

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том V

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

МОСКВА • 1967

УДК 551.510.535

Г. Л. Гдалевич, В. Ф. Губский, И. Д. Дмитриева

**ВЫСОТНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПО ОПЫТАМ 1965 г. НА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАКЕТАХ¹**

Описываются методика и условия проведения экспериментов по измерению температуры T_e и концентрации n_e электронов на геофизических ракетах. Проводится сопоставление методов измерения T_e и n_e с помощью одно-, двух- и трехэлектродных зондов. Приводятся и обсуждаются два высотных распределения T_e .

20.IX и 1.X 1965 г. были произведены пуски геофизических ракет в средних широтах СССР. В числе других научных экспериментов на этих ракетах проводились исследования концентрации и температуры заряженных частиц в ионосфере, а также измерения высотных изменений интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца с целью изучения поведения ионосферных параметров и их связи в начальной фазе формирования дневной ионосферы. Предварительные результаты этой группы экспериментов были доложены на VII симпозиуме КОСПАР (Вена, май 1966) [1]. В настоящей статье рассматриваются и обсуждаются лишь результаты измерений электронной температуры.

**1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДИКЕ И УСЛОВИЯХ
ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Геофизические ракеты запускались по траектории, близкой к вертикальной, в утреннее время и достигали высоты ~ 480 км. 20.IX ракета запускалась при высоте Солнца $\sim 7^\circ$ и 1.X при высоте Солнца $\sim 9^\circ$. Обе ракеты в полете были стабилизированы относительно трех взаимно-перпендикулярных осей с точностью $\sim 1 \div 2^\circ$.

Для измерений температуры электронов использовались плоский зонд Ленгмюра, двухэлектродная и трехэлектродная плоские ловушки, которые устанавливались на цилиндрической части поверхности ракеты таким образом, чтобы поверхности датчиков были параллельны оси цилиндра; датчики находились на одинаковом расстоянии от вершины ракеты; угол между нормалью к поверхности зонда Ленгмюра и нормалью к поверхности двухэлектродной и трехэлектродной ловушек был равен 90° . Схемы измерений указанных чувствительных элементов приведены на рис. 1. Ловушки располагались непосредственно на поверхности ракеты; зонд Ленгмюра был удален на 3 см от поверхности.

На плоский зонд Ленгмюра, сетку двухэлектродной ловушки и внутреннюю сетку трехэлектродной ловушки подавалось напряжение $-5 \div +10$ в относительно корпуса, изменявшееся пилообразно за время 0,75 сек. Внешняя сетка трехэлектродной ловушки имела потенциал $+5$ в

¹ Статья представляет собой изложение доклада на Международном симпозиуме по солнечно-земным связям (Белград, 1966 г.).

относительно корпуса. Коллекторы плоских ловушек имели потенциал ± 30 в. С целью расширения диапазона измеряемых токов в электрометрических усилителях использовалось автоматическое переключение шкал в процессе измерений. Согласно расчетным данным при изменении потенциала сетки двухэлектродной ловушки от 0 до $+5$ в относительно потенциала плазмы ее эффективная поверхность изменялась примерно на 5%. При таком же изменении потенциала на внутренней сетке трехэлектродной ловушки ее эффективная поверхность изменялась примерно на 2%.

Углы α между нормалью к поверхности каждого датчика и направлением на Солнце и углы β между этой нормалью и горизонтальной составляющей магнитного поля представлены в таблице.

Обработка результатов измерений проводилась на электронной вычислительной машине М-20. При обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра предварительно проводилось вычитание из зондового тока ионной ветви. Машина выдавала, кроме величин n_e , T_e и потенциала плазмы, следующие данные: число точек, по

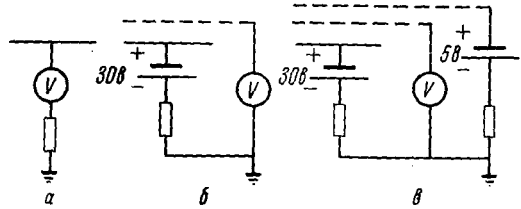


Рис. 1. Схемы измерений чувствительных элементов:

а — зонд Ленгмюра; б — двухэлектродная электронная ловушка; в — трехэлектродная электронная ловушка

которым проведен отрезок прямой, аппроксимирующей участок полулогарифмической характеристики, среднее квадратичное отклонение точек от указанной прямой, отклонение от прямой каждой точки и другие необходимые

Дата	Зонд Ленгмюра		Двухэлектродная ловушка		Трехэлектродная ловушка	
	α°	β°	α°	β°	α°	β°
20.IX	185	96	95	6	275	186
1.X	248	148	68	328	158	58

параметры. Если среднеквадратичная погрешность прямой превышала 4%, то машина выдавала признак отсутствия прямолинейной части в полулогарифмической характеристике.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 2 представлены типичные полулогарифмические характеристики зонда Ленгмюра, двухэлектродной и трехэлектродной электронных ловушек, полученные на одной и той же высоте. Из рис. 2 следует, что T_e , определенные по разным датчикам, совпадают в пределах точности измерений. Более близкой к идеальной полулогарифмической характеристике плоского зонда получилась характеристика трехэлектродной ловушки.

На рис. 3 приведено высотное распределение электронной температуры, полученное при помощи зонда Ленгмюра 20.IX 1965 г. при спуске ракеты. Точки на рис. 3 соответствуют величинам, усредненным по высотным интервалам ~ 50 км. Несмотря на значительный разброс точек, который превышает ошибку измерений T_e , из рис. 3 следует, что температура электронов растет с увеличением высоты.

На рис. 4 приведено высотное распределение электронной температуры, полученное 1.X 1965 г. на нисходящей ветви траектории ракеты. Точки на рис. 4 представляют усредненные значения по высотным интервалам ~ 50 км и по данным всех датчиков.

Приведем некоторые сведения о распределении концентрации электронов по данным зондов. Характер $n_e(h)$ -профилей по данным зондовых измерений совпадает с $n_e(h)$ -профилями, полученными при этих же пусках ракет дисперсионным интерферометром, хотя величины n_e на всех высота

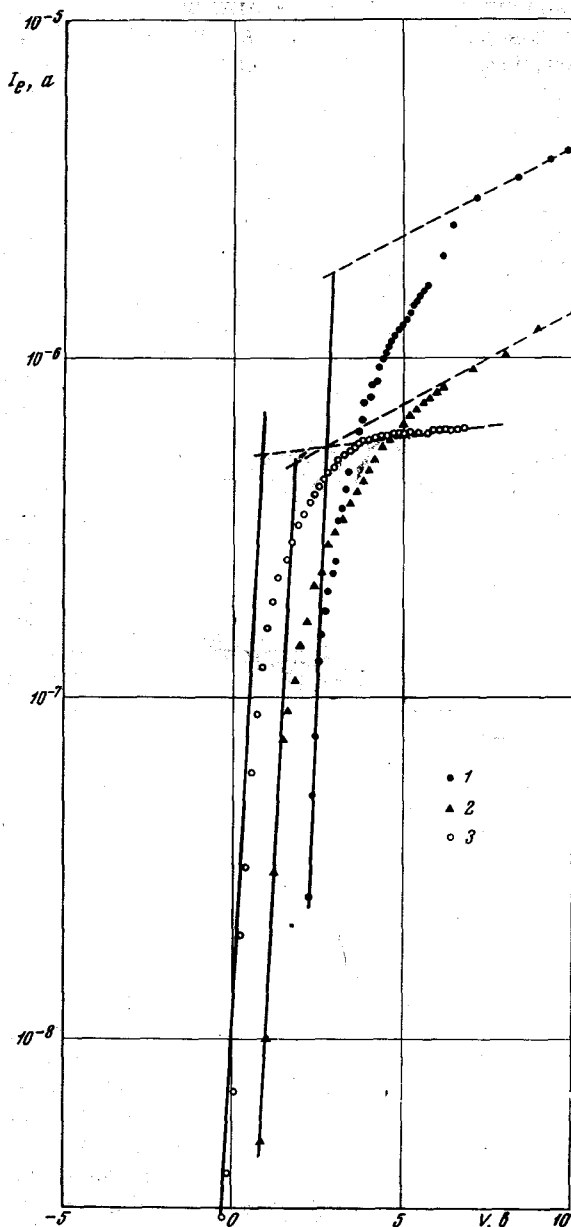


Рис. 2. Полулогарифмические характеристики:

1 — зонд Ленгмюра, $T_i = 2400^\circ \text{K}$; 2 — двухэлектродная электронная ловушка, $T_i = 2500^\circ \text{K}$; 3 — трехэлектродная электронная ловушка, $T_i = 2300^\circ \text{K}$

задерживающих потенциалов [2]. Однако при лабораторных измерениях выяснилось, что при больших задерживающих потенциалах одноэлектродные и двухэлектродные зонды дают распределения по энергиям, существ-

несколько ниже величины n_e по данным радиометра [1]. 20.IX 1965 г. максимальная концентрация электронов при спуске ракеты наблюдалась на высоте $\sim 230 \text{ км}$ и составляла $1,8 \cdot 10^5 \text{ электрон/см}^3$; 1.X 1965 г. на нисходящей ветви траектории ракеты $n_{e \text{ max}} = 3,5 \cdot 10^5 \text{ электрон/см}^3$ наблюдалась на высоте $\sim 210 \text{ км}$. Сопоставление профилей электронных концентраций, полученных при спуске и подъеме ракеты, показывает, что за время полета ракеты возросла концентрация электронов в области слоя E и максимальная концентрация в области слоя F несколько увеличилась, а высота максимума уменьшилась.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Проведение одновременных измерений зондом Ленгмюра, двухэлектродной и трехэлектродной электронными ловушками дает возможность сравнения примененных методов. Отметим, что в лабораторной плазме сравнение зондовых характеристик, полученных с помощью одноэлектродного зонда и многоэлектродных ловушек заряженных частиц, показало разумность применения одно-, двух- и трехэлектродных зондов для изучения тепловых электронов в области малых

венно отличающиеся от полученных трех- или четырехэлектродной ловушкой [2].

Поскольку при измерениях в ионосфере используются одно-, двух- и многоэлектродные зонды, то представляет интерес проведение одновременных измерений этими зондами и сравнение результатов. Из рис. 2, как уже отмечалось выше, следует, что T_e и n_e , полученные разными зондами, совпадают в пределах погрешности измерения ($\pm 100^\circ \text{K}$ и $10\% n_e$). Так как зонды были ориентированы относительно направления горизонтальной составляющей магнитного поля различным образом, то совпаде-

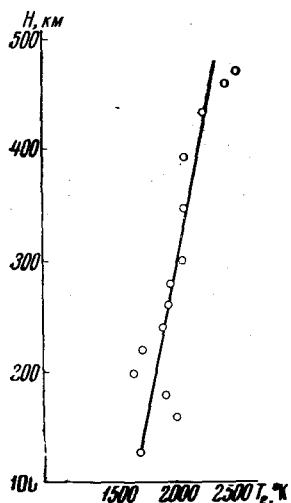


Рис. 3. Высотное распределение электронной температуры по данным зонда Ленгмюра 20.IX 1965 г.

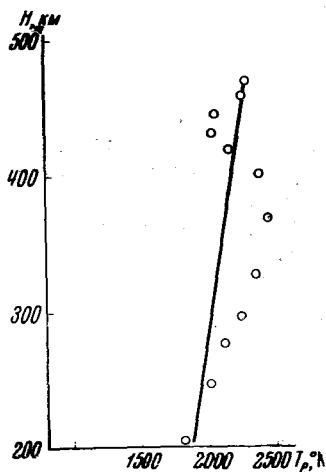


Рис. 4. Высотное распределение электронной температуры по данным 1.X 1965 г.

ние значений T_e и n_e , определенных при помощи различных зондов, свидетельствует об отсутствии влияния магнитного поля Земли на результаты измерений, хотя в условиях эксперимента основную роль могла играть вертикальная компонента магнитного поля, которая превышала горизонтальную компоненту и относительно которой датчики были ориентированы практически одинаково.

Использование одно- и двухэлектродного зондов без охранных колец (это было вызвано нежеланием увеличивать поверхность, на которую подается меняющийся потенциал) приводит, как это видно из рис. 2, к тому, что величина зондового тока на вольт-амперной характеристике все время растет с увеличением потенциала на внешнем электроде из-за роста толщины слоя объемного заряда.

В трехэлектродной ловушке постоянство потенциала на внешней сетке практически обеспечивает неизменность толщины слоя объемного заряда вблизи этой ловушки, и зондовый ток достигает насыщения (см. рис. 2).

В основном, с этими особенностями и связано различие величин токов различных характеристик на рис. 2. Отклонение точек от прямых на полупогарифмических характеристиках вероятнее всего вызывается отражением электронов, которое, по-видимому, оказалось минимальным в трехэлектродной ловушке. Различие в потенциалах плазмы, определенных по

разным датчикам, возможно, вызывается разницей в напряжениях на электродах датчиков. Отсутствие в полулогарифмических характеристиках трехэлектродной ловушки отклонений от прямой при увеличении отрицательных потенциалов на внутренней сетке свидетельствует о том, что отклонений от максвеллова распределения электронов по скоростям в пределах чувствительности аппаратуры в этом эксперименте не обнаружено.

Высотные распределения температуры электронов, представленные на рис. 3 и 4, получены в начальной фазе формирования дневной ионосферы и, по-видимому, характерны для года спокойного Солнца в осеннее время. О начальной фазе формирования ионосферы свидетельствуют сравнительно высокие значения электронной температуры в области слоя E и изменения профилей электронной концентрации, произошедшие за время полета ракеты как 20.IX, так и 1.X (см. выше). Из рис. 3 и 4 видно, что существует общая тенденция к росту T_e с увеличением высоты, что и отмечается сплошными линиями на рис. 3 и 4, хотя наблюдается осциллирующий характер расположения отдельных точек на рис. 3, а на рис. 4 имеется максимум $T_e \approx 2400^\circ \text{K}$ на высоте ~ 370 км. Разброс значений T_e превышает возможные величины ошибок измерений, связанных с аппаратурой и обработкой.

В работе Хирао¹ по данным ракетных пусков в Японии отмечается аналогичный разброс T_e в вертикальном профиле и делается вывод о слоевой структуре распределения электронной температуры в ионосфере. Хирао объясняет такой профиль T_e различием в охлаждении электронного газа на разных высотах, вызываемым нерегулярностью в распределении концентрации электронов и ионов, состава ионов, плотности и состава нейтральной компоненты. Отметим, что если зарегистрированный осциллирующий ход профиля T_e не вызван возмущениями вблизи зондирующей ракеты и является отражением истинных изменений T_e в ионосфере, то такой профиль может создаваться и за счет различия в притоке тепла, а не только охлаждения на разных высотах. Различия в притоке тепла на разных высотах могут создаваться не только из-за нерегулярности потока фотоэлектронов (который рассматривается Хирао), но и нерегулярностью таких источников тепла, как корпускулярные потоки, гидромагнитные волны, электрические поля.

Общая тенденция к росту T_e с увеличением высоты в годы, близкие к году спокойного Солнца, уже отмечалась ранее как по данным спутниковых измерений [3, 4], так и по данным некогерентного рассеяния [5]. Теоретические модели поведения электронной температуры в ионосфере [6—8], построенные для дневных условий в период максимума солнечной активности, дают максимальное значение T_e на высотах ~ 220 км. В модели [9], учитывающей эффект теплопроводности электронного газа, что особенно существенно для профилей T_e в годы минимума солнечной активности, может найти объяснение рост на рис. 3 и 4. Относительно высокие температуры электронов на рис. 3 и 4, возможно, отражают сезонный ход T_e , в котором, по данным некогерентного рассеяния в сентябре, отмечаются повышенные значения T_e [5].

В заключение отметим, что сопоставление приведенных в настоящей статье данных о T_e с данными об интенсивности солнечного ультрафиолетового излучения на различных высотах (обработка этих данных, полученных во время пусков ракет 20.IX и 1.X 1965 г., в настоящее время заканчивается) позволит установить детальную взаимосвязь этих параметров.

¹ Препринт доклада, представленного на VII симпозиуме КОСПАР (Варшава, 1966 г.).

Как уже отмечалось, описанные в настоящей статье измерения являются частью одновременных исследований различных параметров ионосферы, перечисленных в [1], выполненных под общим руководством К. И. Грингауза, которому авторы выражают благодарность.

Дата поступления
5 сентября 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. I. Gringauz, G. L. Gdalevich, V. F. Gubsky, I. A. Knorin, V. A. Rudasov, N. M. Shutte. Presented at VII COSPAR Symposium in Vienna, May 1965.
2. Н. И. Ионов, А. Я. Тонтегоде. Ж. техн. физ., 34, 354, 1964.
3. P. J. Bowen, R. L. F. Boyd, G. L. Henderson, W. I. Raitt, A. P. Willmore. Proc. Roy. Soc., 281, 504, 1964.
4. L. H. Brace, W. W. Spencer, G. R. Garignan. J. Geophys. Res., 68, 5397, 1963.
5. J. W. Evans. Planet. Space Sci., 13, 1031, 1965.
6. W. B. Hanson, F. S. Johnson. Memories Soc. Roy. Sci. Liege, 4, 390, 1961.
7. W. B. Hanson. Space Res., 3, 282, 1963.
8. A. Dalgarno, N. B. McElroy, R. J. Moffet. Planet. Space Sci., 11, 463, 1963.
9. J. E. Geisler, S. A. Bowhill. J. Atmosph. Terr. Phys., 27, 457, 1965.