

ДОКЛАДЫ
АКАДЕМИИ НАУК СССР

1975

т. 223, № 3

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 (4, 5), 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 (6, 7, 8). 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 (9), а методика обработки и оценки точности полученных результатов в (10).)

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 (11)). При этом, хотя некоторые характерные особенности в изменениях параметров солнечного ветра, связанные с существованием долгоживущих потоков, сохраняются от одного солнечного оборота

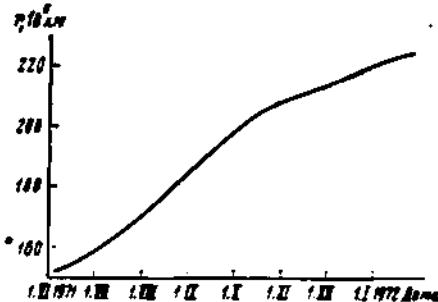


Рис. 1. Гелиоцентрическое расстояние до «Марса-3» на трассе полета

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

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-

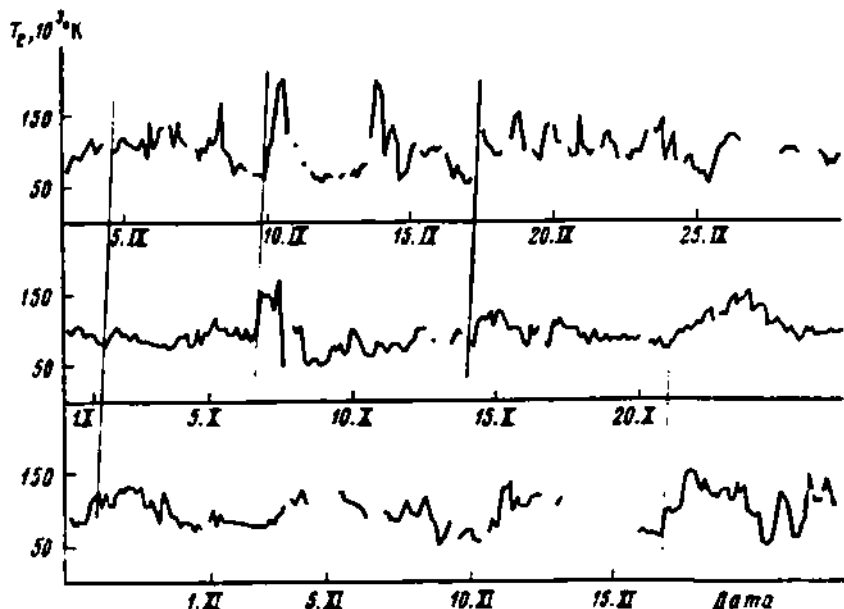


Рис. 2. Температура электронов, осредненная по трехчасовым интервалам. 1971 г.

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

На рис. 3 в билогарифмическом масштабе приведены значения 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 $T_e(r) = T_e(R_s) \cdot (R_s/r)^n$ методом наименьших квадратов (с учетом различного количества измерений T_e в интервалах осреднения) можно определить показатель степени n и значение T_e на некотором фиксированном расстоянии $R_s = 1$ а.е. = $150 \cdot 10^6$ км. Наиболее образом в указанном выше смысле измерения соответствует эмпирическая формула

$$T_e(r), 10^4 \text{ }^\circ\text{K} \approx 120 (R_s/r)^{0.8}$$

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

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

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

ИМП-6 (март — июнь 1971 г.) $\sim 133 \cdot 10^4 \text{ }^\circ\text{K}$ (*).

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 (трехлучный 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 $T_e(R_e)$, 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 $T_e(R_e)$, 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 T_e по

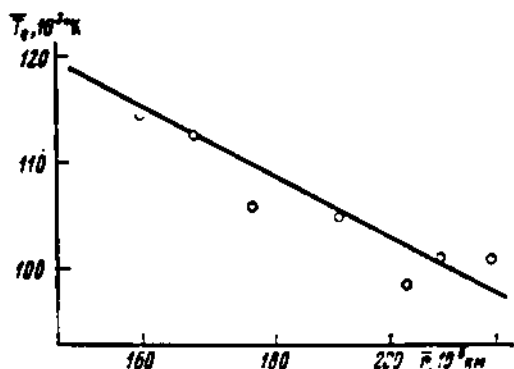


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость средней температуры электронов от гелиоцентрического расстояния

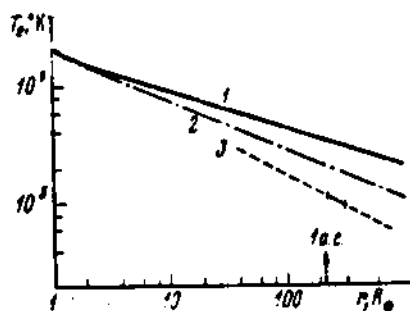


Рис. 4

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 T_e , по данным ИМП-6 на $7 \cdot 10^4$ К и что это уменьшение произошло за 3,5 года, то можно оценить среднее уменьшение T_e при уменьшении солнечной активности (с 1968 г. по 1971 г. числа Вольфа быстро уменьшались) как $\sim 2 \cdot 10^4$ К в год. За время полета КА «Марс-3» ($\sim 0,5$ года) это уменьшение составило бы $\sim 10^4$ К, 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 T_e за время полета КА «Марс-3». Однако, согласно модели спирального межпланетного магнитного поля, при средней скорости 400 км/сек это изменение $\delta\theta \sim 15^\circ$ (заметьте, что измерения между орбитами Земли и Марса (4) не обнаружили заметного изменения θ), что при учете характерной анизотропии $T_e \sim 1,1$ (5) и ширины угловой диаграммы прибора на КА «Марс-3» $\pm 40^\circ$ не может дать существенного систематического уменьшения T_e .

Некоторое влияние на величину показателя степени может оказать и то, что определение показателя степени нелинейной (степенной) зависимости производили не по отдельным значениям T_e , а по осредненным за 27 дней значениям 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 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 $3 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ и $2 \cdot 10^6$ К в двухжидкостной модели Старрока и Хартла (11, 12) и в одложидкостной модели Вонга и Чанга (13). Зависимость $T_e(r)$, 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 $T_e(r)$ по данным наших измерений спадает более круто, чем в рассматриваемых моделях (в модели Старрока и Хартла $n=3/2$, а у Вонга и Чанга $n=2/3$). 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, (²)) преобладает член, описывающий электронную теплопроводность, то на достаточно больших расстояниях $T_e(r)$ спадает достаточно медленно ($\sim r^{-1/2}$). При уменьшении коэффициента теплопроводности увеличивается роль членов, описывающих адиабатическое расширение ($T_e(r) \sim r^{-1/2}$) и, следовательно, в окрестности Земли спад температуры должен быть более быстрый $T_e(r) \sim r^{-\alpha}$, $\alpha > 1/2$.

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 неонную теплопроводность, то в окрестности Земли получим более быстрый спад $T_e(r) \sim r^{-1/2}$ по сравнению с моделью (^{11, 13}). 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 $(R_p/r)^2$, 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-306, 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. Н. Гринсгау, В. В. Безруких и др., Космические исследования, т. 12, в. 3, 430 (1974). ⁷ К. Н. Гринсгау, В. В. Безруких и др., Там же, т. 12, в. 4, 585 (1974). ⁸ J. H. Wolfe, In: Solar Wind, NASA SP-306, 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-306, Washington, 1972, p. 244. ¹⁵ C. L. Wolff, J. C. Brandt, R. C. Southwick, Astrophys. J., v. 165, 181 (1971).