

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том V

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

2

МОСКВА · 1967

УДК 551.510.535

К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус

**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ
ПО ИЗМЕНЕНИЯМ ТОКА ИОННОЙ ЛОВУШКИ,
ВЫЗВАННЫМ ВРАЩЕНИЕМ СПУТНИКА, И ОЦЕНКА ВЕРХНЕГО
ПРЕДЕЛА ИОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЫСОТАХ $\lesssim 10\,000$ км
ПО ДАННЫМ «ЭЛЕКТРОНА-2»**

Показано, что изменения коллекторного тока ионной ловушки с нулевым потенциалом на внешней сетке, установленной на вращающемся космическом аппарате, летящем в ионосфере, можно использовать для определения ионной температуры T_i .

Оценки верхнего предела T_i , сделанные по данным ионной ловушки, установленной на спутнике «Электрон-2», показали, что на высотах 4000—8000 км температура ионов не превышала 10 000° К.

Первая, насколько нам известно, грубая оценка ионной температуры на высотах порядка нескольких тысяч километров была сделана в [1] по данным ловушек заряженных частиц, установленных на космическом аппарате «Луна-2», запущенном в 1959 г. Внешние сетки четырех ловушек на «Луне-2» имели следующие потенциалы относительно корпуса аппарата: -10 в, -5 в, 0 в и $+15$ в. Эксперимент показал, что положительные коллекторные токи, регистрируемые в ловушках на высотах до $\sim 20\,000$ км, существенно зависят от имевших место сравнительно небольших различий в потенциалах внешних сеток ловушек, а в ловушке с потенциалом внешней сетки, равным $+15$ в, положительные токи на высотах > 3000 км вообще не регистрировались. Это свидетельствовало о сравнительно небольших энергиях положительных ионов в рассматриваемой области высот и позволило авторам [1] оценить величину T_i в этой области как не превышающую десятки тысяч градусов.

Заметим, что по существу одновременные измерения с помощью четырех ловушек с различными потенциалами внешних сеток эквивалентны получению четырех точек на зондовой вольт-амперной характеристике.

Существует еще одна возможность оценки T_i , а именно, по изменениям коллекторного тока ловушки с нулевым потенциалом на внешней сетке и плоским коллектором, установленной на вращающемся космическом аппарате (такими аппаратами были, в частности, «Луна-2» и «Электрон-2»).

При произвольном положении ловушки относительно оси (или осей) вращения аппарата положение нормали к коллектору ловушки относительно вектора «поступательной» скорости аппарата (т. е. его скорости вдоль траектории $v_{к.а.}$) должно периодически меняться, что должно, в свою очередь, вызывать соответствующие периодические изменения («модуляцию») регистрируемого коллекторного тока. Подобная модуляция коллекторных токов действительно наблюдалась при прохождении через

плазменную оболочку Земли как на аппарате «Луна-2» [1], так и на каждом витке спутника «Электрон-2», запущенном в 1964 г., на котором также имелась ловушка заряженных частиц с нулевым потенциалом на внешней сетке [2]. Если считать, что максимальные значения коллекторного тока такой ловушки соответствуют совпадениям нормали к коллектору с вектором скорости космического аппарата, а минимальные значения — нахождению ловушки в ионной тени, при котором направление нормали к коллектору противоположно вектору скорости, то по отношению этих значений токов можно определить верхний предел T_i .

Покажем как это сделать. Предположим, что:

1) распределение заряженных частиц по скоростям в ионосфере — масквелловское, и влиянием электрического поля, создаваемого отличием потенциала космического аппарата от потенциала окружающей его плазмы, можно пренебречь;

2) космический аппарат вращается вокруг оси, перпендикулярной нормали к коллектору ловушки; вектор «поступательной» скорости космического аппарата лежит в плоскости, перпендикулярной указанной оси вращения;

3) регистрация коллекторного тока осуществляется практически непрерывно (т. е. имеется непрерывная запись тока).

Заметим, что в действительности условия 2), 3) обычно не выполняются. Поэтому рассмотрим, как можно определить T_i в случае выполнения этих условий, а затем оценим, как влияет на результат невыполнение этих условий.

Возьмем систему координат с началом в центре масс космического аппарата и осью z , совпадающей с вектором поступательной скорости космического аппарата.

Тогда величина максимального коллекторного тока ловушки определится из выражения

$$I_{k \max} = eS \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^0 c_z f(\mathbf{c}) d^3\mathbf{c}, \quad (1)$$

а величина минимального тока —

$$I_{k \min} = eS \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} c_z f(\mathbf{c}) d^3\mathbf{c}, \quad (2)$$

где e — заряд электрона, S — площадь коллектора ловушки, $\mathbf{c} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_{\text{к.а.}}$ — скорость ионов в выбранной системе координат, \mathbf{v} — тепловая скорость ионов, а $f(\mathbf{c})$ — функция распределения.

В соответствии со сказанным ранее, в качестве $f(v)$ возьмем функцию распределения Масквелла, тогда

$$f(\mathbf{c}) = n_i \left(\frac{m_i}{2\pi k T_i} \right)^{3/2} \exp \left\{ - \frac{m_i}{2k T_i} [v_x^2 + v_y^2 + (c_z + v_{\text{к.а.}})^2] \right\},$$

в которой температура T_i соответствует температуре невозмущенной аппаратом ионосферы (так как влиянием потенциала спутника мы пренебрегли).

Интегрируя затем (1) и (2) и предполагая, что концентрации ионов n_i в моменты измерения максимального и минимального токов одинаковы,

получаем для отношения токов следующее выражение:

$$\frac{I_{k \max}}{I_{k \min}} = \frac{x\Phi(x\sqrt{2}) + \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2} + x}{x\Phi(x\sqrt{2}) + \frac{1}{\sqrt{\pi}}e^{-x^2} - x}, \quad (3)$$

где $x = (mv_{к.а.}^2/2kT_i)^{1/2}$, m — масса протона, а $\Phi(x\sqrt{2})$ — функция ошибок. Из формулы (3) видно, что отношение $I_{k \max}/I_{k \min}$ при известном $v_{к.а.}$ зависит только от T_i , поэтому если построить зависимость

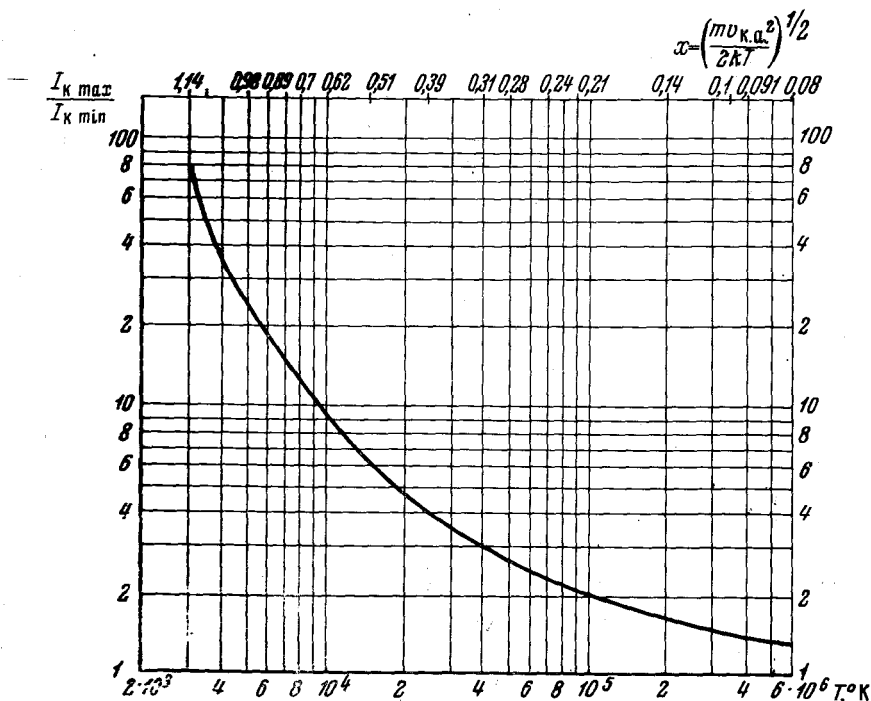


Рис. 1. Зависимость отношений максимального и минимального коллекторных токов ловушки с нулевым потенциалом на внешней сетке, соответствующих периодическим изменениям положения ловушки из-за вращения космического аппарата, от величины $x = \sqrt{mv_{к.а.}^2/2kT_i}$ (см. формулу (3))

$I_{k \max}/I_{k \min}$ от x или от $T_i = mv_{к.а.}^2/2kx^2$, то полученным графиком можно воспользоваться для определения T_i . Очевидно, что при $x \rightarrow 0$, т. е. при очень больших температурах $I_{k \max}/I_{k \min} \rightarrow 1$, а при $x \gg 1$ ($I_{k \max}/I_{k \min} = (1/\pi\sqrt{\pi})x^3e^{x^2}$ для $x \gg 1$) это отношение становится чрезвычайно большим.

На рис. 1 дана часть графика зависимости $I_{k \max}/I_{k \min} = F(x)$ для значений x в интервале $0,1 < x < 1,5$. T_i рассчитаны для $v_{к.а.} = 8$ км/сек.

Как уже отмечалось, мы располагаем результатами измерений I_k , проведенных в периферийной области земной ионосферы (к которой мы относим высоты до $10 \div 20$ тыс. км) с помощью ловушки заряженных частиц на «Электроне-2». На рис. 2 и 3 приведены для примера результаты измерения I_k при двух прохождениях «Электрона-2» вблизи Земли.

Аналогичные результаты были получены на космическом аппарате «Луна-2» (см. рис. 3 из работы [1]). Мы воспользуемся для оценки ионной температуры только точками на высотах $< 10\,000$ км (отмеченными треугольниками). Из рис. 2 и 3 видно, что если определять отношение $I_{k\max}/I_{k\min}$ по двум последовательным экстремальным точкам, подобным отмеченным, так, чтобы первая точка с малым значением I_k соответствовала меньшей высоте, а вторая — с большим значением I_k — относилась к большей высоте, то это значение составит величину порядка 10.

Однако данными рис. 2 и 3 нельзя воспользоваться для определения T_i , не оценив степени выполнения во время эксперимента условий, в предположении которых построен график рис. 1.

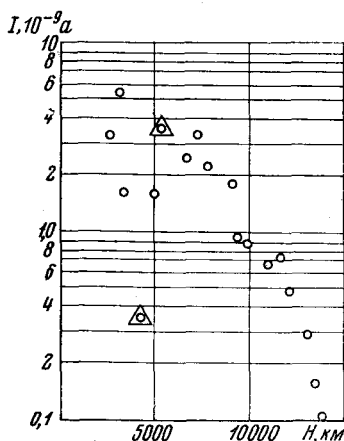


Рис. 2. Значения коллекторных токов ловушки, установленной на спутнике «Электрон-2», соответствующие прохождению спутника вблизи Земли 30.1 1964 г. ($10^{\text{h}08^{\text{m}}}$ — $11^{\text{h}20^{\text{m}}}$ U.T.)

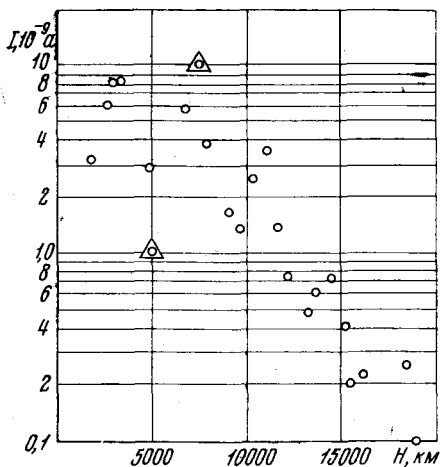


Рис. 3. Значения коллекторных токов ловушки, установленной на спутнике «Электрон-2», соответствующие прохождению спутника вблизи Земли 31.1 1964 г. ($8^{\text{h}46^{\text{m}}}$ — $9^{\text{h}52^{\text{m}}}$ U.T.)

Рассмотрим последовательно, как влияет на определение T_i указанным способом каждое из принятых предположений.

Предположение (1) позволило считать, что определяемая предлагаемым методом температура соответствует температуре невозмущенной аппаратом ионосферы, поскольку потенциал спутника близок к нулю.

В нашем случае такое предположение можно обосновать следующим. В [2] приведены данные о максимальных ионных токах, зарегистрированных при помощи ловушек заряженных частиц на «Электроне-2» на одних и тех же высотах ($H \leq 10\,000$ км) во время нахождения спутника в конусе земной тени и в области, освещенной Солнцем. В ночных условиях потенциал спутника должен быть отрицательным, тогда как при солнечном освещении он может изменить знак. Это обстоятельство должно было бы отразиться на величине токов. Близость значений зарегистрированных в обоих случаях токов указывает на малость потенциала спутника относительно окружающей среды в этой области высот. Вывод о малости потенциала спутника в рассматриваемом нами интервале высот сделан также в работе Сербу, описывающей результаты, полученные на станции ИМП-1 [3]. Поэтому использование распределения Масквелла, соответствующего $T = T_i$ на рассматриваемых высотах следует счи-

тать оправданным. Заметим кстати, что во многих аналогичных расчетах распределение скоростей ионов в ионосфере принимается именно масквелдовским (начиная с работы Уиппла [4]).

Нет оснований считать, что предположение (2) в условиях измерений на «Электроне-2» выполнялось, так как мы не имели точных данных об ориентации нормали к коллектору ловушки по отношению к вектору скорости. Это могло привести к тому, что максимальные значения $I_{k\max}$ в процессе модуляции из-за вращения спутника оказались меньше, чем должны были быть в случае совпадения нормали к коллектору с вектором поступательной скорости спутника, а значения $I_{k\min}$ оказались соответственно завышенными. При этом отношение $I_{k\max}/I_{k\min}$ может быть ниже «истинного» (полученного по рис. 1), а определяемая величина T_i — завышенной.

Наконец, условия измерения на «Электроне-2» не соответствовали также предположению (3). Регистрация I_k на рассматриваемых высотах велась не непрерывно, а один раз в 2 мин. При этом указанный интервал между двумя последовательными измерениями по порядку величины был близок к периоду вращения спутника относительно его центра масс. Вследствие этого результаты измерений, приведенные на рис. 2 и 3, отражают не подлинные изменения I_k из-за вращения космического аппарата, а некую «квазистробоскопическую» картину. Если мы при этом выбираем в качестве $I_{k\min}$ и $I_{k\max}$ пары следующих одна за другой экстремальных точек, обведенных на рис. 3 треугольниками, то:

а) во-первых, величина $I_{k\min}$ может быть завышенной, ибо не исключено, что измерение произведено в момент, когда значение I_k не было наименьшим;

б) во-вторых, величина $I_{k\max}$ может быть заниженной, так как измерение могло производиться не в тот момент, когда значение I_k было наибольшим;

в) в-третьих, предполагалось, что концентрация ионов в моменты измерения $I_{k\max}$ и $I_{k\min}$ равны; в действительности, концентрация падает с ростом высоты, а точки, в которых измерялись $I_{k\max}$ и $I_{k\min}$ с интервалом в 2 мин., оказываются значительно разнесенными пространственно, поэтому выбирая точку с $I_{k\max}$ на большей высоте, чем с $I_{k\min}$, мы, очевидно, занижаем отношение $I_{k\max}/I_{k\min}$.

Таким образом, редкие измерения I_k могут привести лишь к уменьшению отношения $I_{k\max}/I_{k\min}$ по сравнению с истинным значением, т. е. к завышению определяемой величины T_i .

Из сказанного следует, что невыполнение каждого из указанных условий (2), (3) может влиять на определяемую величину T_i в одном и том же направлении, завышая ее по сравнению с действительным значением. Поэтому T_i , определенную по отношениям $I_{k\max}/I_{k\min}$, соответствующим точкам, подобным тем, которые обведены на рис. 2, 3 треугольниками, следует считать верхним пределом возможных значений T_i на рассматриваемых высотах.

В настоящем сообщении мы ограничимся оценкой величины T_i по данным измерений, приведенным на рис. 2 и 3. Заметим, что эти данные в области высот $< 10\,000$ км относятся к упоминавшимся выше случаям нахождения спутника «Электрон-2» в конусе земной тени, когда потенциал спутника был заведомо отрицателен, а значения коллекторного тока полностью свободны от влияния фотоэмиссии.

Из рис. 2 видно, что определенное по отмеченным треугольником точкам, отношение $I_{k\max}/I_{k\min}$ может характеризовать T_i в интервале высот 4000—5200 км, а соответствующий интервал высот в случае рис. 3 — 5200—7800 км. Скорость спутника на высотах 4000—5200 км равнялась ~ 8 км/сек, а на высотах 5200—7800 км — ~ 7 км/сек.

В обоих случаях $I_{k \max} / I_{k \min} = 10$. Тогда для 30.I 1964 г., согласно графику рис. 1, верхний предел T_i равен 9000—10 000° К. Для 31.I 1964 г. T_i , оцененная аналогичным образом, равнялась $\sim 7000^\circ$ К. Таким образом, эти оценки температуры ионов позволяют уточнить (понизить) для указанных высот прежние значения верхнего предела температуры, данные в [1], для всей периферийной области плазменной оболочки Земли.

В 1965 г. опубликована работа Андерсона, Беннета и Хейла [5], в которой описываются результаты интерпретации данных, полученных с помощью ионной ловушки, установленной на ракете, запущенной на высоту 5500 км в октябре 1960 г. При этом авторы допускают, что ионная температура на высотах 4000—5500 км превышала 32 000° К. Приведенные выше оценки T_i противоречат такой возможности.

Дата поступления
16 июля 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, В. Д. Озеров, Р. Е. Рыбчинский, Докл. АН СССР, 131, № 6, 1301, 1960.
2. В. В. Безруких, К. И. Грингауз. Исследование космического пространства. Изд-во «Наука», 1965, стр. 177.
3. G. P. Serbu. Space Res., 5, 564, 1965.
4. E. S. Whipple. Proc. IRE, 47, 2023, 1959.
5. D. N. Anderson, W. H. Bennett, L. C. Hale. J. Geophys. Res., 70, No. 5, 1031, 1965.