

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
КОМИССИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ  
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

# ИССЛЕДОВАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

*(Отдельный оттиск)*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1965

*В. В. Афонин, Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич,  
Б. Н. Горожанкин, К. И. Грингауз, Р. Е. Рыбчинский,  
Н. М. Шютте*

## КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ФИЗИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПРОВЕДЕННЫХ В ИОНОСФЕРЕ НА СПУТНИКЕ «КОСМОС-2»

Спутник «Космос-2» был запущен 6.IV 1962 г. на орбиту с наклонением к экватору  $49^\circ$ , с перигеем  $\sim 212$  км и апогеем  $\sim 1546$  км. Большинство проведенных на спутнике экспериментов относилось к исследованиям ионосферы; другие опыты были связаны с этими исследованиями (к их числу относится, например, изучение фотоэмиссии электронов под действием ультрафиолетового излучения Солнца и ее изменений вдоль орбиты спутника). 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 с воспроизведением запомненной информации при пролете спутника вблизи радиоприемных пунктов. Измерения, связанные с частью опытов, производились только на тех участках орбиты спутника, на которых имелась непосредственная радиосвязь с Землей (т. е. их результаты не запоминались).

Как известно, концентрация заряженных частиц и химический состав области ионосферы, лежащей на высотах от 500 до 1000 км, впервые были исследованы в 1958 г. при помощи третьего советского спутника. При этом изучалась ионная компонента ионосферы (при помощи ионных ловушек [1] и ионного масс-спектрометра [2]); все полученные на третьем спутнике данные относились к освещенным Солнцем участкам орбиты.

Основными задачами опытов, поставленных на «Космосе-2», были:

а) получение сведений об областях ионосферы, обследованных на третьем спутнике, во время иной фазы солнечной деятельности (при уменьшении солнечной активности);

б) получение данных, относящихся, с одной стороны, к неисследованым на третьем спутнике областям ионосферы (выше 1000 км над земной поверхностью), а с другой — к ночным и сумеречным условиям;

в) получение данных об ионной температуре впервые примененным методом сотовых ионных ловушек с особо 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 его вектора скорости.

Кроме того, на спутнике были поставлены уже упоминавшиеся опыты по изучению эмиссии фотоэлектронов и некоторые опыты, имеющие методологическое назначение и связанные с уточнением влияния на измерения ряда факторов, степень воздействия которых на результаты измерений была не вполне ясна (например, влияние особенностей конструкции ионных ловушек и степени их удаления от корпуса спутника).

Разумеется, в рамках настоящего краткого обзора нет возможности сколько-нибудь подробно останавливаться на вопросах, связанных с методикой экспериментов и конструкцией приборов; некоторые сведения по этим вопросам, обойтись без которых нельзя, будут даны в соответствующих разделах доклада.

# I. 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, расположенных соответственно в каждом 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 спутнике были

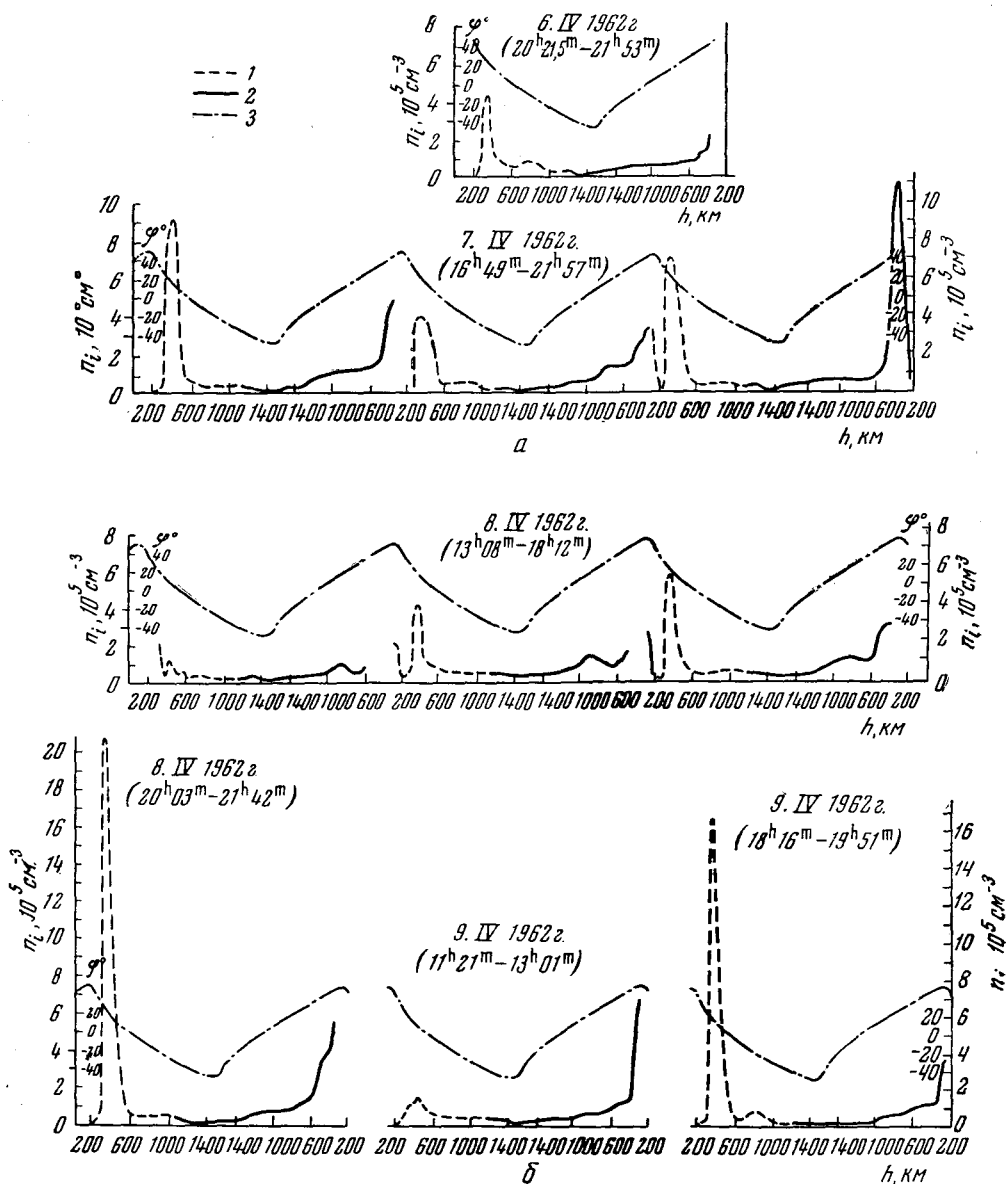


Рис. 1. Зависимость концентрации положительных ионов  $n_i$  (измеренной вдоль орбиты спутника) от высоты  $h$

1 — неосвещенные участки орбиты; 2 — освещенные участки, 3 — широта  $\varphi$   
 Время московское. Изменение высоты слева направо

также сферические трехэлектродные ионные ловушки, напряжения на внешних сетках которых менялись по закону биполярных пилообразных импульсов. Эти ловушки были удалены от поверхности спутника подобно тому, как это было сделано на третьем советском спутнике. Принцип работы сферических ловушек был изложен в [3] и более полно в [4]. Внутренние сетки во всех ловушках имели постоянный отрицательный потенциал относительно их коллекторов и предназначались для подавления фотоэмиссии и вторичной эмиссии электронов с коллекторов.

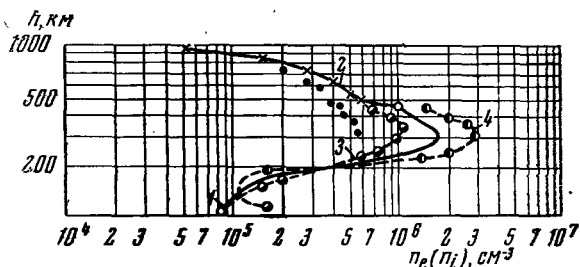


Рис. 2. Примерное распределение по высоте концентрации заряженных частиц в период, близкий к максимуму солнечной активности

Нижняя часть графика построена по данным одного из вертикальных пусков геофизических ракет (21. II 1958 г. кривая 1), верхняя часть (от 500 км и выше) — по данным измерений на части орбиты третьего советского спутника (19. V 1958 г. — кривая 2). Вблизи кривой нанесены некоторые точки, полученные на указанных высотах в 1958 г. в различное время на других геофизических ракетах или при других оборотах третьего спутника (3, 4); эти точки в известной степени характеризуют изменчивость ионосферы

На рис. 1, а и б приведены графики изменений концентрации положительных ионов  $n_i$  вдоль орбиты во время десяти оборотов спутника вокруг Земли по данным системы плоских ловушек. Метод обработки первичных данных измерений коллекторных токов плоских ловушек описан в [4] и основан на соображениях, следующих из [5] и [1].

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 рис. 1, а и б необходимо иметь в виду, что, хотя они изображены в системе координат  $(h, n_i)$ , они, 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) поскольку горизонтальная скорость спутника существенно больше вертикальной, подобные графики неизбежно отражают помимо высотного хода  $n_i$  горизонтальные неоднородности и широтные аномалии  $n_i$  и б) помимо высоты над Землей и широты вдоль орбиты непрерывно меняется еще и местное время. Тем не менее весьма интересно сравнить эти графики с аналогичными, полученными в период максимума солнечной деятельности в 1958 г.

На рис. 2 приведена сводная кривая высотного распределения концентрации заряженных частиц в ионосфере на высотах до 1000 км, построенная по данным измерений, проведенных в 1958 г. Особенностью этого распределения является весьма медленный спад концентрации заряженных частиц при росте высоты над главным максимумом ионизации в ионосфере. Как можно видеть из графиков рис. 1, а и б, уменьшение  $n_i$  с ростом высоты над главным максимумом ионизации при всех оборотах спутника «Космос-2» вокруг Земли носит один и тот же характер — оно происходит

значительно быстрее, чем по данным 1958 г. (см. рис. 2). На неосвещенной части орбиты происходит довольно резкое изменение крутизны кривых (см. рис. 1, а) на высотах  $\sim 600$  км; на освещенных частях орбиты наблюдается столь же резкое изменение крутизны, но на несколько больших высотах.

Так как, согласно [6], крутизна высотного хода концентрации заряженных частиц существенно зависит от средней массы ионов, то естественно было предположить, что областям весьма резких изменений крутизны графиков рис. 1, а и б 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  $\sim 1000$  км) в период максимума солнечной активности были измерения на третьем советском спутнике [2], в которых использовался прибор с диапазоном массовых чисел ионов от 6 до 48 а.е.м., т. е. ионы  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$  регистрироваться не могли. Хотя сами результаты опыта [2] не могут дать ответа на вопрос, содержались ли легкие ионы ( $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ ) на этих высотах, совместный анализ их с результатами измерений, выполненных при помощи сферических ионных ловушек на том же спутнике [1], приводит к выводу, что тогда на высотах до 1000 км действительно преобладали ионы  $\text{O}^+$  [2]. О том же свидетельствуют проведенные в 1960 г. американские опыты [7].

Коль скоро это так, то существенное изменение характера распределения  $n_i$  вдоль орбиты спутника при увеличении высоты над Землей за период с 1958 по 1962 г. естественно связать с уменьшением солнечной активности, происшедшим за это время. Уменьшение солнечной активности вызывает охлаждение верхней атмосферы и опускание слоя тяжелых ионов ( $\text{O}^+$ ), а следовательно, и перехода между областью преобладания тяжелых ионов и легких. Это предположение подтверждается соображениями, приведенными в следующем разделе доклада.

## II. Об ионном составе области перехода от преобладания тяжелых ионов ( $\text{O}^+$ ) к преобладанию легких

Как уже отмечалось в [1], анализ данных сферических ионных ловушек, установленных на спутнике «Космос-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

$$\sum_j n_j = n_i(h). \quad (a)$$

По крутизне верхнего линейного участка характеристики можно было найти сумму отношений парциальных концентраций ионов к соответствующим массовым числам

$$\sum_j \frac{n_j}{M_j} = F(h). \quad (б)$$

Если предположить, что в рассматриваемой области ионосферы присутствуют два сорта ионов, то решение системы из двух уравнений (а) и (б) позволяет найти распределение концентраций обеих компонент —  $n_1$  и  $n_2$ . Были рассмотрены две двухкомпонентные модели ионосферы, представляющиеся наиболее вероятными для высот 520—650 км. Решение

уравнений (а) и (б) в предположении кислородно-водородной 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 кислородно-гелиевая модель, которая привела к распределению относительных концентраций  $\text{He}^+$  и  $\text{O}^+$ , описанному в [4].

Однако объяснение распределения концентраций  $\text{O}^+$  и  $\text{He}^+$  в этой модели сталкивается с рядом трудностей, если считать, что в рассматриваемой области существует диффузионное равновесие. Вместе с тем нет оснований предполагать, что такое равновесие отсутствует по крайней мере для тяжелых ионов. Можно показать, что трехкомпонентная модель переходной области (ионы  $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ ) удовлетворяет всем экспериментальным данным, полученным в этой области на «Космос-2», к тому же при этих тяжелых ионах ( $\text{O}^+$ ) находятся в диффузионном равновесии.

Чтобы рассчитать трехкомпонентную модель, необходимо третье уравнение, дополняющее систему уравнений (а) и (б). Такое уравнение можно получить, используя высотное распределение  $n_i$  и формулу

$$\frac{\partial n_e}{n_e} = \frac{\partial n_j}{n_j} = - \frac{m_+ g}{2kT} dz. \quad (1)$$

выведенную Менджем [6] для квазинейтральной ионосферы ( $n_e = n_i$ ), состоящей из однозарядных ионов, при условии, что  $T_i \approx T_e \approx T$ . Если предположить, что это условие выполняется и величина  $T$  известна, то из уравнения (1) можно определить среднюю массу  $m_+$ :

$$\frac{\sum m_j n_j}{\sum n_j} = m_+(h). \quad (в)$$

Решая совместно уравнения (а) — (в) для трехкомпонентного случая, можно получить распределение концентраций  $\text{He}^+$ ,  $\text{O}^+$  и  $\text{H}^+$  с высотой. Как следует из материалов, содержащихся в обзорном докладе, сделанном на настоящей конференции [8], для апреля 1962 г. в экваториальных широтах (над которыми расположена рассматриваемая область перехода от тяжелых ионов к легким) и соответствующих этой области высотам, в ночное время ( $T_e \approx T_i$ ) можно определить два предельных значения температуры — 500—700° К.

На рис. 3 показаны распределения  $\text{O}^+$ ,  $\text{He}^+$  и  $\text{H}^+$ , полученные для трехкомпонентной модели изотермической ионосферы при  $T = 500^\circ \text{К}$ . Для  $T = 700^\circ \text{К}$  распределения имеют аналогичный вид, с той лишь разницей, что переход от преобладания кислородных ионов к преобладанию  $\text{He}^+$  происходит на высотах  $\sim 630 \text{ км}$ .

Предположение об изотермичности ионосферы использовалось постольку, поскольку работа [9], по результатам которой оценивались температу-

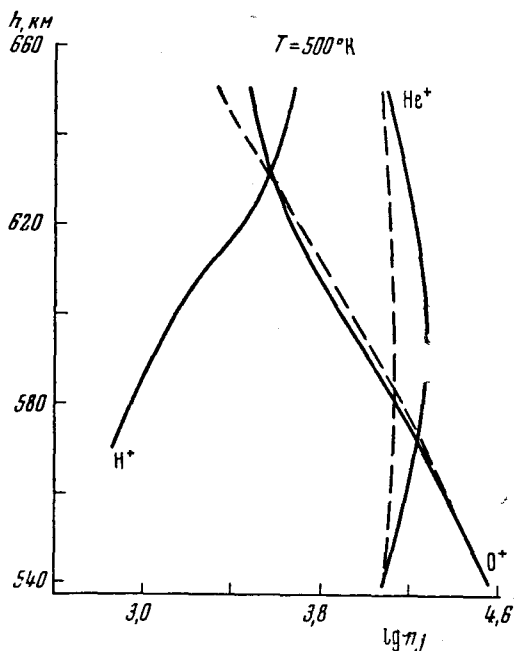


Рис. 3. Трехкомпонентная модель переходной области по данным спутника «Космос-2»

Штриховой линией показаны теоретические кривые, построенные в предположении, что кислород и гелий находятся в диффузионном равновесии.  $n_j$  — парциальная концентрация ионов одной массы

ры (так же как и какие-либо другие работы), не позволяла получить однозначные данные о высотных градиентах температуры и судить о надежности приведенных в ней значений градиентов. В неизотермической же ионосфере с градиентом  $\sim 0,5-1^\circ \text{ км}^{-1}$  будет справедлива промежуточная модель, совпадающая на высотах 500 и 650 км с предельными, рассчитанными для  $T = 500$  и  $700^\circ \text{ К}$ .

Следует подчеркнуть то обстоятельство, что в экваториальных широтах вертикальное распределение (1) соответствует установлению диффузионного равновесия в объеме, в котором диффузия происходит в поперечном к магнитному полю направлении и поэтому может дать значения  $T$ , отличающиеся от продольных, определяемых из распределения вдоль поля. Для «Космоса-2» такое продольное распределение не было построено за недостатком данных. Оценки же, которые удалось сделать, свидетельствуют, что продольная температура на высоте 500 км равнялась  $\sim 700-800^\circ \text{ К}$ . Этот результат, как показывает сравнение с данными работы [10], в которой исследуется именно продольное распределение, не должен значительно изменить качественную картину, здесь нарисованную.

Рассчитанная трехкомпонентная модель, так же как и описанная в [4] двухкомпонентная, говорит о существовании над областью, где преобладают ионы  $\text{O}^+$ , области, в которой преобладают ионы гелия. Следует отметить, что существует неплохое согласие между результатами, относящимися к ионному составу, полученными при помощи «Космоса-2», и данными англо-американского спутника «Ариэль-1», запущенного вскоре после «Космоса-2», в конце апреля 1962 г. По измерениям на «Ариэле-1» ночью в низких широтах ионы гелия преобладают над остальными ионами в области высот 500—1000 км [9].

### III. 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 [11]. В связи с этим данные этих экспериментов относятся лишь к участкам орбиты, лежащим в интервале высот от  $\sim 212$  до  $\sim 600 \text{ км}$ .

В плоскости одного из сечений спутника, перпендикулярных его продольной оси, вблизи поверхности были размещены два цилиндрических зонда диаметром 1 см и длиной 20 см, таким образом, что центральный угол между ними был равен  $90^\circ$ . Третий зонд таких же размеров был установлен на расстоянии 10 см от поверхности спутника в плоскости, перпендикулярной плоскости первых двух. Зонды размещались 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 импульсов. На Землю передавались одновременно как величины  $V_p$ , так и величины зондовых токов. Обработка зондовых характеристик и определение по ним концентрации  $n_e$  и температуры  $T_e$  электронов велись классическими способами, описанными в [12]. Вращение спутника вызывало модуляцию зондовых токов.

На рис. 4 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

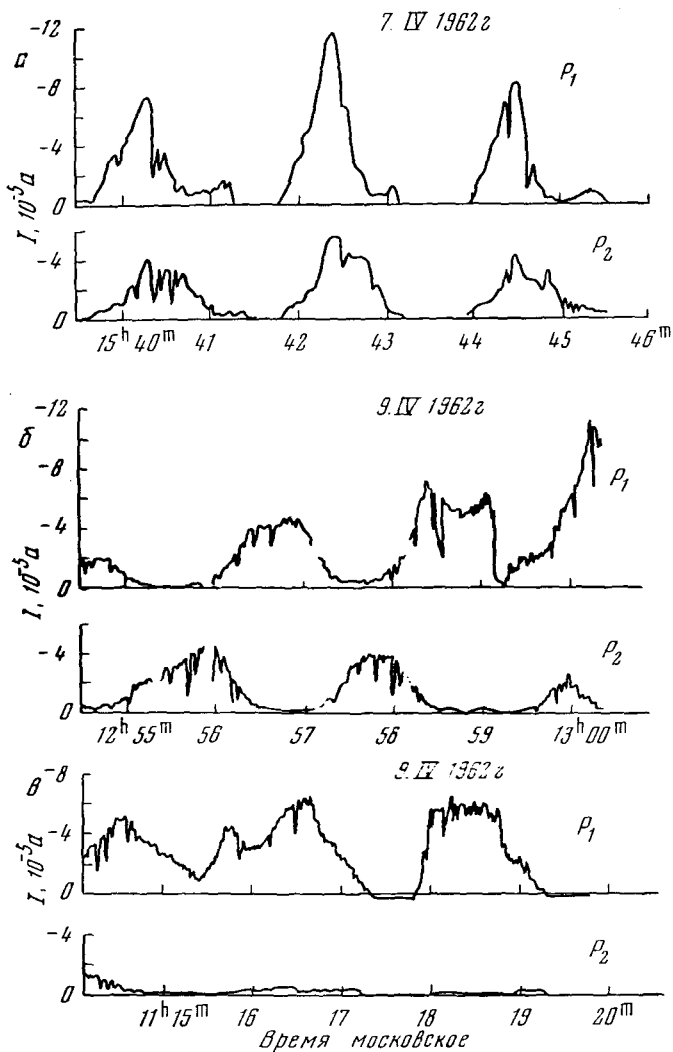


Рис. 4. Огибающие максимальных значений электронных зондовых токов

$P_1, P_2$  — обозначения первого и второго зондов

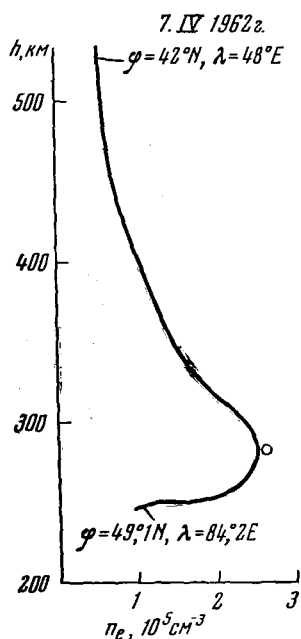


Рис. 5. Зависимость электронной концентрации  $n_e$ , измеренной при помощи зондов Лэнгмюра вдоль участка орбиты спутника 7.IV 1962 г. от высоты  $h$

Кружок — значение  $n_e$  в максимуме слоя  $F$ , рассчитанное по данным ионосферных станций.  
 $\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота



ниже уровня чувствительности усилителей зондовых токов. При этом в некоторых случаях максимумы электронных токов обоих зондов совпадают во времени (рис. 4, а), а в другие интервалы времени максимум тока в одном зонде соответствует минимуму в другом (рис. 4, б). Имеются случаи, когда показания одного из зондов весьма малы в течение сравнительно длительных интервалов времени (рис. 4, в).

Анализ зарегистрированных одновременно ионных токов в системе из восьми плоских ионных ловушек, установленных на спутнике (см. [13]), показал, что минимальные значения токов каждого зонда не всегда соответствуют пребыванию зонда в ионной тени, образующейся позади спутника (в направлении, противоположном направлению его скорости), хотя период изменений зондовых токов, как видно, например, на рис. 4, определяется вращением спутника. Мы думаем, что эти изменения зондовых токов в основном связаны с изменениями ориентации зондов относительно геомагнитного поля. В зависимости от этой ориентации собирающая электроны эффективная поверхность зонда существенно меняется, будучи максимальной, когда ось зонда перпендикулярна магнитному полю, и минимальной, когда ось зонда совпадает с направлением магнитного поля.

На рис. 5 приведены значения  $n_e$ , полученные при помощи зондов Лэнгмюра на участке орбиты спутника 7.IV 1962 г. (высоты спутника уменьшались от 600 до 212 км). На том же рисунке показана величина  $n_e$  в максимуме области  $F'$ , определенная по критической частоте, измеренной на ионосферной станции, расположенной вблизи от проекции на Землю участка орбиты, на котором проводились зондовые измерения. Дневные измерения  $T_e$  за время полета «Космоса-2» дали значения, лежащие в пределах от 1800 до 3000° К (см. таблицу).

Таблица 1

Некоторые результаты измерений электронной температуры  $T_e$   
при помощи зондов Лэнгмюра

Дата	Время, час, мин	Высо- та, км	Широ- та	Дол- гота	$T_e$ , °К	Дата	Время, час, мин	Высо- та, км	Широ- та	Дол- гота	$T_e$ , °К	
7.IV 1962	16 42	288	48°N	71°E	3150	8.IV 1962	13 09	299	48,27	121,01	1800	
	16 42	285	48,4	72	3000		13 09	298	48,3	121,3	2200	
	18 22	343	45	32	3000		13 11	262	49,1	131,3	1800	
	18 23	317	47	37	2900		14 43	528	33	59,1	2600	
	18 24	297	48	43	3200		14 49	339	46,76	85,85	2700	
	18 24	300	48	42	2500		14 50	336	46,9	86,5	2800	
	20 08	265	48,9	27	1800							
	20 08	264	49	27,3	2500							
	20 08	262	49,1	28	2300							

На рис. 6 приведены одновременно измеренные характеристики зонда и зависимость от времени коллекторного тока поной ловушки «сотового» типа. Результаты расчета по характеристикам дают значения электронной температуры, более чем в 2 раза превышающие значения ионной температуры.

Это свидетельствует об отсутствии термического равновесия в ионосфере на высотах слоя  $F_2$ .

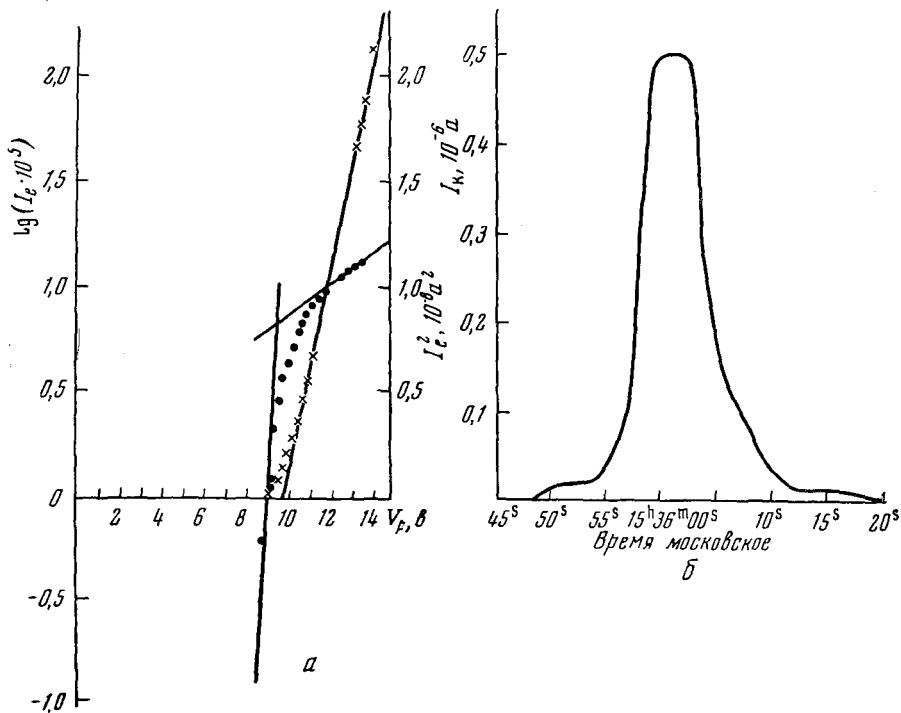


Рис. 6. Экспериментальные записи токов зонда Лэнгмюра и ионной ловушки «сотового» типа, полученные одновременно. Полулогарифмическая характеристика и зависимость  $I_e$  от  $V_p$  для зонда Лэнгмюра (а) и зависимость от времени коллекторного тока ионной ловушки «сотового» типа (б)

#### IV. Определение температуры положительных ионов при помощи ловушек сотового типа

Ионная ловушка сотового типа, впервые примененная на «Космосе-2» (рис. 7), представляет собой трехэлектродное устройство, состоящее из коллектора, антифотоэлектронной сетки, служащей для подавления фото-

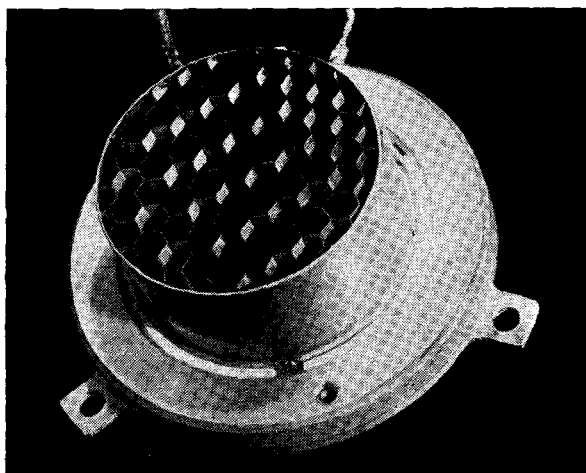


Рис. 7. Ионная ловушка сотового типа

тока с поверхности коллектора, и внешней сотовой насадки, соединенной с корпусом спутника. Последняя состоит из набора примыкающих одна к другой шестигранных трубок-«сот». Очевидно, что направленные свойства такой ловушки остаются такими же, как и у одной трубки, а коллекторный ток возрастает пропорционально числу трубок. Максимальный ток в такой ловушке имеет место при совпадении вектора скорости набегающего потока ионов с нормалью к коллектору. При достаточно узких трубках ловушка может быть компактной и иметь высокую чувствительность к ориентации относительно вектора скорости. Возможности применения узкой трубки для измерений в ионосфере посвящена статья [14], в которой определена зависимость тока нейтральных частиц от температуры и угла между вектором скорости и осью дифференциально узкой трубки.

При данной форме трубки на вид зависимости коллекторного тока от ориентации ловушки относительно вектора набегающего потока существенное влияние оказывает температура ионов  $T_i$ . Коллекторный ток ловушки сотового типа можно представить в виде

$$I_k = I_{k.0} F\left(\psi, \frac{R}{L}, T_i\right), \quad (2)$$

где  $I_{k.0} = eSVn_i$  — ток ловушки при  $T_i = 0$  и векторе скорости, совпадающем с осью трубок;  $e$  — заряд электрона (ионы предполагаются однозарядными);  $V$  — скорость спутника,  $S$  — сумма поперечных сечений всех трубок;  $F$  — функция, определяющая зависимость коллекторного тока от ориентации и температуры;  $\psi$  — угол между осью ловушки и вектором скорости спутника;  $R/L$  — отношение поперечного размера трубки к продольному.

Для определения вида функции  $F$  реальная шестигранная трубка была заменена прямым круговым цилиндром с площадью основания, равной площади входного отверстия трубки. При  $T_i = 0$  функция  $F$  легко вычисляется в аналитическом виде:

$$F(\psi, R/L, T_i = 0) = \frac{2}{\pi} \left( \arccos \frac{L}{2R} \operatorname{tg} \psi - \frac{L}{R} \operatorname{tg} \psi \sqrt{1 - (L/2R \operatorname{tg} \psi)^2} \right) \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \psi \leq \frac{2R}{L}. \quad (4)$$

В случае  $T_i \neq 0$  ионы имеют компоненты скорости, перпендикулярные вектору скорости спутника, вследствие чего вид функции  $F$  изменится. Чтобы определить реальный вид функции  $F$ , необходимо учитывать как тепловое движение ионов, так и искривление траекторий ионов при движении их в электрических полях в слое объемного заряда, окружающего спутник, и внутри ловушки. Расчет функции  $F$  проводился без учета влияния потенциалов, т. е. вычислялся ток нейтральных частиц с массой и температурой, равной массе и температуре ионов. Наличие электрических полей приводит при отрицательном потенциале корпуса спутника к некоторому расширению функции  $F$ .

Функция  $F$  при  $T_i \neq 0$  представляет собой пятикратный интеграл, который в аналитическом виде не выражается. Поэтому его вычисление проводилось на ЭЦВМ. Результаты расчета для ловушки, установленной на спутнике «Космос-2», представлены на рис. 8. На этом же рисунке показана и кривая для  $T_i = 0$ . Из рисунка видно, что вследствие теплового движения кривые  $F(\psi)$  расширяются. Кроме того, важной особенностью кривых  $F(\psi)$  является сильная зависимость значений  $F(\psi = 0)$  от температуры. Например, при  $T_i = 2000^\circ \text{K}$  максимально возможный ток в ловушке (при совпадении осей трубок с вектором скорости спутника) примерно в 4 раза меньше, чем при  $T_i = 0$ . Сильная зависимость  $F(\psi = 0)$  от  $T_i$  объясняется совместным влиянием теплового движения и способности узкой трубки выделять только те частицы, векторы скорости которых составляют с осью трубки небольшой угол. При малой тепловой скорости

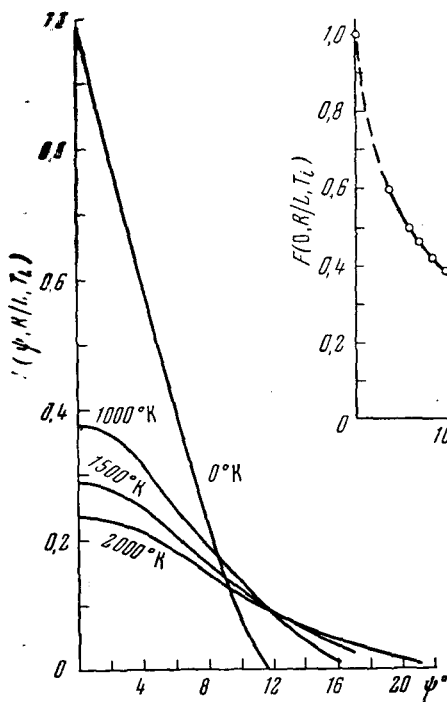


Рис. 9. Расчетная зависимость функции  $F$  от температуры для  $\psi = 0$  и тех же значений параметров, что и для рис. 8

Значение  $F$  при  $T_i = 0$  получено по формуле (3), остальные значения рассчитаны с помощью ЭЦВМ



Рис. 8. Расчетные кривые для функции  $F(\psi, R/L, T_i)$ , определяющей зависимость коллекторного тока ловушки «сотового» типа от ее ориентации  $\psi$  относительно вектора скорости  $V$  и температуры  $T_i$ . Расчеты выполнены для ионов атомарного кислорода, скорости спутника  $V = 7,5 \text{ км} \cdot \text{сек}^{-1}$  и отношения  $R/L = 0,1057$

частицы «вносятся» в трубку и попадают на коллектор, не успев достигнуть стенок. При возрастании температуры увеличиваются тепловые скорости и число частиц, успевающих достигнуть стенок за время пролета, в результате чего коллекторный ток уменьшается. Зависимость  $F(\psi = 0)$

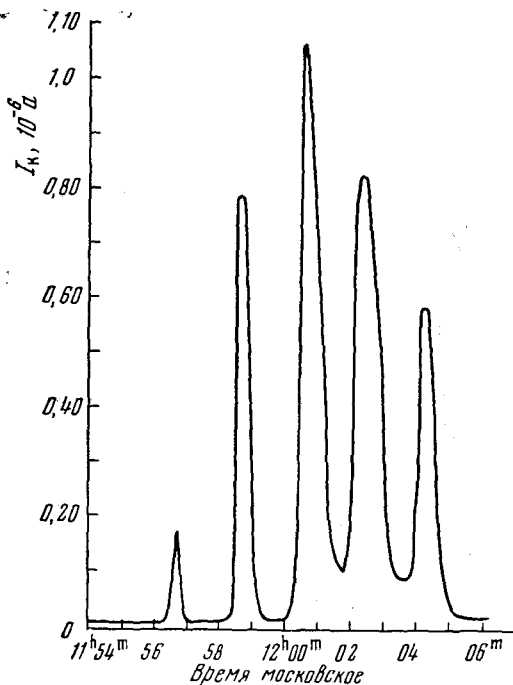


Рис. 10. Экспериментальная запись коллекторного тока ловушки сотового типа, полученная во время полета спутника

от температуры показана на рис. 9 ( $m_i = 16$  а. е. м.,  $V = 7,5$  км·сек<sup>-1</sup>,  $R/L = 0,1057$ ).

Из изложенного выше ясно, что экспериментальные данные о зависимости  $F(\psi, R/L, T_i)$  могут быть использованы для определения  $T_i$  [путем сравнения их с расчетными значениями, если известны  $m_i$  (масса иона),  $V$  и  $R/L$ ]. Для определения  $T_i$  можно также использовать экспериментальные значения коллекторного тока сотовой ловушки  $I_K$  при  $\psi = 0$ , если величина  $n_i$  определена независимо; это позволяет определить экспериментальное значение  $F(\psi = 0)$  как отношение

$$I_{K \max} / I_{K0} = I_{K \max} / eSVn_i.$$

Таким образом,  $T_i$  можно определять двумя методами: сравнением форм кривых и пользуясь величиной  $I_K$  ( $\psi = 0$ ) и приведенными на рис. 9 значениями  $F(\psi = 0)$ .

На рис. 6, 10 приведены примеры экспериментальных записей коллекторных токов ловушек сотового типа, полученные во время полета спутника «Космос-2».

При определении температуры указанными выше способами производилась оценка влияния неучтенных в расчетах электрических полей. С учетом этого влияния определенная по кривой на рис. 6 температура лежит в пределах  $T_i = (1300 \pm 200)^\circ \text{K}$ .

## У. Измерение фотоэмиссии электронов вдоль орбиты спутника

Для измерения фотоэмиссии электронов с металлических поверхностей на «Космосе-2» были использованы так называемые анализаторы фотоэлектронов типа описанных в работе [15]. Конструктивно анализатор фотоэлектронов представлял собой обычную полусферическую трехэлектродную ловушку (см., например, [16]), коллектор которой в данном случае являлся эмиттером фотоэлектронов. Всего на спутнике было установлено три анализатора фотоэлектронов так, что нормали к ним составляли три взаимно-перпендикулярных направления. Напряжения на электродах фотоэмиттеров были таковы, что ни положительные ионы с тепловыми скоростями, ни электроны с тепловыми скоростями из окружающей среды не могли достигнуть эмиттера. Измерение фотоэмиссии с поверхности металла под действием солнечного излучения представляет значительный интерес с точки зрения выяснения роли фотоэмиссии в установлении равновесного заряда тела. Последняя не очень велика в областях ионосферы с большой концентрацией заряженных частиц, но на высотах, на которых концентрация падает, фотоэмиссия электронов с поверхности космического аппарата и отдельных элементов приборов может существенным образом влиять на результаты исследований окружающей среды зондовыми методами.

Кроме того, изучение энергетического распределения фотоэлектронов является источником сведений о потоках солнечных фотонов.

Измерение фотоэмиссии на спутнике «Космос-2» проводилось только в режиме непосредственной радиотелеметрической передачи и относится к области высот  $\sim 212$ — $600$  км. Имеющиеся в настоящее время данные о поглощении ультрафиолетового излучения атмосферой Земли относятся к области высот ниже  $235$  км [17]. Поэтому представляет определенный интерес получение данных об интегральном поглощении солнечного излучения на высотах, больших  $200$  км.

Известно, что ток фотоэмиттера в отсутствие тормозящего электроны

электрического поля (так называемый фототок насыщения) пропорционален интенсивности вызывающего его потока излучения. Поэтому, не анализируя пока полученные вольт-амперные характеристики, рассмотрим изменение токов насыщения в анализаторах фотоэлектронов при движении спутника в диапазоне высот от 550 до 220 км.

Измерение изменения интегрального потока солнечного излучения при помощи ориентированного на Солнце фотоэммитера не представляет

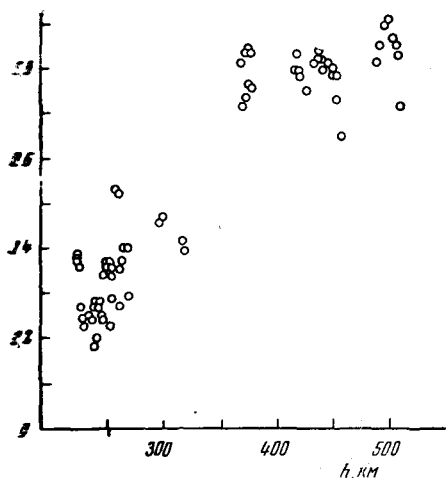


Рис. 11. Зависимость тока насыщения фотоэммитера от высоты  $h$

затруднений. Для неориентированного относительно направления на Солнце спутника эта задача усложняется. В результате обработки полученных зависимостей фототоков насыщения эмиттеров от их ориентации относительно Солнца было установлено, что для тех моментов времени, когда токи всех трех эмиттеров отличны от нуля, фототок каждого эмиттера спутника «Космос-2» в первом приближении можно считать пропорциональным квадрату косинуса угла падения излучения:

$$I_{1 \max} \approx I_{0 \max} \cos^2 \varphi_1;$$

$$I_{2 \max} \approx I_{0 \max} \cos^2 \varphi_2;$$

$$I_{3 \max} \approx I_{0 \max} \cos^2 \varphi_3;$$

т. е.

$$I_{0 \max} = I_{1 \max} + I_{2 \max} + I_{3 \max},$$

где  $I_{0 \max}$  — ток фотоэммитера, соответствующий нормально падающему потоку излучения. Таким образом, при наличии трех одинаковых анализаторов фотоэлектронов, расположенных по трем взаимно-перпендикулярным направлениям, можно определить значение тока насыщения анализатора, соответствующее нормальному падению потока излучения на эмиттер. Для тех моментов времени, когда значения токов всех эмиттеров отличны от нуля. При этом ориентация каждого эмиттера относительно направления на Солнце может быть любой.

Зависимость тока насыщения фотоэммитера от высоты показана на рис. 11. Уменьшение фототока с высотой, обусловленное, очевидно, погло-

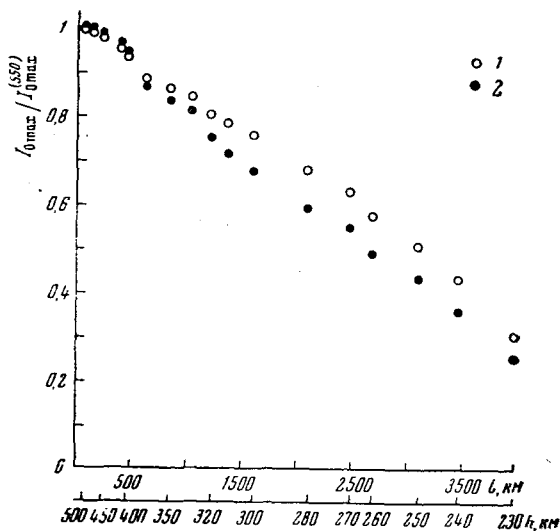


Рис. 12. Относительное изменение тока насыщения  $I_{0 \max}$  в зависимости от расстояния по лучу  $l$

$I_{0 \max}(550)$  — величина  $I_{0 \max}$  на высоте 550 км, 1 — по данным одного из оборотов спутника 8.IV 1962 г., 2 — по данным шести оборотов спутника 8—9.IV 1962 г.,  $l$  — расстояние по лучу, отсчитываемое от высоты 550 км до спутника;  $h$  — высота спутника над Землей

щением солнечного излучения, по существу является изменением фототока вдоль орбиты в связи с увеличением расстояния по лучу  $l$ , что показано на рис. 12. Видно, что, несмотря на существенно различный характер поглощения отдельных участков и линий спектра солнечного излучения различными областями ионосферы (в зависимости от состава, плотности и т. д.), ослабление интегрального потока излучения широкого спектрального диапазона, определенное по значениям токов насыщения анализаторов фотоэлектронов в области высот 220—550 км, носит в целом линейный характер. Следует отметить, что начиная с 293 км угол возвышения

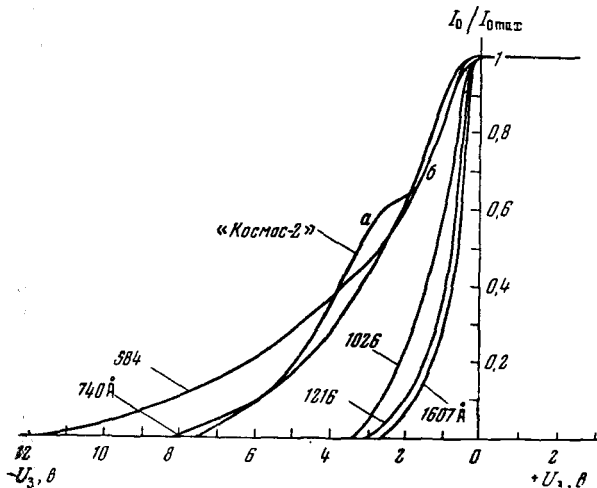


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики анализатора фотоэлектронов, полученные в лабораторных условиях при облучении монохроматическим излучением различных длин волн, и вольт-амперная характеристика фототока, полученная на спутнике «Космос-2»;  $I_{0max}$  — фототок насыщения при нормальном падении излучения;  $I_0$  фототок при задерживающих потенциалах и нормальном падении излучения;  $U_3$  — задерживающий потенциал

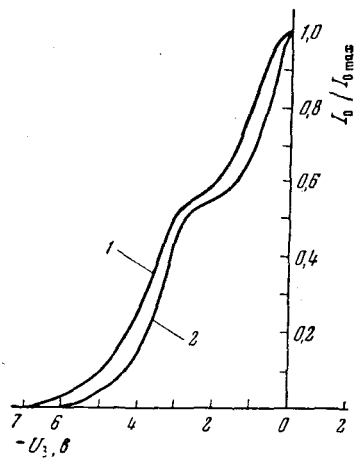


Рис. 14. Вольт-амперные характеристики фотоэммитера на различных высотах  
1 —  $h = 525$  км, 2 —  $h = 300$  км,  $I_0$ ,  $I_{0max}$ ,  $U_3$  те же, что на рис. 13

Солнца над горизонтом спутника принимает отрицательные значения, т. е. начиная с этой высоты солнечное излучение проходило некоторый интервал высот дважды.

Одна из полученных за время полета спутника «Космос-2» вольт-амперных характеристик зависимости фототока анализатора от напряжения на его внутренней сетке показана на рис. 13. Форма этой характеристики существенно отличается от полученных во время аналогичных экспериментов Хинтереггером и др. [18, 15]. В лабораторных условиях были сняты так называемые градуировочные вольт-амперные характеристики при облучении экспериментальной модели анализатора фотоэлектронов монохроматическим излучением различных длин волн. Эти лабораторные вольт-амперные характеристики тоже показаны на рис. 13. Из рисунка видно, что участок с пониженной крутизной  $a-b$ , присутствующий абсолютно на всех полетных характеристиках, отсутствует на лабораторных. Это означает, что зарегистрированное анализаторами спутника солнечное излучение не определяется, по-видимому, полностью излучением указанных длин волн. Сравнение имеющихся лабораторных характеристик с аналогичными характеристиками Хинтереггера и др. [15] и другими экспериментальными результатами, полученными при облучении различных металлов далеким ультрафиолетом [19], свидетельствует о том, что нет никаких оснований сомневаться в достоверности лабораторных вольт-амперных характеристик. В то же время, анализ работы аппаратуры на спутнике

«Космос-2» показал, что необычный вид зарегистрированных характеристик не может быть следствием аппаратного эффекта. Все это заставляет думать, что полученная форма вольт-амперных характеристик связана с природой падающего излучения. Указанием на это может служить тот факт, что участок с пониженной крутизной появляется на вольт-амперных характеристиках всех трех анализаторов фотоэлектронов только при одном определенном значении задерживающего напряжения относительно потенциала эмиттера, но при различных задерживающих напряжениях относительно корпуса спутника и потенциала внешней сетки анализатора. Было высказано предположение, что в данном случае значительная доля фототока была обусловлена мягким рентгеновским излучением. Характер внешнего фотоэффекта под действием мягкого рентгеновского излучения подробно исследован в целом ряде экспериментов [20], которые показывают, что фототок при сравнительно больших энергиях квантов имеет много общего со вторичной эмиссией. Поэтому было предположено, что нижняя часть вольт-амперной характеристики, в основном до участка  $a - b$ , соответствующая фотоэлектронам с максимальными скоростями, представляет собой преимущественно спектр вторичных электронов, возбужденных первичным рентгеновским фотоэлектроном при прохождении им зоны выхода медленных электронов.

Высказанная гипотеза встречает серьезные возражения, так как довольно трудно объяснить тот факт, что во время экспериментов Хинтереггера и др. в 1958 и 1959 гг., соответствовавших периоду максимума солнечной активности, когда потоки рентгеновского излучения более интенсивны, подобного явления не наблюдалось. Можно предположить, что причиной является различное состояние поверхностей эмиттеров во время этих экспериментов, а именно, что поверхность эмиттеров «Космоса-2» обеспечивала значительно более высокий выход вторичных электронов. Можно также предположить, что обсуждаемая особенность полученных вольт-амперных характеристик обусловлена одновременным облучением анализатора фотоэлектронов потоками ультрафиолетового излучения и корпускулярными потоками с энергиями, позволяющими последним доходить до эмиттера. Однако подобие вольт-амперных характеристик, полученных на различных высотах и широтах и при различных зенитных расстояниях, и отсутствие токов, зарегистрированных в анализаторах в ночное время, показывает, что и это объяснение наталкивается на значительные затруднения. Если же предположить, что высказанная ранее гипотеза справедлива, то это означает, что в ультрафиолетовой части солнечного спектра преобладает излучение с длинами волн  $\lambda \lambda > 900 \div \div 1000 \text{ \AA}$ . Поток излучения в области  $1216 \text{ \AA}$  на высоте  $500 \text{ км}$  был оценен как  $\sim 1 \pm 0,5 \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ , а потоки излучения в области  $584 - 1 \text{ \AA}$  — порядка  $\sim 10^{10} \text{ фотонов} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ .

Форма вольт-амперной характеристики почти не меняется по мере снижения спутника в более низкие слои атмосферы и показана на рис. 14.

Таким образом, очевидно, что в области высот  $550 - 300 \text{ км}$  интегральный коэффициент поглощения солнечного излучения еще довольно велик и при наклонном падении солнечных лучей ослабление излучения в этой области высот оказывается существенным.

## VI. 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 плоских ионных ловушек, описанная в разделе I (см. [4, 5]). Заметим, что несколько позже запуска «Космоса-2» в мае 1962 г. в Австралии была запущена английская ракета «Блэк Найт», в которой для



определения ориентации относительно вектора скорости использовалась система плоских ионных зондов, т. е. тот же физический принцип [21]. Коллекторный ток на некоторый участок безграничной плоской ионной ловушки при отрицательном потенциале корпуса спутника определяется выражением [5]

$$I_K = \alpha e S V_s n_i F(\psi, T_i) = I_{K.0} F(\psi, T_i), \quad (5)$$

где  $\alpha$  — суммарная прозрачность сеток;  $S$  — площадь коллектора;  $\psi$  — угол между нормалью к коллектору и вектором скорости спутника.

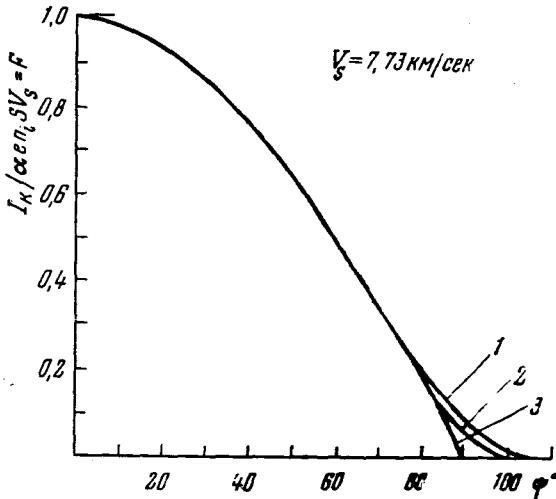


Рис. 15. Зависимость функции  $F$  плоской ионной ловушки от угла  $\psi$  между нормалью к ее коллектору и вектором скорости спутника  
1 —  $T_i = 5000^\circ \text{K}$ ; 2 —  $T_i = 1800^\circ \text{K}$ ; 3 —  $T_i = 0^\circ \text{K}$

На рис. 15 показаны зависимости  $F(\psi, T_i) = \alpha e n_i S V$  от угла  $\psi$  для  $T_i = 0, 1800$  и  $5000^\circ \text{K}$  (кривые 3, 2 и 1 соответственно). При  $T_i = 0$  функция  $F$  совпадает с  $\cos \psi$ . При  $T_i \neq 0$  косинусоидальным приближением можно пользоваться в меньшем интервале значений  $\psi$ . Следует отметить, что кривые, показанные на рис. 15, относятся к плоской ионной ловушке как части безграничной электрически однородной плоскости. В нашем случае ловушки установлены на корпусе, имеющем конечные размеры. Поэтому пренебрегать краевыми эффектами нельзя, так как при больших величинах

угла  $\psi$  ток реальной ловушки превышает ток на соответствующий участок 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 ионных ловушек, установленных на спутнике «Космос-2», косинусоидальное приближение справедливо для  $|\psi| \leq 45 \div 50^\circ$ :

$$I_K = I_{K.0} \cos \psi. \quad (6)$$

Это приближение было использовано для определения ориентации вектора скорости относительно трех выбранных координатных осей спутника. Используя в каждый момент времени значения токов трех ловушек, нормали которых некопланарны, можно легко вычислить ориентацию вектора скорости относительно корпуса спутника.

Для повышения точности определения ориентации необходимо решать уравнения движения спутника как свободного тела и сравнивать решение с показаниями ловушек. Подобная обработка данных системы плоских ловушек спутника «Космос-2» показала, что если за меру точности определения ориентации вектора скорости принять величину отклонения суммы квадратов направляющих косинусов от единицы, то такой метод дает возможность определять ориентацию с точностью не хуже  $\pm 3\%$ . Однако такой метод требует большого объема вычислительных работ.

Следует отметить, что точность определения ориентации вектора скорости по отношению к спутнику в описываемых опытах была несколько понижена не вполне удачным расположением 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 ориентации. Если этого избежать, то точность определения направления вектора скорости может быть еще повышена.

### Заключение

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

В области широт от  $49^{\circ}$  N до  $49^{\circ}$  S и в области высот от  $\sim 212$  до  $\sim 1550$  км была измерена концентрация положительных ионов. На высотах от  $\sim 212$  до  $\sim 600$  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. Эти изменения позволили оценить интегральное поглощение ультрафиолетового излучения Солнца в этой области ионосферы. Наконец, насколько нам известно, впервые было осуществлено определение ориентации космического аппарата относительно вектора его скорости при помощи ионных датчиков.

Этими результатами, однако, не исчерпывается значение проведенных на «Космосе-2» экспериментов. Результаты анализа их весьма полезны для подготовки новых опытов на космических аппаратах в ионосфере.

### Литература

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 63.
2. В. Г. Истомин. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 171.
3. К. И. Грингауз, М. Х. Зеликман. УФН, **63**, вып. 16, 239, 1957.
4. К. И. Грингауз, Б. Н. Горожанкин, Н. М. Шютте, Г. Л. Гдалевич. Докл. АН СССР, **151**, № 3, 560, 1963.
5. E. C. Whipple. J. Proc. IRE, **47**, 2023, 1959.
6. P. M. ange. J. Geophys. Res., **65**, 11, 1960.
7. R. E. Bourdeau, E. C. Whipple. J. Geophys. Res., **67**, 467, 1962.
8. Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич. Космические исследования, **3**, № 6, 1965 (в печати).
9. P. I. Bowen, R. L. F. Boyd, C. L. Henderson, W. I. Raitt, A. P. Willmore. Proc. Roy. Soc. A, **281**, 504, 1964.
10. I. I. Angerami, I. O. Thomas. J. Geophys. Res., **69**, N 21, 4537, 1964.
11. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, Г. Л. Гдалевич, В. В. Афонин, Р. Ye. Rybchinsky, N. M. Shutte. Space Res., **5**, 733, 1965.
12. N. M. Mott-Smith, J. Langmuir. Phys. Rev., **28**, 727, 1926.
13. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, N. M. Shutte, G. L. Gdalevich. Space Res., **4**, 473, 1964.
14. А. Я. Прессман, С. П. Яценко. Геомагнетизм и аэрономия, **1**, № 1, 49, 1961.
15. H. E. Hinteregger, K. Damon, L. A. Hall. J. Geophys. Res., **64**, 8, 961, 1959.
16. К. И. Грингауз. Space Res., **2**, 539, 1961.
17. H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **66**, 2367, 1961; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **68**, 6413, 1963; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **75**, 105, 1965; H. E. Hinteregger, L. A. Hall, G. Schmidtke. Space Res., **5**, 1175, 1965.
18. H. E. Hinteregger. Space Res., **1**, 304, 1960.
19. H. E. Hinteregger. Phys. Rev., **96**, 538, 1954; W. Walker, G. Weissler. Phys. Rev., **97**, N 4, 1178, 1955.
20. А. С. Ганеев, И. М. Израилев. ЖТФ, **31**, № 3, 376, 1961; Н. Г. Находкин, П. В. Мельник. Радиотехника и электроника, **6**, № 7, 1209, 1961; **7**, № 2, 303, 1962; М. А. Румши др. Физика твердого тела, **4**, № 1, 69, 1962.
21. E. Norman. A. P. Willmore. Planet. Space Sci., **13**, 1, 1965.

Следует отметить, что точность определения ориентации вектора скорости по отношению к спутнику в описываемых опытах была несколько понижена не вполне удачным расположением 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 ориентации. Если этого избежать, то точность определения направления вектора скорости может быть еще повышена.

### Заключение

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

В области широт от  $49^{\circ}N$  до  $49^{\circ}S$  и в области высот от  $\sim 212$  до  $\sim 1550$  км была измерена концентрация положительных ионов. На высотах от  $\sim 212$  до  $\sim 600$  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. Эти изменения позволили оценить интегральное поглощение ультрафиолетового излучения Солнца в этой области ионосферы. Наконец, насколько нам известно, впервые было осуществлено определение ориентации космического аппарата относительно вектора его скорости при помощи ионных датчиков.

Этими результатами, однако, не исчерпывается значение проведенных на «Космосе-2» экспериментов. Результаты анализа их весьма полезны для подготовки новых опытов на космических аппаратах в ионосфере.

### Литература

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 6. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 63.
2. В. Г. Истомин. В сб. «Искусственные спутники Земли», вып. 4. Изд-во АН СССР, 1961, стр. 171.
3. К. И. Грингауз, М. Х. Зелкман. УФН, **63**, вып. 16, 239, 1957.
4. К. И. Грингауз, Б. Н. Горожанкин, Н. М. Шютте, Г. Л. Гдалевич. Докл. АН СССР, **151**, № 3, 560, 1963.
5. E. C. Whipple. J. Proc. IRE, **47**, 2023, 1959.
6. P. Mangle. J. Geophys. Res., **65**, 11, 1960.
7. R. E. Bourdeau, E. C. Whipple. J. Geophys. Res., **67**, 467, 1962.
8. Т. К. Бреус, Г. Л. Гдалевич. Космические исследования, **3**, № 6, 1965 (в печати).
9. P. I. Bowen, R. L. F. Boyd, C. L. Henderson, W. I. Raitt, A. P. Willmore. Proc. Roy. Soc. A, **281**, 504, 1964.
10. I. I. Angerami, I. O. Thomas. J. Geophys. Res., **69**, N 21, 4537, 1964.
11. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, Г. Л. Гдалевич, В. В. Афонин, Р. Ye. Rybchinsky, N. M. Shutte. Space Res., **5**, 733, 1965.
12. N. M. Mott-Smith, J. Langmuir. Phys. Rev., **28**, 727, 1926.
13. К. И. Грингауз, В. Н. Горожанкин, N. M. Shutte, G. L. Gdalevich. Space Res., **4**, 473, 1964.
14. А. Я. Прессман, С. П. Яценко. Геомагнетизм и аэрономия, **1**, № 1, 49, 1961.
15. H. E. Hinteregger, K. Damon, L. A. Hall. J. Geophys. Res., **64**, 8, 961, 1959.
16. К. И. Грингауз. Space Res., **2**, 539, 1961.
17. H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **66**, 2367, 1961; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **68**, 6413, 1963; L. A. Hall, W. Schweizer, H. E. Hinteregger. J. Geophys. Res., **75**, 105, 1965; H. E. Hinteregger, L. A. Hall, G. Schmidtke. Space Res., **5**, 1175, 1965.
18. H. E. Hinteregger. Space Res., **1**, 304, 1960.
19. H. E. Hinteregger. Phys. Rev., **96**, 538, 1954; W. Walker, G. Weissler. Phys. Rev., **97**, N 4, 1178, 1955.
20. А. С. Ганцев, И. М. Израилев. ЖТФ, **31**, № 3, 376, 1961; Н. Г. Находкин, Н. В. Мельник. Радиотехника и электроника, **6**, № 7, 1209, 1961; **7**, № 2, 303, 1962; М. А. Румши др. Физика твердого тела, **4**, № 1, 69, 1962.
21. K. Norman, A. P. Willmore. Planet. Space Sci., **13**, 1, 1965.