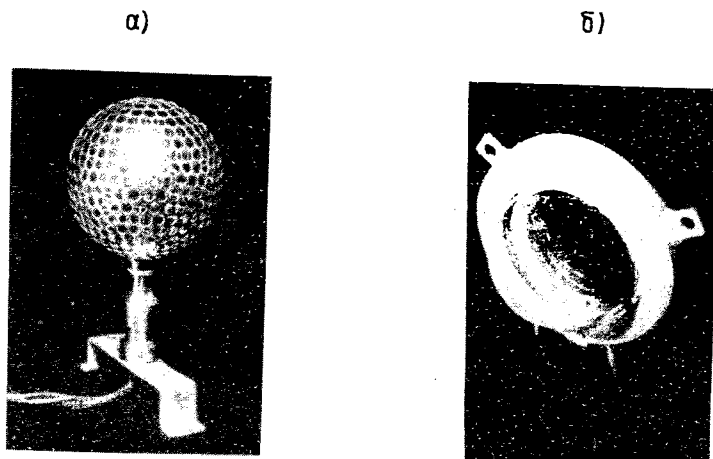
Опыты с этими ловушками являются продолжением ионо-
сферных опытов со сферическими ионными ловушками,
проведенными на третьем советском спутнике, и
трехэлектродными ловушками на советских космических
ракетах.

Фотография и чертеж сферической ионной ловушки
приведены на фиг.1 и 2. Ловушка состоит из трех
сферических электродов. Первый - сплошной электрод
диаметром 20 мм - является коллектором, собирающим
положительные ионы. Второй электрод - окружающая
коллектор вольфрамовая сетка диаметром 26 мм; между
коллектором и этой сеткой создается разность потенциа-
лов 90 в. Электрическое поле между коллектором и
внутренней сеткой подавляет фотоэмиссию и вторичную
эмиссию с коллектора. В качестве изолятора везде применен
тефлон. Третий электрод - внешняя сферическая сетка,
представляющая собой тонкостенную перфорированную
оболочку из нержавеющей стали диаметром 60 мм, на
которую подается напряжение, изменяющееся относительно
корпуса спутника пилообразно от -10 до +15 в.

Установка сферических ловушек над поверхностью
спутника при помощи штанг различной длины позволяет
получить данные о влиянии объемного заряда, окружающего
спутник, на результаты измерений концентрации заряженных
частиц зондовыми методами.

Полусферические ионные ловушки. Фотография
и чертеж этих ловушек приведены на фиг.1 и 3. У полусфе-
рической ловушки коллектор и антифотоэлектронная сетка
плоские, а внешняя сетка - полусферическая. Ловушки на
второй и третьей советских лунных ракетах конструктивно
были близки к этой. Две такие ловушки, установленные в
диаметрально противоположных точках поверхности спутника
и соединенные параллельно, образуют как бы одну сфериче-
скую ловушку с нулевым удалением от поверхности спутника;
их показания могут сопоставляться с показаниями сфериче-
ских ловушек, удаленных от поверхности. Напряжения на
электродах такие же, как и у сферических ловушек.

Плоские ионные ловушки. Фотография плоской
ловушки показана на фиг.1, а чертеж - на фиг.4. Плоская
ловушка представляет собой трехэлектродное устройство, у
которого внутренняя сетка, как у сферической и полусфери-
ческой ловушек, предназначена для подавления фотоэмиссии



Фиг.1. Ионные ловушки, применявшиеся в опытах на спутнике „Космос-2“: а - сферическая; б - полусферическая; в - плоская; г - сотовая

Фиг.2. Частичный разрез
1 - внешняя оболочка
2 - внутренняя оболочка
3 - сетка
4 - опорная конструкция

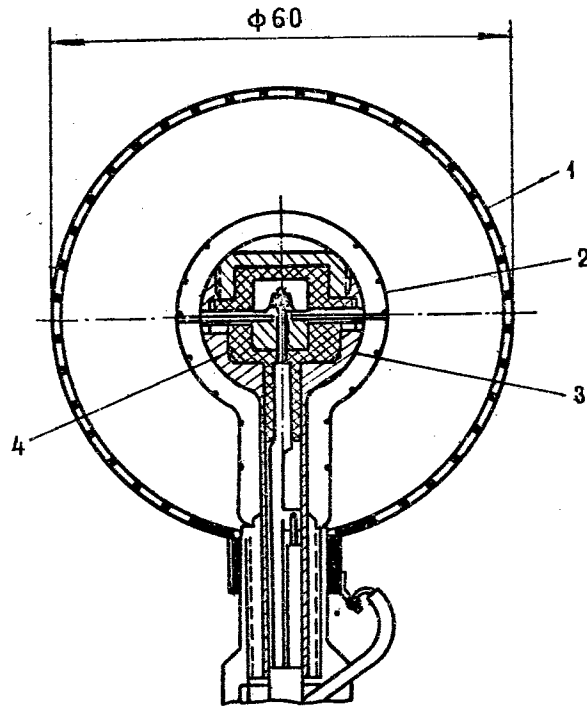
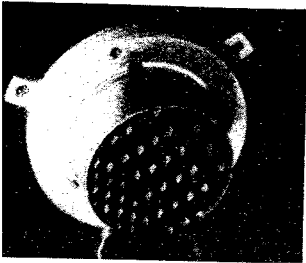
электронов с поверхностью соединена с корпусом. Было установлено, что в ловушках, можно ориентировать спутник по скорости. Для ионов при помощи соотношения, кот ловушек, установлен

Зонды Лэнга изготовлены из нержавеющей стали диаметром 200 мм и для измерения электрического распределения эле

б)



2)

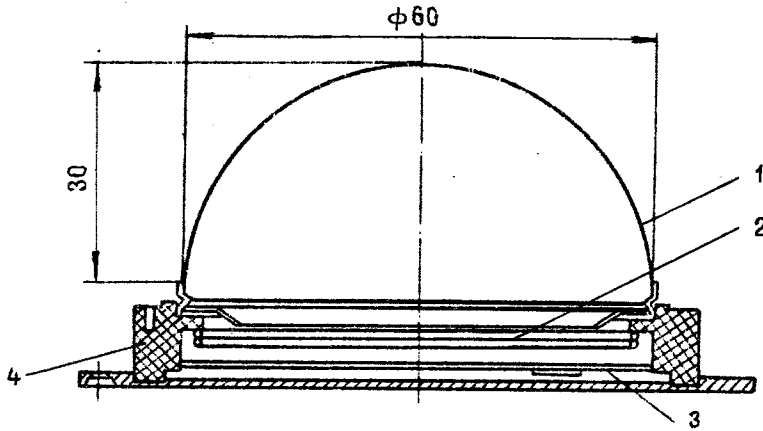


Фиг.2. Чертеж сферической ионной ловушки:
1 - внешняя сетка; 2 - внутренняя сетка;
3 - коллектор; 4 - изолятор

электронов с поверхности коллектора, а наружная сетка соединена с корпусом спутника. На спутнике "Космос-2" было установлено восемь таких плоских ловушек. Анализируя одновременные значения коллекторных токов всех восьми ловушек, можно определить с известной степенью точности ориентацию спутника относительно вектора его поступательной скорости. Для определения концентрации положительных ионов при помощи плоских ловушек можно пользоваться соотношением, которое применяли Бордо, Уиппл и др. для ловушек, установленных на спутнике "Эксплорер-8" [4].

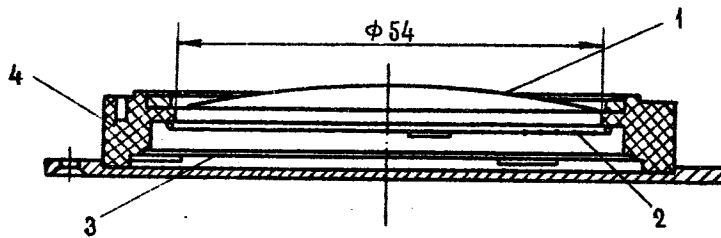
Зонды Лэнгмюра. Три цилиндрических зонда были изготовлены из посеребренной латунной трубки длиной 200 мм и диаметром 10 мм и предназначены для измерения электронной температуры, энергетического распределения электронов и электронной концентрации.

ишеся в опытах
ерическая;
лоская;



Фиг.3. Чертеж полусферической ионной ловушки:
1 - внешняя сетка; 2 - внутренняя сетка;
3 - коллектор; 4 - изолятор

Анализаторы фотоэлектронов. Внешние анализаторы фотоэлектронов не отличались от описанной выше полусферической ловушки (см.фиг.1). Плоский коллектор, являющийся в данном случае фотоэмиттером, сделан из платины*, для которой фотоэлектрический выход в



Фиг.4. Чертеж плоской ионной ловушки:
1 - внешняя сетка; 2 - внутренняя сетка;
3 - коллектор; 4 - изолятор

* С целью сравнения результатов данного эксперимента с поставленными ранее один фотоэмиттер был выполнен из никеля.

далеком ультрафиолетовом диапазоне, внутренняя сетка, на которую подано напряжение, была выведена на потенциал.

В лабораторных условиях для уменьшения влияния внешней сетки практически не использовалась. Разность потенциалов между внешней и внутренней сетками устанавливалась с помощью двойной сетки с шагом 100 В между плоскостями электродов.

Ионные ловушки в данном виде описаны в литературе как "сотовая" ловушка, (см.фиг.1). Она отличается от обычной внешней электродной группы примыкающих электродов, выполненных из никеля. В отличие от плоской ловушки, она имеет место при совмещении ее оси с нормалью к ее коллектору. Это позволяет получить высокую чувствительность по вектору скорости и направлению движения.

Электронный блок питания постоянного тока имел двухшкальные пределы напряжения от -10 до +15 В и время срабатывания 0,75 и 2,0 сек.

На фиг.5 приведен блок, обеспечивавший изменение потенциалов элементов, усиление сигнала в напряжениях, по системе и запоминание

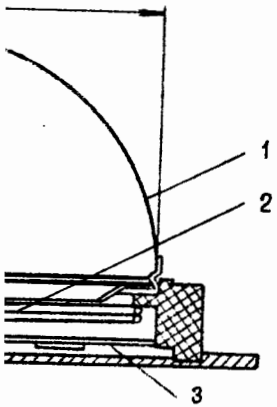
далеком ультрафиолете практически неизменен. Плоская внутренняя сетка, на которую подавалось анализирующее напряжение, была выполнена из вольфрама.

В лабораторных условиях было проверено, что поле внешней сетки практически не оказывает влияния на поле между эмиттером и внутренней сеткой, которое определяется разностью потенциалов между последними. Для этого внутренняя сетка устройства в отличие от внутренней сетки полусферической ловушки была сделана в виде двойной сетки с шагом каждой сетки 0,5 мм и расстоянием между плоскостями витков этих сеток 1 мм.

Ионные ловушки с сотовой насадкой. Последним видом из описываемых здесь ловушек является "сотовая" ловушка, фотография которой приведена на фиг.1. Она отличается от плоской ловушки только конструкцией внешнего электрода, в качестве которого служит группа примыкающих друг к другу шестигранных трубочек, выполненных из никелевой фольги. Как и для простой плоской ловушки, максимальный ток в сотовой ловушке имеет место при совпадении вектора скорости спутника с нормалью к ее коллектору. Однако выбранная конструкция позволяет получить при минимальных габаритах ловушки высокую чувствительность к ориентации ее относительно вектора скорости и определить температуру ионов.

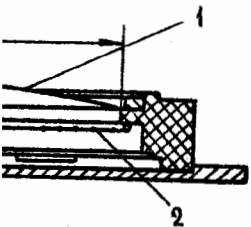
Электронный блок состоял из двадцатиканального усилителя постоянного тока, причем три канала усиления имели двухшкальные выходы, и двух генераторов пилообразного напряжения, выдающих переменные напряжения от -10 до +15 в с длительностями рабочего хода 0,75 и 2,0 сек.

На фиг.5 приводится скелетная схема электронного блока, обеспечивавшего во время опытов необходимые изменения потенциалов на электродах чувствительных элементов, усиление измеряемых токов и преобразование их в напряжения, поступающие на вход телеметрической системы и запоминающего устройства.



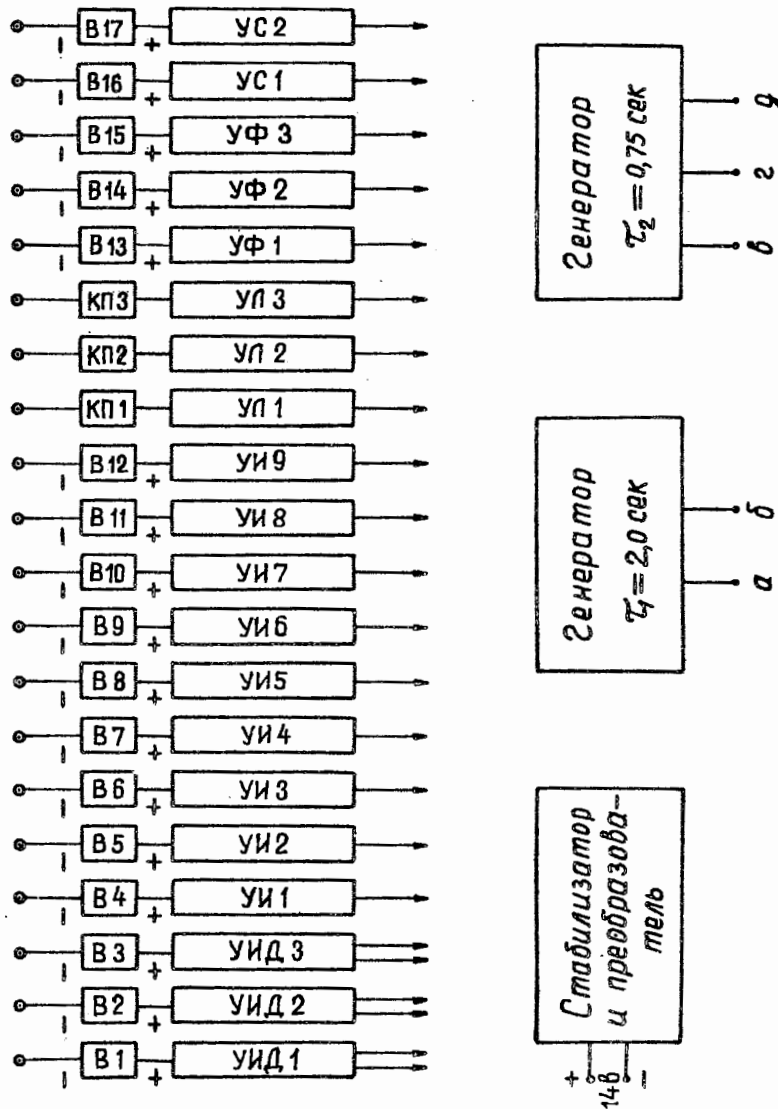
ионной ловушки:
1 - внешняя сетка;
2 - внутренняя сетка;
3 - эмиттер

ионов. Внешне анализировались от описанной выше (фиг.1). Плоский коллектор, изготовленный из вольфрама, сделан электрический выход в



ионной
1 - внешняя сетка;
2 - внутренняя сетка;
3 - изолятор

в данном эксперименте эмиттер был выполнен



Фиг.5. Скелетная схема электронного блока:
 В1-В17 - выпрямители в цепях входов усилителя; КП1-КП3 -
 катодные повторители в цепях зондов Ленгмюра; а - выход
 генератора для подачи пилообразного напряжения на внешние
 сетки сферических и полусферических ионных ловушек;
 б и д - выходы генераторов на телеметрическую систему;
 в - выход, управляющий КП1-КП3; г - выход для подачи
 напряжения на внутренние сетки анализаторов фотоэлектронов

Исследов
 ио

1. Распределение ионов

Локальная концентрация ионов зависит от числа величин, резуплоских ловушек, каждая из которых была разделена на октанты, на которые были нанесены углы между нормальными соседних ловушек соседних ловушек имели потенциал кор

На фиг.6 приведены графики величины γ положительных ионов в оборотах спутника в плоских ловушках. М измерения коллектор статье [6] и основ работ [7 и 2]. Замечено, что распределение при пом отличается от знач плоских ловушек, х оказался одинаковым

При рассмотрении в виду, что хотя они нат (η_i, h), но, локальных концентрация являются точными с трации заряженных причинам:

- а) горизонталь больше вертикально отражают, помимо в неоднородности и ш
- б) помимо выс непрерывно меняется

Исследования ионной компоненты ионосферной плазмы

1. Распределение концентрации положительных ионов вдоль орбиты спутника

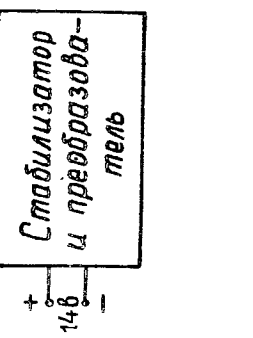
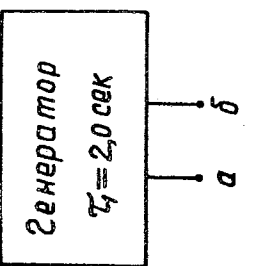
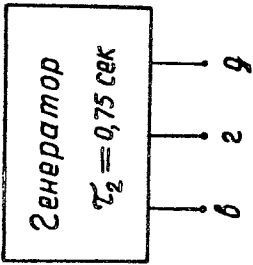
Локальная концентрация положительных ионов относилась к числу величин, результаты измерений которых запоминались вдоль всей орбиты спутника. На поверхности спутника было восемь плоских трехэлектродных ионных ловушек; каждая из них была расположена в одном из восьми октантов, на которые можно разделить пространство. Углы между нормальными к внешним сеткам любых двух соседних ловушек составляли $\leq 90^\circ$. Внешние сетки ловушек имели потенциал корпуса.

На фиг.8 приведены графики изменений концентрации положительных ионов n_i вдоль орбиты во время десяти оборотов спутника вокруг Земли. Приведенные на этих графиках величины n_i получены по данным системы плоских ловушек. Метод обработки первичных данных измерений коллекторных токов плоских ловушек описан в статье [6] и основан на соображениях, изложенных в работах [7 и 2]. Заметим, что хотя величины n_i , определенные при помощи сферических ловушек, несколько отличаются от значений n_i , найденных при помощи плоских ловушек, характер их изменений вдоль орбиты оказался одинаковым.

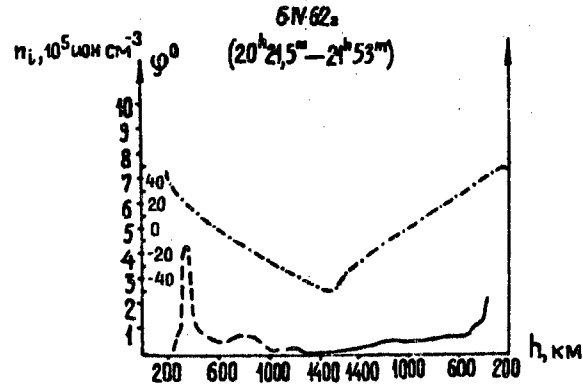
При рассмотрении графиков фиг.8 необходимо иметь в виду, что хотя они изображены в системе координат (n_i, h) , но, как и любые другие измерения локальных концентраций, проведенные на спутнике, не являются точными отображениями высотного хода концентрации заряженных частиц в ионосфере по следующим причинам:

а) горизонтальная скорость спутника существенно больше вертикальной, поэтому подобные графики неизбежно отражают, помимо высотного хода n_i , горизонтальные неоднородности и широтные аномалии n_i ;

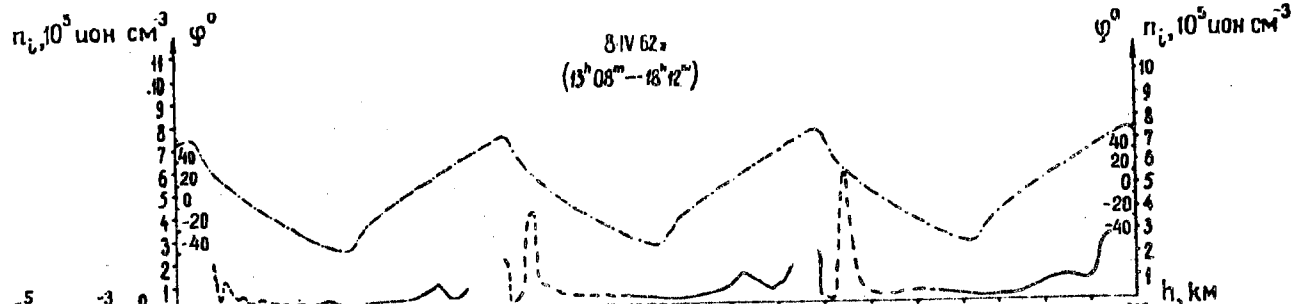
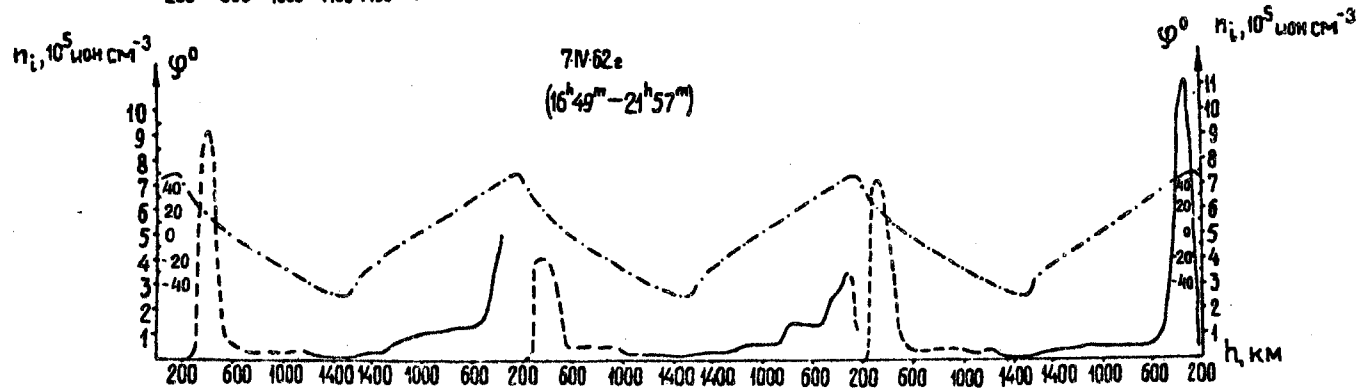
б) помимо высоты над Землей и широты, вдоль орбиты непрерывно меняется еще и местное время. Тем не

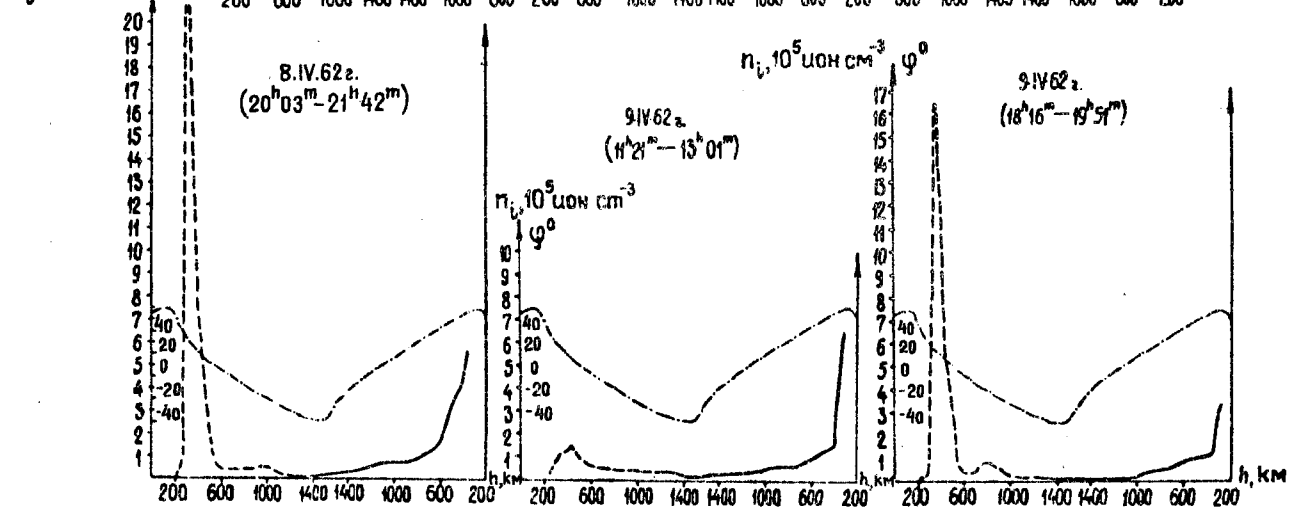
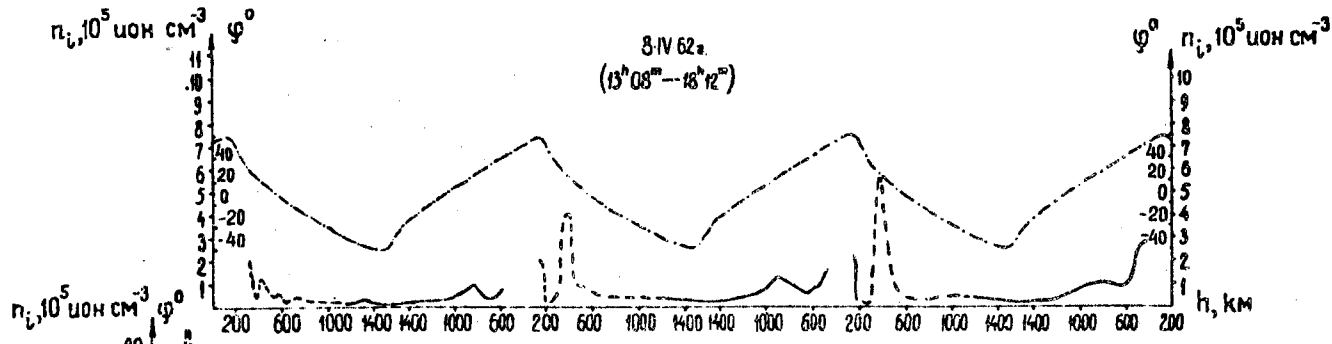
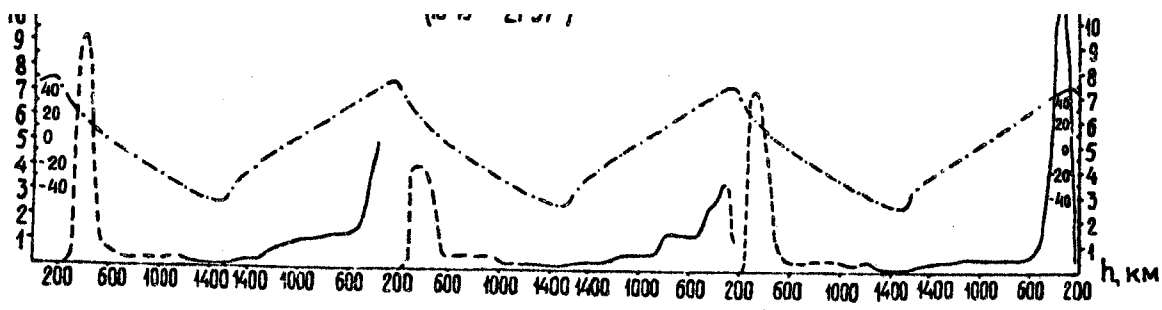


Этот блок:
питателя; КП1-КП3 -
мюра; а - выход
схемы на внешние
ионных ловушек;
рическую систему;
выход для подачи
лов фотоэлектронов



--- неосвещенные участки орбиты,
 — освещенные участки, — · — широта φ^0 .
 Время московское. Изменение высоты слева направо

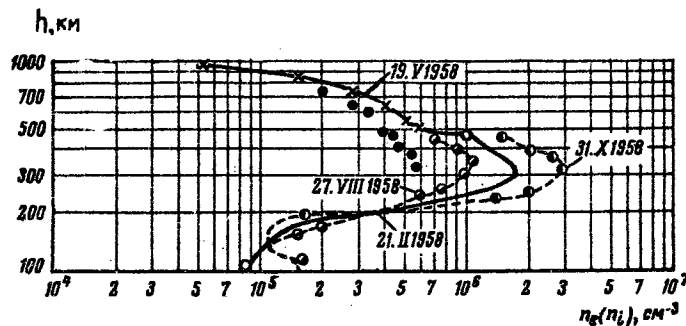




Фиг.8. Зависимость концентрации положительных ионов n_i (измеренной вдоль орбиты спутника) от высоты h

менее весьма интересно сравнить эти графики с аналогичными графиками, полученными в период максимума солнечной деятельности в 1958 г.

На фиг.7 приведена сводная кривая высотного распределения концентрации заряженных частиц в ионосфере на высотах до 1000 км, построенная по данным измерений, проведенных в 1958 г. при помощи дисперсионного интерферометра на геофизических ракетах АН СССР и ионных ловушек на третьем советском спутнике Земли. Особенностью этого распределения является весьма медленный спад концентрации заряженных частиц при росте высоты над главным максимумом ионизации в ионосфере. Как можно видеть



Фиг.7. Примерное распределение по высоте концентрации заряженных частиц в период, близкий к максимуму солнечной активности. Нижняя часть графика построена по данным одного из вертикальных пусков геофизических ракет (21.2.1958 г.), верхняя часть (от 500 км и выше) — по данным измерений на части орбиты 3-го советского спутника (19.5.1958 г.). Вблизи кривой нанесены некоторые точки, полученные на указанных высотах в 1958 г. в различное время на других геофизических ракетах или при других оборотах 3-го спутника; эти точки в известной степени характеризуют изменчивость ионосферы

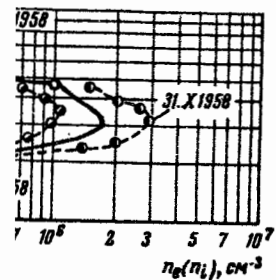
из графиков фиг.6, уменьшение n_i с ростом высоты над главным максимумом ионизации при всех оборотах "Космоса-2" вокруг Земли носит один и тот же характер — оно происходит значительно быстрее, чем по данным 1958 г. (фиг.7). На неосвещенной части орбиты

происходит довольно резко (см. фиг.6) на высотах орбиты наблюдается столбик на несколько километров высотного хода концентрации, но зависит от средней высоты. Было предположить, что с увеличением высоты преобладанию более легких

Необходимо иметь в виду масс-спектрометрические измерения в ионосфере (вплоть до высот) в период максимума солнечной активности на советском спутнике [3], в диапазоне массовых чисел He^+ и H^+ регистрировался вывод, что ионизация на высоте ~1000 км состоит, в основном, из He^+ и H^+ . В этом возникает вопрос: почему в это время? Хотя сейчас трудно дать ответ на этот вопрос, результаты измерений геофизических ионных ловушек приводят к выводу, что действительно преобладают ионы, полученные в "Эксплорер-8" [9].

Коль скоро это характерно для вариаций n_i с увеличением высоты на высоте 1958 по 1962 г., максимум солнечной активности, повышение солнечной активности в атмосфере и опускание следовательно, и уменьшение в областях преобладания предположение подтверждается в следующем разделе.

ть эти графики с
ными в период максиму-
г.
вая высотного распреде-
астиц в ионосфере на
по данным измерений,
помощи дисперсионного
кетах АН СССР и ионных
ике Земли. Особенностью
ма медленный спад кон-
юсте высоты над глав -
осфере. Как можно видеть



е по высоте
и в период,
й активности.
а по данным
геофизических
часть (от 500 км
ий на части
ка (19.5.1958 г.).
рые точки,
гах в 1958 г.
геофизических
их 3-го спутника;
характеризуют

n_i с ростом высоты
ии при всех оборотах
и и тот же характер -
быстрее, чем по
вещенной части орбиты

происходит довольно резкое изменение крутизны кривых (см. фиг. 6) на высотах ~ 600 км; на освещенных частях орбиты наблюдается столь же резкое изменение крутизны, но на несколько больших высотах. Так как крутизна высотного хода концентрации заряженных частиц существенно зависит от средней массы ионов [8], то естественно было предположить, что областям весьма резких изменений крутизны графиков фиг. 6 соответствуют области перехода от преобладания тяжелых ионов на меньших высотах к преобладанию более легких ионов на больших высотах.

Необходимо иметь в виду следующее. Единственными масс-спектрометрическими измерениями во внешней ионосфере (вплоть до высот ~ 1000 км) в период максимума солнечной активности были измерения на третьем советском спутнике [3], в которых использовался прибор с диапазоном массовых чисел ионов от 6 до 48, то есть ионы He^+ и H^+ регистрироваться не могли. Поэтому был сделан вывод, что ионосфера на высотах от ~ 300 до ~ 1000 км состоит, в основном, из ионов O^+ . В связи с этим возникает вопрос: не существовали ли легкие ионы (He^+ и H^+) в значительных количествах на высотах 600 км и в то время? Хотя сами результаты опыта [3] не могут дать ответа на этот вопрос, совместный анализ их с результатами измерений, выполненных при помощи сферических ионных ловушек на том же спутнике [2], приводит к выводу, что тогда на высотах до 1000 км действительно преобладали ионы O^+ . О том же свидетельствуют проведенные в 1960 г. опыты на спутнике "Эксплорер-8" [9].

Коль скоро это так, то существенное изменение характера вариаций n_i вдоль орбиты спутника при увеличении высоты над Землей, произошедшее за период с 1958 по 1962 г., можно связать с уменьшением солнечной активности, произошедшим за это время. Уменьшение солнечной активности вызывает охлаждение верхней атмосферы и опускание слоя тяжелых ионов (O^+), а следовательно, и уменьшение высоты перехода между областями преобладания тяжелых и легких ионов. Это предположение подтверждается соображениями, приведенными в следующем разделе.

2. Об ионном составе области перехода от преобладания тяжелых (O^+) к преобладанию легких ионов.

Как уже отмечалось в работе [6], анализ данных сферических ионных ловушек, установленных на "Космосе-2", дает возможность произвести оценку ионного состава на высоте 520-650 км. Вольт-амперные характеристики этих ловушек позволяли определить по точке, соответствующей нулевому потенциалу внешней сетки относительно нейтральной плазмы, полную концентрацию ионов $\sum_k n_k = n_i(h)$.

По крутизне верхнего линейного участка характеристики можно найти отношение парциальных концентраций ионов к соответствующим массовым числам:

$$\sum_k \frac{n_k}{m_k} = F(h).$$

Если предположить, что в рассматриваемой области ионосферы присутствуют два сорта ионов, то решение системы уравнений

$$\frac{n_1}{m_1} + \frac{n_2}{m_2} = F(h); \quad (1a)$$

$$n_1 + n_2 = n_i(h) \quad (16)$$

позволяет найти распределение концентраций обоих компонентов n_1 и n_2 .

Были рассмотрены две двухкомпонентные модели ионосферы, представляющиеся наиболее вероятными для высот 520-650 км. Решение уравнений (1a) и (16) в предположении кислородно-водородной модели ионосферы показало, что в этом случае средняя масса ионов m_+ падает чрезвычайно медленно. Это не соответствует резкому изменению наклона высотного распределения n_i , полученному из опыта.

Далее была рассмотрена построена распределение n_i и O^+ . При этом использовались относящиеся к полуборту в 16^h 49^m 7 апреля 1962 г. от 16 а.е.м. на высоте 610 км. Именно эта модель опубликована в настоящей публикации. Однако распределение модели не соответствует диффузионного равновесия нет оснований предполагать его отсутствие.

Можно построить модель области (состоящей из области, охватывающей всю экспериментальную область на "Космосе-2" находятся в диффузионной трехкомпонентной модели, дополняющей систему уравнений трехкомпонентной модели в статье Т.К.Бреус, пункт 3).

Как следует из анализа трехкомпонентной модели свидетельствуют о существовании ионов O^+ области, ионной составляющей.

Важно отметить, что между результатами, полученными в настоящее время и данными англо-американского эксперимента, проведенного в апреле 1962 г. [11].

3. Измерения

Опыт по измерениям ионного потока ионов, попадающих в ловушку, показывает, что поток ионов существенно превышает значение, полученное из вектора скорости и температуры ионов. Для

области перехода
кислородных (O^+)
ионов.

[6], анализ данных сфe-
ленных на "Космосе-2",
инку ионного состава на
ые характеристики этих
точке, соответствующей
и относительно нейтраль-
ионов $\sum_k n_k = n_i(h)$.
участка характеристики
ных концентраций ионов
там:

)

рассматриваемой области
эта ионов, то решение

(h); (1a)

h) (16)

концентраций обоих

ионентные модели ионо-
ее вероятными для вы-
лений (1a) и (16) в
ой модели ионосферы
ная масса ионов m_+
го не соответствует
ого распределения n_i ,

Далее была рассмотрена кислородно-гелиевая модель
и построено распределение относительных концентраций He^+
и O^+ . При этом использовались экспериментальные данные,
относящиеся к полубороту "Космоса-2", начавшемуся
в 16^h 49^m 7 апреля 1962 г. Средняя масса изменялась
от 16 а.е.м. на высоте 520 км до 4 а.е.м. на вы-
оте 610 км. Именно эта модель была описана в предвари-
тельной публикации результатов экспериментов [6].
Однако распределение концентраций O^+ и He^+ в этой
модели не соответствует условиям существования
диффузионного равновесия в этой области. Вместе с тем
нет оснований предполагать, что такое равновесие
отсутствует.

Можно построить трехкомпонентную модель переходной
области (состоящей из ионов O^+ , He^+ и H^+), удовлетво-
ряющую всем экспериментальным данным, полученным в
этой области на "Космосе-2"; при этом тяжелые ионы (O^+)
находятся в диффузионном равновесии. Чтобы рассчитать
трехкомпонентную модель, необходимо третье уравнение,
дополняющее систему уравнений (1a) и (16). Расчет такой
трехкомпонентной модели переходной области содержится
в статье Т.К.Бреус, публикуемой в настоящем выпуске [10].

Как следует из статьи [10], результаты расчета
трехкомпонентной модели так же, как и двухкомпонентной,
свидетельствуют о существовании над областью преоблада-
ния ионов O^+ области, в которой преобладают ионы He^+ .

Важно отметить, что существует неплохое согласие
между результатами, полученными при помощи "Космоса-2",
и данными англо-американского спутника "Ариэль-1",
запущенного вскоре после "Космоса-2" в конце
апреля 1962 г. [11].

3. Измерение ионной температуры

Опыт по измерению ионной температуры явился попыткой
использовать для определения температуры зависимость
потока ионов, попадающего в узкую трубку (на которую
набегает поток ионов с направленной скоростью, су-
щественно превышающей их тепловую скорость), от величины
угла между вектором скорости потока и осью трубки и от
температуры ионов. Для проведения опыта были использованы

ионные ловушки сотового типа, конструкция которых описана выше. Измерения велись только в режиме непосредственной радиосвязи спутника с наземными измерительными пунктами. Теория опыта, его более подробное описание и экспериментальные результаты приведены в статье [12], публикуемой в настоящем выпуске.

Вследствие вращения спутника вокруг центра масс регистрация коллекторного ионного тока ловушки с довольно узкой пространственной диаграммой осуществлялась редко, и полученный экспериментальный материал невелик. Тем не менее он представляет значительный интерес, так как на высоте ~ 260 км удалось определить температуру ионов $T_i = 1300^\circ\text{K} \pm 200^\circ$ одновременно с измерением электронной температуры T_e методом зонда Лэнгмюра (см. ниже), оказавшейся равной $\sim 3000^\circ\text{K}$. Это убедительно доказало отсутствие в дневные часы термического равновесия в ионосфере.

Измерения концентрации и температуры электронов при помощи цилиндрических зондов Лэнгмюра

Измерения при помощи зондов Лэнгмюра относились к группе экспериментов, результаты которых не регистрировались запоминающим устройством. В связи с этим данные проведенных экспериментов относятся лишь к участкам орбиты, лежащим в интервале высот от ~ 212 до ~ 600 км. В плоскости одного из сечений спутника, перпендикулярного его продольной оси, вблизи поверхности были установлены два цилиндрических зонда диаметром 1 см и длиной 20 см. Они были установлены таким образом, что центральный угол между точками их установки был равен 90° . Третий зонд таких же размеров был расположен на расстоянии 10 см от поверхности спутника в плоскости, перпендикулярной плоскости первых двух. Зонды были размещены указанным образом для того, чтобы можно было заметить влияние магнитного поля Земли на измерения; однако третий зонд по неустановленным причинам во время полета не функционировал.

На все зонды подавались идентичные напряжения V_p относительно корпуса спутника, менявшиеся по закону биполярных пилообразных импульсов. На Землю передавались одновременно величины V_p и зондовых токов. Вращение

спутника вызывал приведены огибающих токов, зарегистрированных подаваемого на зонды огибающие даны на графиках. Из графика периодический уровень чувствительности в некоторых случаях зондов совпадают интервалы времени соответствует минимуму когда показания сравнительно длительно

Анализ одной системы из восьми зондов на спутнике (см. ниже) токов каждого зонда в ионной среде есть в направлении скорости), хотя видно, например, спутника. Мы думали в основном, связанный относительно геометрии ориентации себя существенно менялся перпендикулярно ось зонда совпадал

Известно, что определение парного поля и вычисления сигналов зонда от

типа, конструкция которых
 элись только в режиме непосред-
 а с наземными измерительными
 о более подробное описание и
 аты приведены в статье [12],
 лпуске.

спутника вокруг центра масс
 зного тока ловушки с довольно
 раммой осуществлялась редко,
 льный материал невелик. Тем
 ачительный интерес, так как
 определить температуру ионов
 енно с измерением электрон -
 м зонда Лэнгмюра (см.ниже),
 К. Это убедительно доказало
 ы термического равновесия в

и температуры электронов
 еских зондов Лэнгмюра

зондов Лэнгмюра относились к
 ьтаты которых не регистри -
 йством. В связи с этим данные
 относятся лишь к участкам
 высот от ~212 до ~600 км.
 спутника, перпендикулярного
 ь поверхности были установлены
 метром 1 см и длиной 20 см.
 и образом, что центральный
 новки был равен 90°. Третий
 сположен на расстоянии 10 см
 оскости, перпендикулярной
 ы были размещены указанным
 жно было заметить влияние
 ерения; однако третий зонд
 во время полета не функцио-

ь идентичные напряжения V_p
 ка, менявшиеся по закону
 ьсов. На Землю передавались
 зондовых токов. Вращение

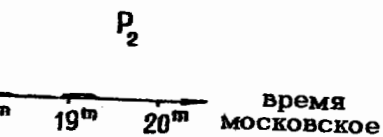
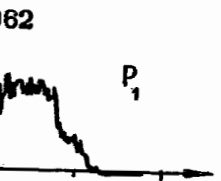
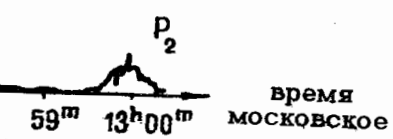
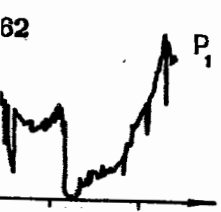
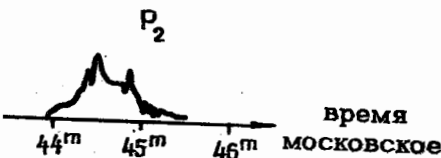
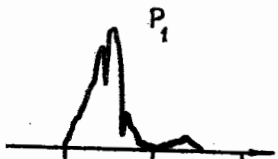
спутника вызывало модуляцию зондовых токов. На фиг.8
 приведены огибающие максимальных электронных зондовых
 токов, зарегистрированных в течение каждого периода,
 подаваемого на зонд пилообразного напряжения. Такие
 огибающие даны для трех интервалов времени, указанных
 на графиках. Из графиков видно, что максимальные зондовые
 токи периодически меняются, уменьшаясь до величин ниже
 уровня чувствительности усилителей зондовых токов. При
 этом в некоторых случаях максимумы электронных токов
 обоих зондов совпадают во времени (фиг.8а), а в другие
 интервалы времени максимум тока в одном зонде соот -
 ветствует минимуму в другом (фиг.8б). Имеются случаи,
 когда показания одного из зондов весьма малы в течение
 сравнительно длительных интервалов времени (фиг.8в).

Анализ одновременно зарегистрированных ионных токов
 в системе из восьми плоских ионных ловушек, установленных
 на спутнике (см.ниже), показал, что минимальные значения
 токов каждого зонда не всегда соответствуют пребыванию
 зонда в ионной тени, образующейся позади спутника
 (то есть в направлении, противоположном направлению его
 скорости), хотя период изменений зондовых токов, как
 видно, например, на фиг.8, определяется вращением
 спутника. Мы думаем, что эти изменения зондовых токов,
 в основном, связаны с изменением ориентации зондов от -
 носительно геомагнитного поля. В зависимости от этой
 ориентации собирающая электроны поверхность зонда
 существенно меняется, будучи наибольшей, когда ось зон -
 да перпендикулярна магнитному полю, и наименьшей, когда
 ось зонда совпадает с направлением магнитного поля.

Известно, что в случае цилиндрического зонда Лэнгмюра
 определение параметров плазмы при отсутствии магнит -
 ного поля и выполнении в области положительных потен -
 циалов зонда относительно плазмы условий

$$\frac{\tau_s^2}{\tau_p^2} \gg 1 \quad (2a)$$

$$V_{p0} > \frac{kT_e}{e}, \quad (26)$$



симальных значений
и P₂ - обозначения
зондов)

где r_p - радиус зонда;
 r_s - радиус слоя объемного заряда;
 V_{p0} - потенциал зонда относительно нейтральной плазмы;
 e - заряд электрона;
 T_e - электронная температура;
 K - постоянная Больцмана,

может производиться двумя способами (заметим, что условия (2а) и (2б) в ионосфере легко выполнимы). Эти способы описаны еще в ранней работе Лэнгмюра и Мотт-Смита [13]. Первый способ основан на использовании участка электронной ветви зондовой характеристики, соответствующего малым тормозящим потенциалам (будем называть его "крутым" участком) и обычно применяется при обработке результатов измерений с зондами любой конфигурации. Второй способ основан на использовании участка электронной ветви зондовой характеристики, соответствующего положительным потенциалам зонда ("пологого" участка). Зондовые измерения при помощи этого метода были успешно проведены в газоразрядной плазме Веруэйем [14].

Значение электронной концентрации n_e определяется в случае цилиндрического зонда при помощи следующих формул [14]:

а) при использовании крутого участка

$$n_e' = \frac{4,03 \cdot 10^{13} J_{e0}}{S \sqrt{T_e}} \text{ см}^{-3}, \quad (3)$$

где J_{e0} - ток зонда, соответствующий его нулевому потенциалу относительно плазмы;
 S - поверхность зонда, см^2 ;
 T_e - электронная температура, $^{\circ}\text{K}$;
 б) при использовании пологого участка

$$n_e'' = 3,22 \cdot 10^{11} \frac{1}{S} \sqrt{\frac{dJ_e^2}{dV_p}} \text{ см}^{-3}, \quad (4)$$

вой $J_e^2(V_p)$, соответствующую участку. ая температура определяется электронной ветви зондовой

$$\frac{\partial J_e}{\partial V_p} \quad (5)$$

$$J_e^2(V_p - V_p^B), \quad (6)$$

ое на зонд и соответствующее уравнению зонда относительно V_p , соответствующее точке минимума на прямой части графика напряжений (согласно методу Смита, при максвелловском распределении электронов и выполнению условия (26) кривая $J_e^2(V_p)$ является линейной [13]).

ть подобного использования графика рассмотрена в [13] без учета зонда Лэнгмюра при наличии и полная теория их до сих пор не разработана. В работе Бома, Бархопа применительно к ионной ветви зонда, на основе которых получены формулы (3) и (5), в случае когда характерный размер радиуса для ионов, в отсутствие магнитного поля равен нулю. Этот вывод, примененный для случая характерного размера радиуса для электронов.

Последнее условие, не выполнявшееся в случаях измерений в газоразрядной плазме [15], может быть легко выполнено в ионосфере.

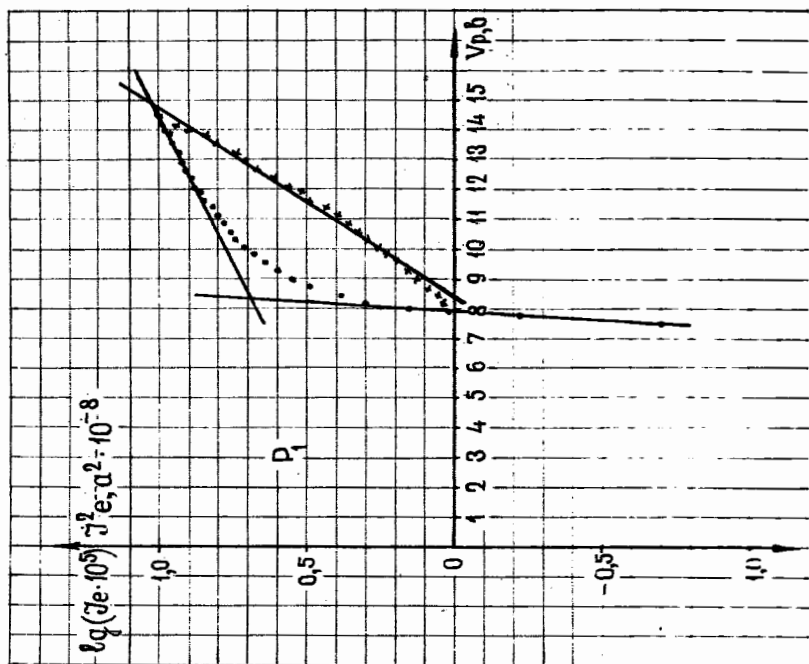
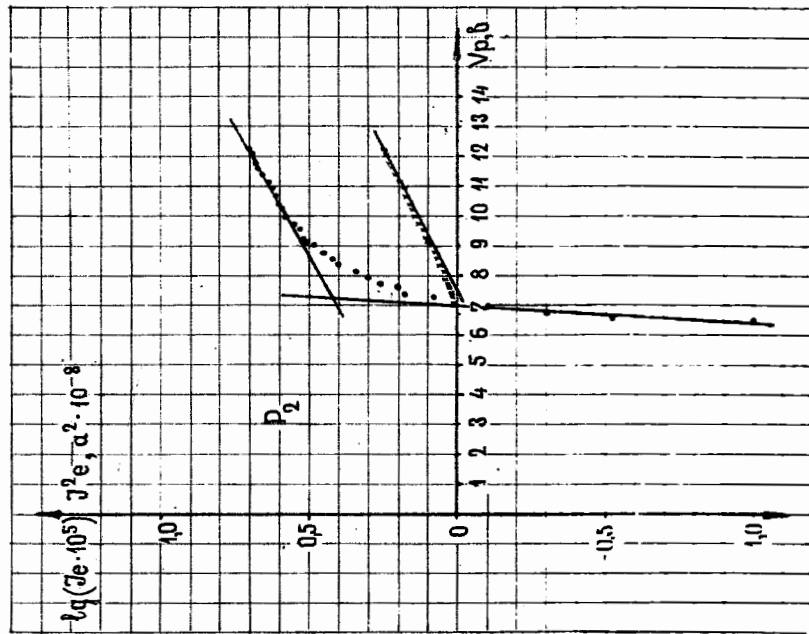
Когда цилиндрический зонд перпендикулярен магнитному полю, то уменьшение подвижности электронов из-за их Ларморова вращения мало влияет на собирание заряженных частиц на его боковую поверхность. Радиус зонда в нашем случае меньше радиуса Лармора для электронов. То же относится к области, где проводились измерения ($h \approx 200 \pm 600$ км), и к радиусу слоя объемного заряда вокруг зонда. Поэтому предполагалось, что в этом случае можно применить метод определения параметров плазмы не только по крутому участку зондовой характеристики, но и по пологому. Было принято, что зондовые характеристики, в которых электронный ток на пологих участках максимален (при изменениях его в процессе вращения спутника (см. фиг. 8)), соответствует перпендикулярности зонда по отношению к магнитному полю.

Было найдено, что при обработке зондовых характеристик с максимальными токами определения параметров плазмы по крутому и пологому участкам в большинстве случаев дают практически совпадающие результаты; в других случаях при использовании этих двух методов обработки обычно получают значительные расхождения. Мы считаем, что это обстоятельство свидетельствует в пользу правильности сделанных предположений. На фиг. 9 представлены типичные зависимости $\partial J_e / \partial V_p$ и $J_e^2(V_p)$, полученные одновременно при помощи двух взаимно-перпендикулярных зондов (7.4.62 г., 15^h 42^m 28^s московского времени, $h \sim 280$ км).

Пользуясь формулами (3) и (5), находим из первой характеристики (для P_1) $n_e' = 2,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e' = 3200^\circ \text{K}$, а по формулам (4) и (6) $n_e'' = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e'' = 2900^\circ \text{K}$. Из второй характеристики (для P_2) соответственно получаем $n_e' = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e' = 3000^\circ \text{K}$, $n_e'' = 1,2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и $T_e'' = 2900^\circ \text{K}$.

Таким образом, из результатов расчета приведенных характеристик следует:

а) значения параметров плазмы, определенные по данным одного и того же зонда двумя методами (пользуясь



Фиг.9. Полулогарифмические вольт-амперные характеристики (...) и зависимость $I_e^2(V_p)$ (ххх) зондов Лэнгмюра

крутым и пологим характеристикам),

б) значения зондов практически

в) значения в

Как нам пред

ют, что глубокие

спутника связан

(учитывается, ч

соответствие меж

пологую участкам

что различное пол

степени сказыва

одинаковой их ор

из-за нарушения а

ного заряда вокруг

этим, возможно, о

значений n_e , опре

шим случаем, когда

достигаются одно

Отметим, что

на фиг.9, получены

На фиг.10 при

амперная характер

коллекторного то

Результаты расче

там электронной

превышающим зна

T_e за время поле

в пределах от 18

нижеследующей та

расчета по неско

На фиг.11 при

вдоль участка ор

зондов Лэнгмюра. I

уменьшалась от 5

величина n_e в ма

критической частот

станции, располож

участка орбиты,

измерения.

фиг.8. Полулогарифмические вольт-амперные характеристики (...) и зависимость $I_e^2(V_p)$ (х х х) зондов Лэнгмюра

крутым и пологим участками электронной ветви зондовых характеристик), близки друг другу;

б) значения электронных температур по данным обоих зондов практически одинаковы;

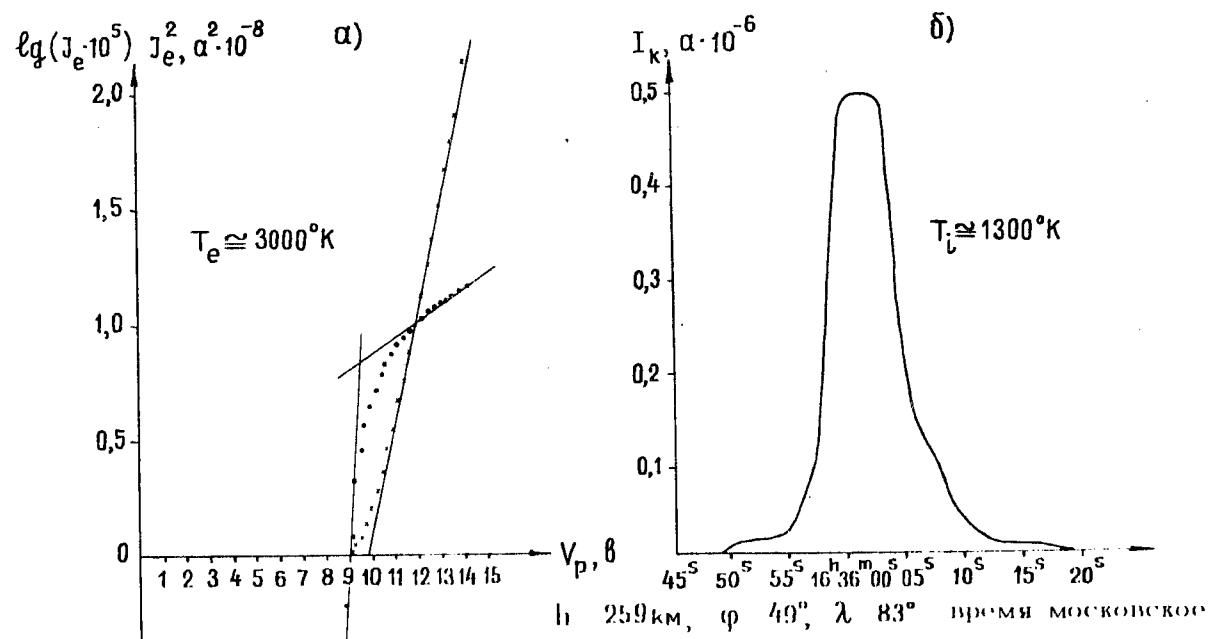
в) значения n_e по данным различных зондов существенно (примерно вдвое) отличаются друг от друга,

Как нам представляется, пункты (а) и (б) подтверждают, что глубокие изменения зондовых токов при вращении спутника связаны с влиянием геомагнитного поля (учитывается, что при уменьшении зондовых токов соответствие между данными, полученными по крутому и по пологому участкам, нарушается). Не исключено, однако, что различное положение зондов на спутнике в некоторой степени сказывается на определении n_e даже при одинаковой их ориентации относительно магнитного поля из-за нарушения аксиальной симметрии слоя пространственного заряда вокруг спутника при его движении. Именно этим, возможно, объясняется различие рассчитанных выше значений n_e , определенных по данным фиг.8, соответствующим случаю, когда максимумы наибольших токов двух зондов достигаются одновременно.

Отметим, что зондовые характеристики, приведенные на фиг.9, получены во время магнитного возмущения ($K_p=6$).

На фиг.10 приведены полученные одновременно вольт-амперная характеристика зонда и зависимость от времени коллекторного тока ионной ловушки сотового типа. Результаты расчета по этим кривым приводят к значениям электронной температуры, более чем в два раза превышающим значения ионной температуры. Измерения T_e за время полета "Космоса-2" дали значения, лежащие в пределах от 1800 до 3200°К, как это следует из нижеследующей таблицы, в которой приведены результаты расчета по нескольким зондовым характеристикам.

На фиг.11 приведен типичный график изменения n_e вдоль участка орбиты спутника, полученный при помощи зондов Лэнгмюра. На этом участке орбиты высота спутника уменьшалась от 550 до 212 км. Здесь же показана величина n_e в максимуме области F, определенная по критической частоте, измеренной при помощи ионосферной станции, расположенной вблизи от проекции на Землю участка орбиты, на котором проводились зондовые измерения.



Фиг.10. Одновременно полученные вольт-амперная характеристика ионды (а) и зависимость от времени коллекторного тока ионной ловушки сотового типа (б):
 - полулогарифмическая характеристика зонда;
 x x x - зависимость $I_e^2(V_p)$

Некоторые
температу

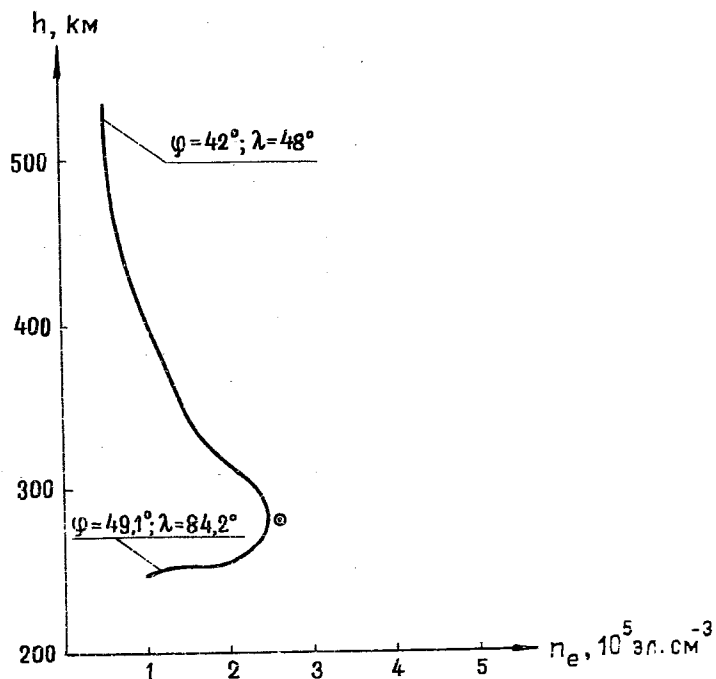
Дата и время измерения	h, км
7.4.62	284
16 h 42 m	284
16 h 42 m	284
18 h 22 m	344
18 h 23 m	314
18 h 24 m	294
18 h 24 m	304
20 h 08 m	264
20 h 08 m	264
20 h 08 m	264
8.4.62	294
13 h 09 m	294
13 h 09 m	294
13 h 11 m	264
14 h 43 m	524
14 h 49 m	334
14 h 50 m	334

Таблица

Некоторые результаты измерений электронной температуры T_e при помощи зондов Лэнгмюра (φ - широта, λ - долгота)

Дата и время измерения	h, км	φ°	λ°	$T_e, \text{°K}$
<u>7.4.62</u>				
16 ^h 42 ^m	288	48,0	71,0	3150
16 ^h 42 ^m	285	48,4	72,0	3000
18 ^h 22 ^m	343	45,0	32,0	3000
18 ^h 23 ^m	317	47,0	37,0	2900
18 ^h 24 ^m	297	48,0	43,0	3200
18 ^h 24 ^m	300	48,0	42,0	2500
20 ^h 08 ^m	265	48,9	27,0	1800
20 ^h 08 ^m	264	49,0	27,3	2500
20 ^h 08 ^m	262	49,1	28,0	2300
<u>8.4.62</u>				
13 ^h 09 ^m	299	48,3	121,0	1800
13 ^h 09 ^m	298	48,3	121,3	2200
13 ^h 11 ^m	262	49,1	131,3	1800
14 ^h 43 ^m	528	36,0	59,1	2600
14 ^h 49 ^m	339	46,8	85,8	2700
14 ^h 50 ^m	336	46,9	86,5	2800

Фиг. 10. Одновременно полученные вольт-амперная характеристика зонда (а) и зависимость от времени коллекторного тока тонкой ловушки сотового типа (б):
 - полулогарифмическая характеристика зонда;
 x x x - зависимость $I_e^2(V_p)$

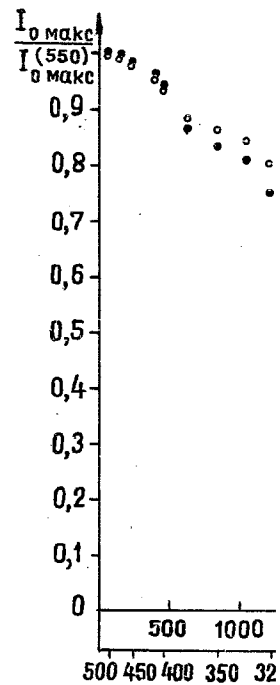


Фиг.11. Зависимость электронной концентрации n_e от высоты h , измеренной при помощи зондов Лэнгмюра вдоль участка орбиты спутника 7.4.82. \odot - значение n_e в максимуме слоя F, рассчитанное по данным ионосферной станции

Опыты по изучению фотоэмиссии электронов

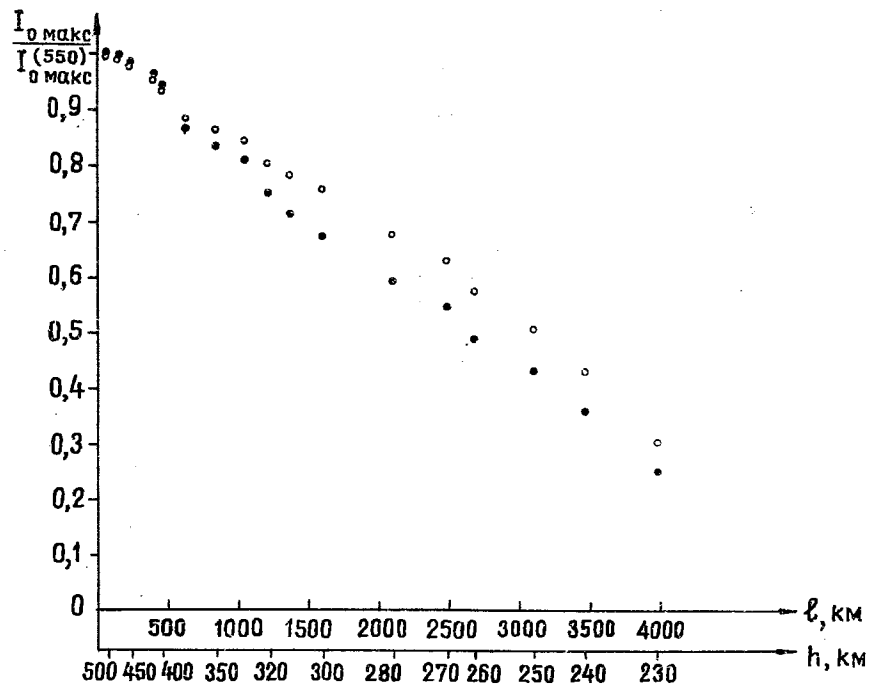
Для изучения фотоэмиссии электронов под действием солнечного излучения и ее изменений вдоль орбиты спутника на "Космосе-2" было использовано три анализатора фотоэлектронов, устройство которых подобно описанному в работе [16]. Конструкция анализатора описана выше, по существу он представлял собой обычную полусферическую трехэлектродную ловушку заряженных частиц, плоский коллектор которой в данном случае являлся эмиттером фотоэлектронов.

Фототоки анализировались только в режиме передачи. Поскольку пропорционально интенсивности излучения, то измерять поглощение спутника в более широком диапазоне высот. Насыщения при данных высотах 550-212 км.



Фиг.12. Зависимость отношения $\frac{I_{0 \text{ макс}}(550)}{I_{0 \text{ макс}}(32)}$ от высоты h . \circ - данные спутника

Фототоки анализаторов фотоэлектронов регистрировались лишь в режиме непосредственной радиотелеметрической передачи. Поскольку значение фототока насыщения пропорционально интенсивности вызывающего его солнечного излучения, то изменение фототоков по мере погружения спутника в более низкие слои атмосферы должно характеризовать поглощение солнечного излучения в указанном диапазоне высот. На фиг.12 показано уменьшение фототоков насыщения при движении спутника вдоль орбиты в области высот 550-212 км. Опубликованные в настоящее время



Фиг.12. Относительное изменение тока насыщения I_{0max} в зависимости от расстояния по лучу l , отсчитываемого от высоты 550 км до спутника; $I_{0max}(550)$ - величина I_{0max} на высоте 550 км; \circ - по данным одного из оборотов спутника 8.4.62; \bullet - по данным шести оборотов спутника 8.4.62 и 9.4.62

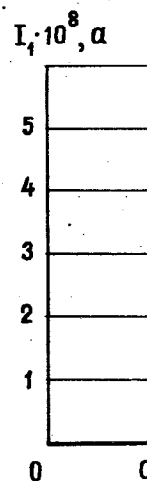
экспериментальные данные о поглощении ультрафиолетового излучения Солнца атмосферой Земли относятся к области высот ниже 235 км [17]. Поэтому получение сведений об интегральном поглощении солнечного излучения на высотах, больших 200 км, представляет определенный интерес.

Так как одновременно с изменением высоты менялось и зенитное расстояние, то на фиг.12 показаны изменения фототока в зависимости не только от высоты, но и от расстояния по лучу. Видно, что, несмотря на существенно различный характер поглощения отдельных участков и линий спектра солнечного излучения различными областями ионосферы, отличающимися друг от друга по составу, плотности и пр., указанная зависимость в области высот 230-550 км приблизительно линейна.

Сведения о потоках солнечных фотонов в широких участках спектра можно получить из результатов измерения распределения компонент скоростей, нормальных к плоскости эмиттера фотоэлектронов. Образец вольт-амперной характеристики (зависимости фототока эмиттера от напряжения на внутренней сетке) показан на фиг.13.

Форма приведенной на фиг.13 вольт-амперной характеристики типична для нескольких тысяч характеристик, полученных в данном эксперименте. Участок "а-в" с пониженной крутизной присутствует на всех без исключения характеристиках.

Для определения спектрального состава падающего излучения в лабораторных условиях были сняты так называемые вольт-амперные характеристики при облучении экспериментальной модели анализатора фотоэлектронов монохроматическим излучением различных длин волн. При сопоставлении полученных во время полета спутника вольт-амперных характеристик с лабораторными выяснилось, что зарегистрированное анализаторами фотоэлектронов солнечное излучение, по-видимому, полностью не определяется излучением диапазона 2000-500 Å. Анализ работы аппаратуры спутника "Космос-2" показал, что зарегистрированные характеристики не могут быть следствием аппаратурных эффектов. Все это позволяет думать, что полученная форма вольт-амперных характеристик связана с природой падающего волнового излучения Солнца или, что значительно менее вероятно, с зарегистрированными одновременно потоками корпускулярного излучения.



Фиг.
(7.4.)
завис
напр
у

Дискуссия |
помощи анализа
содержится в с
настоящем выпус

Результаты
поглощение инте
излучения на р
до 550 км, то ес
симуму ионизаци
более 235 км по
получены впервые

Определен
относите
сис

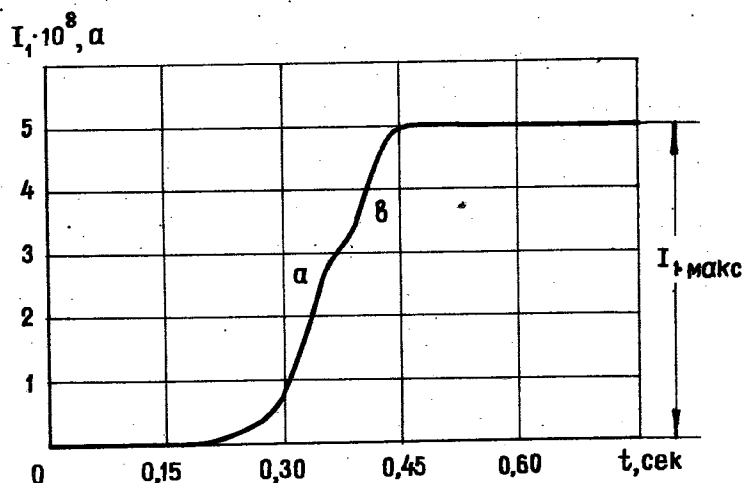
На "Космосе"
относительно ве
использована сис

того
области
ний об
сотах,
с.
енялось и
менения
но и от
ственно
и линий
и ионо-
отности
-550 км

широких
мерения
плоскости
характере-
жения на

характеристик,
"а-в" с
ключения

дающего
аты так
облучении
ктронов
н волн. При
спутника
яснилось,
электронов
определя-
з работы
арегистри-
дствием
ть, что
связана с
а или, что
ыми одно -



Фиг.13. Образец записи по времени (7.4.62 г., $h = 508$ км, $h_{\odot} = 31^{\circ}$) зависимости фототока эмиттера от напряжения на внутренней сетке (h_{\odot} - угол возвышения Солнца над горизонтом спутника)

Дискуссия результатов измерений, проведенных при помощи анализаторов фотоэлектронов на "Космосе-2", содержится в статье Н.М.Шютте [18], публикуемой в настоящем выпуске.

Результаты измерения фотоэмиссии позволили оценить поглощение интегрального солнечного коротковолнового излучения на различных высотах в диапазоне от 300 до 550 км, то есть в области высот, примыкающей к максимуму ионизации области F ионосферы [18]. На высотах более 235 км подобные данные, насколько нам известно, получены впервые.

Определение ориентации спутника "Космос-2" относительно вектора скорости при помощи системы плоских ионных ловушек

На "Космосе-2" для определения ориентации спутника относительно вектора его орбитальной скорости была использована система, состоящая из восьми ионных ловушек,

описанная выше [6]. Заметим, что несколько позже запуска "Космоса-2" в мае 1962 г. в Австралии была запущена ракета "Блэк Найт", в которой для определения ее ориентации относительно вектора скорости использовалась система плоских ионных зондов, то есть тот же физический принцип [19]. Коллекторный ток на некотором участке безграничной плоской ионной ловушки при отрицательном потенциале корпуса спутника определяется выражением [7]

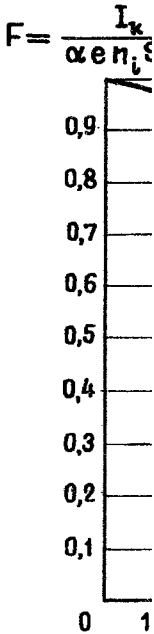
$$I_k = \alpha e S V_s n_i F(\psi, T_i) = I_{k0} F(\psi, T_i),$$

где α - суммарная прозрачность сеток;
 e - заряд электрона;
 S - площадь коллектора;
 V_s - скорость спутника;
 n_i, T_i - концентрация и температура ионов;
 ψ - угол между нормалью к коллектору и вектором скорости спутника.

На фиг.14 показаны зависимости $F(\psi, T_i)$ от угла ψ для значений T_i 0; 1800 и 5000°K. При $T_i = 0$ функция F совпадает с $\cos \psi$. При $T_i \neq 0$ косинусидальным приближением можно пользоваться в меньшем интервале значений ψ . Следует отметить, что кривые, показанные на фиг.14, относятся к плоской ионной ловушке, как части безграничной электрически однородной плоскости. В нашем случае ловушки установлены на корпусе, имеющем конечные размеры. Поэтому в этом случае пренебрегать краевыми эффектами нельзя, так как при больших величинах угла ψ ток реальной ловушки превышает ток на соответствующем участке идеализированной безграничной плоской ловушки. Анализ записей коллекторных токов плоских ловушек на спутнике "Космос-2" показывает, что краевые эффекты играют заметную роль. При нормальном падении потока ионов на ловушку ($\psi = 0$) краевые эффекты играют значительно меньшую роль.

Учитывая влияние ионной температуры и краевых эффектов, можно считать, что для системы плоских ионных ловушек, установленных на спутнике "Космос-2", косинусидальное приближение справедливо для $|\psi| \leq 45 \div 50^\circ$:

$$I_k = I_0 \cos \psi. \quad (7)$$



Это приближение направления и осей углы ψ не п ловушек. (нори используя три ориентацию с

Для пови необходимо | свободного т ловушек. Пол ловушек спус меру точности отклонения с

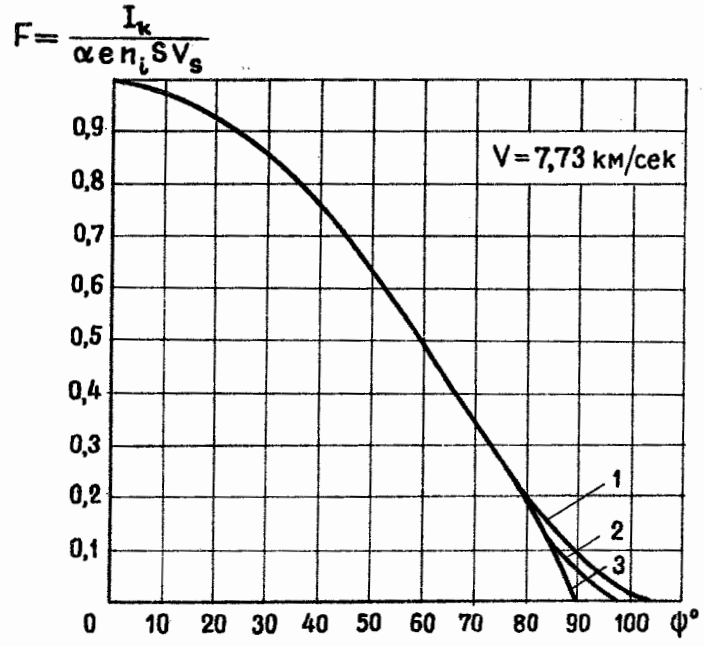
ко позже
дали была
пределения
льзовалась
изический
м участие
ательном
ением [7]

нов;
тору и век-

от угла ψ
нкция F
ным прибли-
значений ψ ,
на фиг.14,
езграничной
чае ловушки
размеры,
и эффектами
угла ψ ток
ветствующем
ой ловушки,
ловушек на
вые эффекты
адении потока
грают значи-

аевых эффек-
х ионных
2", косинусо-
 $\leq 45 \div 50$:

(7)



Фиг.14. Зависимость функции F плоской ионной ловушки от угла ψ между ее нормалью и вектором скорости спутника:
1 - $T_i = 5000^\circ\text{K}$; 2 - $T_i = 1800^\circ\text{K}$;
3 - $T_i = 0^\circ\text{K}$

Это приближение было использовано для определения направления вектора скорости относительно трех координатных осей спутника. Если в данный момент времени углы ψ не превышают 50° для трех некопланарных ловушек (нормали к поверхностям которых некопланарны), то, используя три уравнения вида (7), можно легко вычислить ориентацию спутника относительно вектора скорости.

Для повышения точности определения ориентации необходимо решать уравнения движения спутника как свободного тела и сравнивать решения с показаниями ловушек. Подобная обработка данных системы плоских ловушек спутника "Космос-2" показала, что если за меру точности определения ориентации принять величину отклонения суммы квадратов направляющих косинусов

от единицы, то этот метод дает возможность определять ориентацию с точностью не хуже +3%. Однако такой метод требует большого объема вычислительных работ.

Следует отметить, что точность определения ориентации спутника по отношению к вектору скорости в описываемых опытах была несколько понижена из-за не вполне удачного расположения ловушек на поверхности спутника (в некоторых направлениях в поле зрения ловушек попадали выступающие детали спутника), что несколько искажало зависимости токов в отдельных ловушках от их положения. Если при постановке аналогичных измерений этого избежать, то точность определения ориентации можно еще повысить.

О значении и перспективах применения методов, использованных в опытах на "Космосе-2"

Как видно из вышеизложенного, измерения, проведенные на спутнике "Космос-2", позволили получить интересные результаты, относящиеся к структуре ионосферы и характеризующие происходящие в ней процессы.

В области широт от 49° с.ш. до 49° ю.ш. и в области высот от ~ 212 до ~ 1550 км была измерена концентрация положительных ионов. На высотах от ~ 212 до ~ 600 км были измерены концентрация и температура электронов; впервые были проведены прямые определения ионной температуры. Получены данные об изменениях фотоэмиссии с металлов, вызываемой солнечным коротковолновым излучением в интервале высот, близком к максимуму ионизации области F ионосферы.

Наконец, насколько нам известно, впервые было осуществлено определение ориентации космического аппарата относительно его вектора скорости при помощи ионных датчиков.

Этими результатами, однако, не исчерпывается значение проведенных на "Космосе-2" экспериментов; анализ их принесет значительную пользу при подготовке новых опытов на космических аппаратах в ионосфере.

Представляется интересным остановиться на некоторых выводах методического характера, связанных с проведенными экспериментами.

Несмотря на значительные успехи, достигнутые за последние 7 лет при использовании на спутниках и ракетах

зондов, экранир ловушек) [2, попытка примен сических (одноэ их простоты и получить из сведения о конц и об их энерг возможность не "Космос-2" (по тельности усили ионные ветви зо рованы), однако Для уверенной параметров ион характеристики по-видимому, ещ ты и теоретическ одноэлектродных время в тех концентрация эл зонд меньше, зондом; однако ночное время о

Применение для получения электронной вет этой области т зависеть от с сферического зо ных потенциало увеличением по области пологу использовать дл участку характе . Использова ностями, вызыв магнитного по необходимо, ч радиуса (кото порядка 3 см), летворяющего э

определять
какой метод
ориентации
описываемых
удачного
в некоторых
выступающие
зависимости
я. Если при
бежать, то
звезды.

годов,
2"

проведенные
интересные
ферры и ха-

и в области
центрация
~ 600 км
электронов;
ия ионной
фотоэмиссии
одновым из-
ду ионизации

вые было
ического
при помощи

рывается
периментов;
ри подготов-
ионосфере.
на некоторых
оведенными

стигнутые за
и ракетах

зондов, экранированных сетками ионных и электронных ловушек) [2, 6, 11, 20-22], представляет интерес попытка применения в ионосферных исследованиях классических (одноэлектродных) зондов Лэнгмюра вследствие их простоты и даваемой ими принципиальной возможности получить из одной вольт-амперной характеристики сведения о концентрации частиц с зарядами обоих знаков и об их энергетических распределениях. Последняя возможность не была использована в опытах на спутнике "Космос-2" (по-видимому, из-за недостаточной чувствительности усилителей токов зондов, в результате чего ионные ветви зондовых характеристик не были зарегистрированы), однако эту возможность следует иметь в виду. Для уверенной оценки степени надежности определения параметров ионосферы по электронной ветви зондовой характеристики с учетом влияния геомагнитного поля, по-видимому, еще потребуются дополнительные эксперименты и теоретические исследования. Измерения при помощи одноэлектродных зондов не следует проводить в дневное время в тех областях ионосферы, в которых малая концентрация электронов и потоки заряженных частиц на зонд меньше, чем потоки фотоэлектронов, эмпируемых зондом; однако вблизи максимума ионизации, а также в ночное время они, по-видимому, перспективны.

Применение плоского зонда не позволяет использовать для получения информации о плазме пологий участок электронной ветви зондовой характеристики (так как в этой области ток плоского зонда практически не должен зависеть от его потенциала). У цилиндрического и сферического зондов электронный ток в области положительных потенциалов зонда относительно плазмы растет с увеличением потенциала зонда, и соответствующую этой области пологую часть зондовой характеристики можно использовать для контроля данных, полученных по крутому участку характеристики.

Использование сферического зонда связано с трудностями, вызываемыми тем, что для уменьшения влияния магнитного поля на форму зондовой характеристики необходимо, чтобы радиус зонда был меньше ларморова радиуса (который в ионосфере на высотах ~ 300 км порядка 3 см). Поверхность сферического зонда, удовлетворяющего этому условию, оказывается малой; кроме

того, сферический зонд нужно установить на штанге, которая при малом радиусе зонда должна существенно нарушать структуру его электрического поля.

Длинный цилиндрический зонд может иметь большую собирающую поверхность при малом радиусе; цилиндрическая штанга в этом случае не нарушает электрическое поле зонда, а, напротив, служит охранным электродом. Удаление цилиндрического зонда (как и сферического) от корпуса спутника или ракеты при помощи штанги целесообразно также для проведения измерений вне слоя объемного заряда, окружающего корпус спутника. Однако для определения электронной концентрации при помощи такого зонда необходимо, чтобы он был ориентирован в направлении, близком к перпендикулярному по отношению к силовым линиям геомагнитного поля. На определение электронной температуры невыполнение этого условия влияет значительно слабее.

Методы определения ионной температуры при помощи сотовых ловушек, подробно изложенные в статье [12], как нам представляется, могут найти применение в будущих экспериментах. Разумеется, вместо внешней сетки ионной ловушки, выполненной в виде сот, может применяться просто длинная трубка с достаточным отношением $\frac{R}{L}$. Однако применение сот позволяет при данной эффективной площади коллектора и заданной чувствительности ловушки к изменению направления набегающего потока ионов (определяемой изменением коллекторного тока при изменении указанного направления на один градус) значительно уменьшить геометрические размеры ловушки. Для сотовых ловушек, применявшихся на "Космосе-2", при температуре ионов $T_i = 1500^\circ\text{K}$ и концентрации ионов $n_i \approx 5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ чувствительность (в указанном смысле) была порядка $1,5 \cdot 10^{-8}$ а/град. Следует иметь в виду, что для определения ионной температуры при помощи сотовых ловушек весьма существенное значение имеет точность определения изменений ориентации ловушки относительно вектора скорости набегающего потока (угла ψ) либо момента, когда плоскость входных отверстий сот перпендикулярна этому вектору ($\psi = 0$).

Наконец, хотелось бы отметить, что ионные ловушки сотового типа, наряду с системой плоских ионных ловушек,

могут быть использованы для измерения скорости, бл направленности угла между осью зонда и осью ориентации координат вектора скорости. Авторы считают, что вклад, внесен В.П.Крупским и другими в измерения ионной температуры в определении скорости - В.В.

1. Gringauz K. Afonin V. V. Research V.
2. Грингауз Искусств.спу
3. Истомин Е. (1960).
4. Bourdeau R. Bauer S. I.
5. Грингауз (1957).
6. Грингауз и Гдалевич
7. Whipple E. C.
8. Mange P. J.
9. Bourdeau R.
10. Бреус Т.К.
11. Bowen R. J., A. P. Proc.
12. Афонин В. И. Настоящий в
13. Mott-Smith

а штанге,
существенно

ть большую
индрикеская
тесное поле

Удаление
корпуса
есообразно
ого заряда,
пределения
ого зонда
правления,
к силовым
лектронной
я влияет

при помощи
статье [12],
в будущих
етки ионной
рмняться
ением $\frac{R}{L}$.
эффективной
ти ловушки
тока ионов
тока при
дин градус)
ры ловушки.
осмосе-2",
центрации
указанном

ует иметь в
атуры при
се значение
ции ловушки
еого потока
ость входных
($\psi = 0$).
ные ловушки
ых ловушек,

могут быть использованы в системах определения ориента-
ции космического аппарата относительно вектора его
скорости, благодаря их весьма узкой "диаграмме
направленности" (зависимости коллекторного тока от
угла между осью ловушки и вектором скорости). Задача
же создания эффективной и точной системы определения
ориентации космического аппарата относительно его
вектора скорости, безусловно, является одной из
актуальных проблем космонавтики.

Авторы считают своим долгом отметить значительный
вклад, внесенный в создание электронного блока
В.П.Крупским и В.А.Ганопольским, в обработку результатов
измерений - Г.Н.Злотным, И.Д.Дмитриевой и И.Н.Кикнадзе,
в определение ориентации спутника относительно вектора
скорости - В.В.Афониным и В.Н.Боровенко.

Литература

1. Gringauz K.I., Gorozhankin B.N., Gdalevich G.L., Afonin V.V., Rybchinsky R.Ye., Shutte N.M. Space Research V, North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 733, 1965.
2. Грингауз К.И., Безруких В.В., Озеров В.Д. Искусств.спутн.Земли, вып.6, 63, (1961).
3. Истомина В.Г. Искусств.спутн.Земли, вып.4, 171. (1960).
4. Bourdeau R.E., Whipple E.C., Jr., Donley J. and Bauer S.I. J.Geophys.Res., 67, 467 (1962).
5. Грингауз К.И., Зеликман М.Х. УФН, 63, 239 (1957).
6. Грингауз К.И., Горожанкин Б.Н., Шютте Н.М. и Гдалевич Г.Л.: ДАН СССР, 151, 560. (1963).
7. Whipple E.C., Jr., Proc. IRE, 47, 2023 (1959).
8. Mange P. J.Geophys.Res., 65, 3833 (1960).
9. Bourdeau R.E., Whipple E.C. J.Geophys.Res. 67, 467 (1962).
10. Бреус Т.К. Настоящий выпуск, стр. 57.
11. Bowen R.J., Boyd R.L.F., Raitt W.J. and Willmore A.P. Proc.Roy.Soc., 281, 504 (1964).
12. Афонин В.В., Горожанкин Б.Н., Грингауз К.И. Настоящий выпуск, стр. 41.
13. Mott-Smith M.M., Langmuir I. Phys.Rev., 28, 727 (1926).

14. Verwey W. Philips Res.Repts.Suppl., n.2, 1961.
15. Bohm D. Burhop E.H.S. and Massey H.S.W. The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Field. Chap.2. Ed. by A.Cuthrie and P.K.Walkerling, New York, 1949.
16. Hinteregger H.E., Damon K., Hall L.A. J.Geophys. Res., 65, 961, (1959).
17. Hinteregger H.E. J.Geophys.Res., 66, 2367, (1961); Hall L.A., Schweizer W., Hinteregger H.E. J.Geophys.Res., 68, 6413, (1963); Hall L.A., Schweizer W., Hinteregger H.E. J.Geophys.Res, 70, 105, (1965); Hinteregger H.E., Hall L.A., Schmidtke G. Space Research V, North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 1175. (1965).
18. Шютте Н.М. Настоящий выпуск, стр, 90.
19. Norman K., Willmore A.P. Planet.Space Sci., 13, 1, (1965).
20. Bourdeau R.E. Proc.Space Research III, North-Holland Publ.Co., Amsterdam, 554, (1961).
21. Sagalyn R.C., Smiddy M. and Wisnia I. J.Geophys. Res., 68, 199, (1963).
22. Sharp G.W., Hansen W.B., McKibbin D.D. Proc.Space Res.IV, North-Holland Publ.Co., Amsterdam. 454, (1964).

551.510.53E

В.В.Афон

ОП
ПОЛОЖИ
ИОНН

Опись
пературы
"Космос-1"
ловушки с
ментальны
жительны
рямента.

Целью наст
измерению ионно
на спутнике "Кс
сываемого опыту
ре не производи
экспериментальн
возможности ул
мый метод.

Ловушка со
трехэлектродное
антифотоэлектро
тока с поверхно
ненной с корпу
набора примыка
"сот". Длина к
противоположны

Статья поступила в редакцию 29 V 1965 г.