

К. И. ГРИНГАУЗ, М. И. ВЕРИГИН

**РАДИАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ
НА ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ ОТ 1 ДО 1,5 А.Е.
ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОСМИЧЕСКОМ
АППАРАТЕ «МАРС-3»**

(Представлено академиком Р. З. Сагдеевым 4 IV 1975)

В настоящее время предложены многочисленные модели солнечного ветра (см. обзоры в ⁽¹⁻³⁾). В ряде моделей, чтобы при разумных граничных условиях в основании солнечной короны и на бесконечности получить согласие с данными прямых измерений характеристик солнечного ветра у орбиты Земли, выбор свободных параметров можно производить неоднозначно. Для выбора модели, наилучшим образом удовлетворяющей реальным свойствам солнечного ветра, нужны прямые измерения солнечного ветра на различных гелиоцентрических расстояниях ^(1, 2), в частности, особенно важно знать радиальное распределение температуры электронов T_e , так как в солнечном ветре перенос тепла в результате конвекции и теплопроводности в основном определяется электронами.

Значительная часть опубликованных данных о T_e получена при помощи американских спутников Земли серии Вела, ОГО-5, ИМП-6 ^(2, 4, 5). Данные о температуре солнечной короны имеются, однако нет сведений о распределении температуры в ближайшей к Солнцу области, в которой происходит основное ускорение плазмы, т. е. в которой корональная плазма превращается в солнечный ветер. До настоящего времени неопубликовано результатов измерений T_e на гелиоцентрических расстояниях, отличающихся от 1 а.е.

Измерения T_e на космическом аппарате (КА) «Марс-3» (июнь 1971 г. — январь 1972 г.) производили в интервале r от 1 до 1,5 а.е. при помощи интегральной электронной ловушки с изменяющимся тормозящим потенциалом $E_t \leq 400$ в, расположенной на затененной стороне аппарата и ориентированной в антисолнечном направлении. На пути от Земли к Марсу (рис. 1) прибор почти все время работал в режиме, когда кривая торможения электронов, состоящая из 14 отсчетов, измерялась за ~1 мин. один раз в 20 мин. (Более подробно постановка эксперимента описана в ⁽⁶⁾, а методика обработки и оценки точности полученных результатов в ⁽⁷⁾.)

Систематические определения характеристик солнечного ветра (переносной скорости V , концентрации n , межпланетного магнитного поля B , температуры протонов T_p и электронов T_e) по данным прямых измерений показали существование значительных вариаций указанных параметров (см., например, обзор ⁽⁸⁾). При этом, хотя некоторые характерные особенности в изменениях параметров солнечного ветра, связанные с существованием долгоживущих потоков, сохраняются от одного солнечного оборота

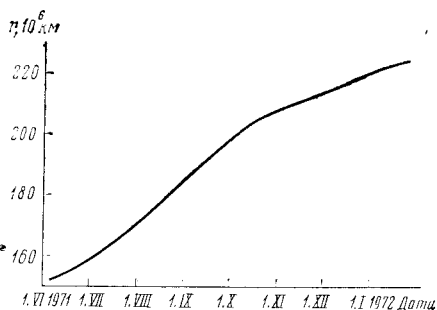


Рис. 1. Гелиоцентрическое расстояние до «Марса-3» на трассе полета

к другому, происходит существенное изменение амплитуды и формы этих повторяющихся особенностей, причем некоторые из них не повторяются совсем ⁽⁸⁾.

На рис. 2 приведены осредненные по трех часовым интервалам значения T_e по данным измерений на КА «Марс-3» в течение трех последовательных оборотов Солнца. Из рисунка видно, что некоторые особенности в электронной температуре сохраняются по крайней мере в течение двух оборотов. Поэтому для ограничения эффектов, связанных с вращением Солнца, при определении $T_e(r)$ измерения осредняли по 27-дневным пе-

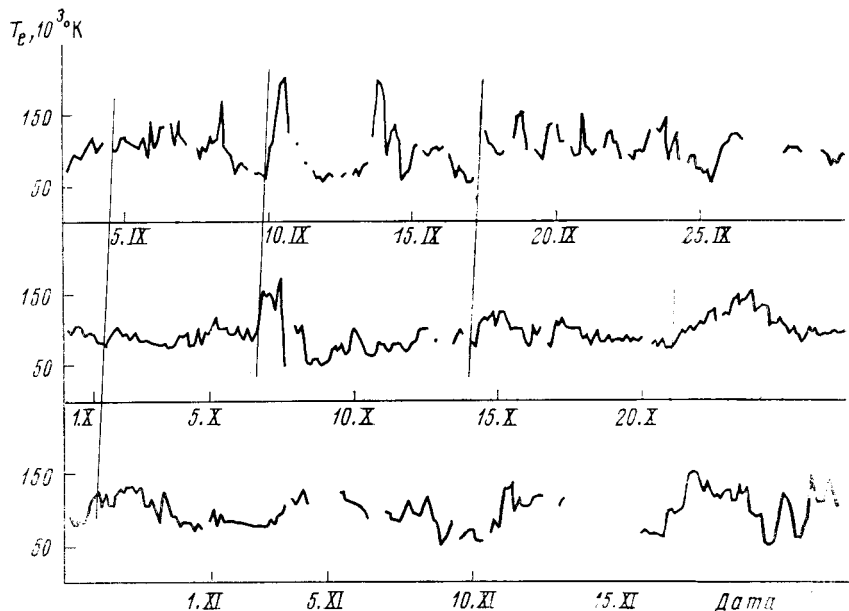


Рис. 2. Температура электронов, осредненная по трехчасовым интервалам, 1971 г.

риодам. Подобное осреднение применялось также при определении радиальных зависимостей $B(r)$ Колманом и др. в ⁽⁹⁾ и $n_e(r)$ Нейгебауэр и Снайдером в ⁽¹⁰⁾.

На рис. 3 в билогарифмическом масштабе приведены значения $\bar{T}_e$, осредненные по оборотам Солнца, в зависимости от $\bar{r}$ — гелиоцентрического расстояния до КА «Марс-3» в середине промежутка осреднения. По приведенным точкам, в предположении степенной зависимости $\bar{T}_e(r) = \bar{T}_e(R_e) \cdot (R_e/r)^n$ методом наименьших квадратов (с учетом различного количества измерений T_e в интервалах осреднения) можно определить показатель степени n и значение $\bar{T}_e$ на некотором фиксированном расстоянии $R_e = 1 \text{ а.е.} = 150 \cdot 10^6 \text{ км}$. Наилучшим образом в указанном выше смысле измерениям соответствует эмпирическая формула

$$\bar{T}_e(r), 10^3 \text{ K} \approx 120 (R_e/r)^{0.5}.$$

Величина $T_e(R_e)$ по данным различных спутников Земли определена следующим образом:

Вела-4 (май 1967 г. — май 1968 г.) $\sim 140 \cdot 10^3 \text{ K}$ ⁽²⁾,

ОГО-5 (март 1968 г.) $\sim 155 \cdot 10^3 \text{ K}$ ⁽⁴⁾,

ИМП-6 (март — июнь 1971 г.) $\sim 133 \cdot 10^3 \text{ K}$ ⁽⁵⁾.

Измерения на Вела-4 и ИМП-6 выполнены одной и той же группой авторов и при помощи однотипных приборов (полусферического электростатического анализатора); на ОГО-5 — другими авторами, использовавшими прибор другого типа (трехзонный анализатор с предварительным

ускорением электронов). Последнее, а также относительно малый период измерений в (⁴), возможно, и являются причинами заметного различия указанных результатов двух групп авторов. Величина $\bar{T}_e(R_e)$, полученная на КА «Марс-3» в июне 1971 г., т. е. в период, близкий к периодам измерений на ИМП-6, несмотря на различие в методах измерений, близка к величине $\bar{T}_e(R_e)$, полученной на ИМП-6.

Оценим возможное влияние некоторых факторов на определенную выше радиальную зависимость T_e (на показатель степени n).

Имеющиеся данные о влиянии фазы одиннадцатилетнего цикла солнечной деятельности на T_e весьма скудны. Если судить по тому, что $\bar{T}_e$ по

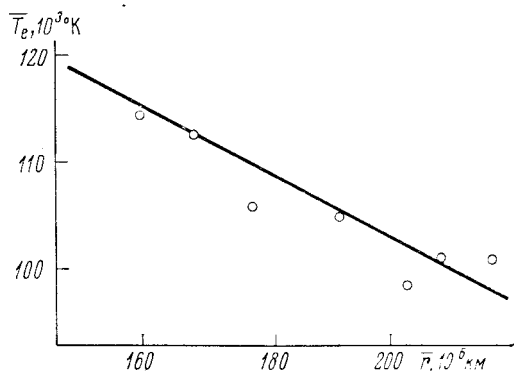


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость средней температуры электронов от гелиоцентрического расстояния

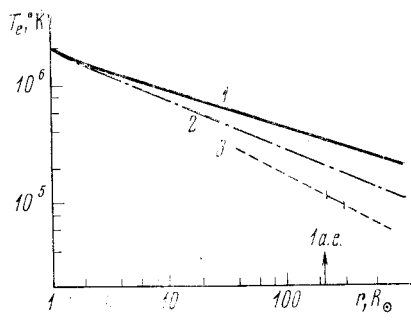


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость температуры электронов от гелиоцентрического расстояния: 1 — в модели (¹¹, ¹²), 2 — в модели (¹³), 3 — по данным КА «Марс-3»

данным Вела-4 больше $\bar{T}_e$ по данным ИМП-6 на $7 \cdot 10^3$ K и что это уменьшение произошло за 3,5 года, то можно оценить среднее уменьшение $\bar{T}_e$ при уменьшении солнечной активности (с 1968 г. по 1971 г. числа Вольфа быстро уменьшались) как $\sim 2 \cdot 10^3$ K в год. За время полета КА «Марс-3» ($\sim 0,5$ года) это уменьшение составило бы $\sim 10^3$ K, чем, по-видимому, можно пренебречь.

Так как температура электронов анизотропна, то увеличение угла θ между средним направлением вектора магнитного поля и нормалью к апертуре прибора также могло бы привести к систематическому уменьшению $\bar{T}_e$ за время полета КА «Марс-3». Однако, согласно модели спирального межпланетного магнитного поля, при средней скорости 400 км/сек это изменение $\delta\theta \sim 15^\circ$ (заметим, что измерения между орбитами Земли и Марса (⁹) не обнаружили заметного изменения θ), что при учете характерной анизотропии $T_e \sim 1,1$ (²) и ширины угловой диаграммы прибора на КА «Марс-3» $\pm 40^\circ$ не может дать существенного систематического уменьшения $\bar{T}_e$.

Некоторое влияние на величину показателя степени может оказать и то, что определение показателя нелинейной (степенной) зависимости производили не по отдельным значениям $\bar{T}_e$, а по осредненным за 27 дней значениям $\bar{T}_e$. Однако при этом мы допускаем ошибку порядка $(\Delta r/r)^2$, где $\Delta r \sim 10^7$ км (см. рис. 3) — интервал радиальных расстояний, на котором определяли $\bar{T}_e$ и влиянием нелинейности степенной зависимости также можно пренебречь.

На рис. 4 показаны расчетные величины $T_e(r)$ при концентрации и температуре в основании солнечной короны соответственно $3 \cdot 10^7$ см⁻³ и $2 \cdot 10^6$ K в двухжидкостной модели Старрока и Хартла (¹¹, ¹²) и в одножидкостной модели Вонга и Чанга (¹³). Зависимость $\bar{T}_e(r)$, определенная

по данным КА «Марс-3», показана отрезком сплошной линии на участке измерений (1—1,5 а.е.), и экстраполирована пунктиром.

Из графиков видно, что вблизи Земли $\bar{T}_e(r)$ по данным наших измерений спадает более круто, чем в рассматриваемых моделях (в модели Старрока и Хартла $n=2/7$, а у Вонга и Чанга $n=2/5$). Это, по-видимому, связано с более низкой электронной теплопроводностью в солнечном ветре, чем классическая, использованная в моделях (¹¹⁻¹³).

Действительно, если в уравнении полного потока энергии солнечного ветра (см., например, (³)) преобладает член, описывающий электронную теплопроводность, то на достаточно больших расстояниях $T_e(r)$ спадает достаточно медленно ($\sim r^{-2/7}$). При уменьшении коэффициента теплопроводности увеличивается роль членов, описывающих адиабатическое расширение ($T_e(r) \sim r^{-\alpha/2}$) и, следовательно, в окрестности Земли спад температуры должен быть более быстрый $T_e(r) \sim r^{-\alpha}$, $\alpha > 2/7$.

Двухжидкостная модель солнечного ветра с электронной теплопроводностью в 4—5 раз меньше классической рассчитана Куперманом и Хартеном (¹⁴). В этой работе показано, что если одновременно с уменьшением электронной теплопроводности увеличить в 30 раз скорость обмена энергией между электронами и ионами, или в 2—3 раза увеличить ионную теплопроводность, то в окрестности Земли получим более быстрый спад $T_e(r) \sim r^{-0.6}$ по сравнению с моделью (^{11, 12}). Более быстрый спад $T_e(r)$ в окрестности Земли получается также и в модели Вулфа и др. (¹⁵), учитывающей влияние вязкости и магнитных сил, в которой в классический коэффициент электронной теплопроводности добавлен степенной множитель $(R_\odot/r)^p$, обеспечивающий его уменьшение. В этих работах (^{14, 15}) уменьшение электронной теплопроводности достигается введением феноменологических коэффициентов.

Развитие физической теории процессов переноса, учитывающей плазменные неустойчивости, связанные с большими потоками тепла в солнечном ветре, сильно нарушающими равновесную максвелловскую функцию распределения, и построение на основе такой теории модели солнечного ветра, по-видимому, приведет к более адекватному пониманию процессов, происходящих в межпланетной среде.

Институт космических исследований
Академии наук СССР
Москва

Поступило
3 III 1975

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ E. N. Parker, In: Solar Wind, NASA SP—308, Washington, 1972, p. 161. ² M. D. Montgomery, In: Cosmic plasma physics, N. Y., 1972, p. 61. ³ A. J. Hundhausen, Coronal Expansion and Solar Wind. N. Y.—Heidelberg—Berlin, 1972. ⁴ J. D. Scudder, D. L. Lind, K. W. Ogilvie, J. Geophys. Res., v. 78, 6535 (1973). ⁵ W. C. Feldman, J. R. Asbrige et al., ibid., v. 78, 3697 (1973). ⁶ К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др., Космические исследования, т. 12, в. 3, 430 (1974). ⁷ К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др., Там же, т. 12, в. 4, 585 (1974). ⁸ J. H. Wolfe, In: Solar Wind, NASA SP—308, Washington, 1972, p. 170. ⁹ P. J. Coleman jr., E. J. Smith, et al., J. Geophys. Res., v. 74, 2826 (1969). ¹⁰ M. Neugebauer, C. W. Snyder, ibid., v. 71, 4469 (1966). ¹¹ P. A. Sturrock, R. E. Hartle, Phys. Rev. Lett., v. 16, 628 (1966). ¹² R. E. Hartle, P. A. Sturrock, Astrophys. J., v. 151, 1155 (1968). ¹³ Y. C. Whang, C. C. Chang, J. Geophys. Res., v. 70, 5793 (1965). ¹⁴ S. Cuperman, A. Harten, In: Solar Wind, NASA SP—308, Washington, 1972, p. 244. ¹⁵ C. L. Wolff, J. C. Brandt, R. C. Southwick, Astrophys. J., v. 165, 181 (1971).