

## НЕПОСТОЯНСТВО ПАРАМЕТРОВ МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ

В 1958—1963 гг. основной задачей спутниковых измерений приземной и межпланетной плазмы явились определение средних параметров (усредненных по времени и по пространству) — распределения магнитного поля и плотности плазмы. Эта задача в известной степени уже выполнена. На этом пути были открыты и исследованы, например, следующие принципиально важные элементы процесса обтекания Земли солнечным ветром: сильно турбулентная область перед магнитосферой (магнитный пограничный слой), границы магнитосферы, магнитный хвост Земли, всплески быстрых электронов и протонов, генерируемых пока еще не ясным ускорительным механизмом как на дневной стороне, так и в хвосте, радиационные пояса со сложным конгломератом частиц разных энергий. Выяснилась, однако, крайняя изменчивость параметров приземной и межпланетной плазмы — изменения всех величин порядка их самих, что указывает на разнообразие нелинейных физических процессов, непрерывно происходящих даже в «спокойном» солнечном ветре. Поэтому в настоящее время центр научных исследований переместился, естественно, на изучение нестационарных процессов в плазме Солнца, Земли и разделяющего их межпланетного пространства.

По мере прогресса спутниковых измерений усредненные характеристики, которые полезны для морфологии, и не всегда могут быть подставлены в уравнения физических процессов, постепенно заменяются совокупностью измеренных значений параметров плазмы ( $n$ ,  $u$ ,  $T_e$ ,  $T_i$ ,  $H$ ), отнесенных к одному и тому же временному интервалу.

Кроме того, зная не один, а несколько параметров плазмы, можно уже выбрать определенную модель ее описания (если  $n \times T_e \gg H^2/8\pi$ , то это плазма высокого давления, при  $n \times T_e \ll H^2/8\pi$  — холодная плазма в приближении магнитной гидродинамики и т. д.).

В данном реферате мы проиллюстрируем такую эволюцию предмета исследований на характерном примере измерений межпланетного магнитного поля, плотности межпланетной плазмы, ее температуры и скорости на спутнике «Маринер II».

В предварительных результатах по «Маринеру II» (1962) авторы<sup>1</sup> (Нейгебауэр и Снайдер), приводя большое число отдельных энергетических спектров ионов солнечного ветра, основное внимание уделяли определению средних параметров, а также пределов, в которых изменялись плотность, температура и скорость. Выяснилось, что полученные данные (если считать распределение максвелловским) согласуются со следующими параметрами солнечного ветра:

$$\begin{aligned} T_i &= (2-4) \cdot 10^5 \text{ °К} & \text{(температура ионов),} \\ n &= 2-4 \text{ см}^{-3} & \text{(плотность),} \\ u &= 300-700 \text{ км/сек} & \text{(направленная скорость).} \end{aligned}$$

Среднее значение межпланетного магнитного поля  $H \sim 5\text{y}$ . Так что отношение  $\beta = \frac{n \times T_i}{H^2} 8\pi = 1/3$ . Поэтому солнечный ветер можно считать бесстолкновительной плазмой низкого давления (холодной).

Но в 1966 г. в соответствии с общей эволюцией космической физики такие оценки уже недостаточны. Нужно выяснить детальную картину по дням и часам. И в 1966 г. те же авторы публикуют новую работу «Средние характеристики солнечного ветра»<sup>2</sup>, где усреднение проводится каждые 3 часа и выясняется временная эволюция этих трехчасовых средних. Характерно, что эта работа написана по тем же

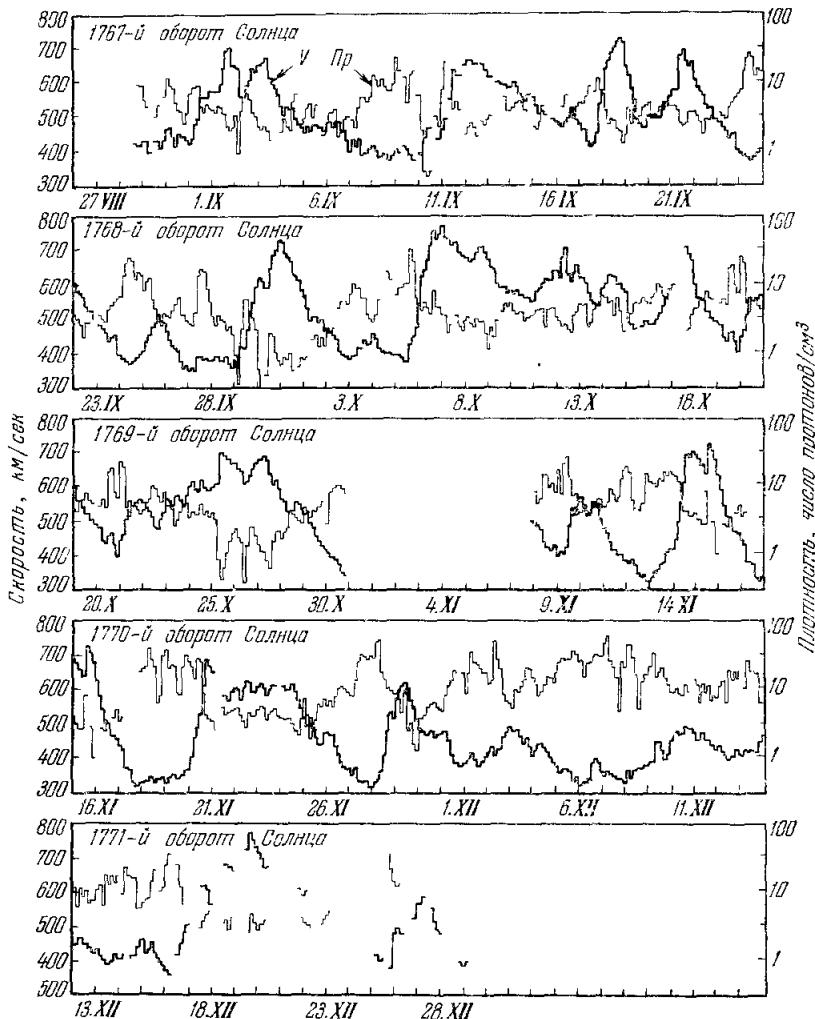


Рис. 1. Трехчасовые средние скорости солнечной плазмы и ее плотности.

экспериментальным данным «Маринера II» (1962 г.), но цели ее уже иные — не усреднить, а наоборот, определить эволюцию параметров солнечного ветра ото дня ко дню.

На рис. 1 показаны трехчасовые средние для плотности плазмы и направленной скорости солнечного ветра, на рис. 2 — аналогичные средние для температуры ионов и направленной скорости. Подчеркнем, что плотность и температура показаны в логарифмическом масштабе, т. е. они меняются не по порядок и больше. Наименьшая плотность наблюдалась 11.IX.62 г. ( $0.08-0.09 \text{ см}^{-3}$ ), наибольшая — 9.XII (90  $\text{см}^{-3}$ ), их отношение  $\sim 10^3$ . Наименьшая температура  $T_{\min} \sim 10^4 \text{ K}$ , наибольшая —  $9 \cdot 10^5 \text{ K}$  (17.XII.66), разница в 2 порядка.

Теоретические оценки температуры солнечного ветра дают (Стэррок и Хартли<sup>5</sup>)  $T \sim 3000^\circ \text{ K}$ . Но в расчетах не учитывался нагрев плазмы флюктуациями электромагнитных полей. А экспериментальные значения температуры солнечного ветра, измеренные на «Маринере II», свидетельствуют о сильном нагреве положительных ионов коллективными эффектами в нелинейных волнах на ионной и электронных ветвях.

На рис. 3 показана зависимость плотности плазмы, потока частиц и потока количества движения в функции расстояния от Солнца. Сплошная линия — закон обратных квадратов  $n \sim \text{const}/r^2$ . Плотность, как это видно из рис. 1—3, гораздо быстрее меняется с расстоянием, чем скорость солнечного ветра, и ход кривых рис. 3 обусловлен изменением плотности.

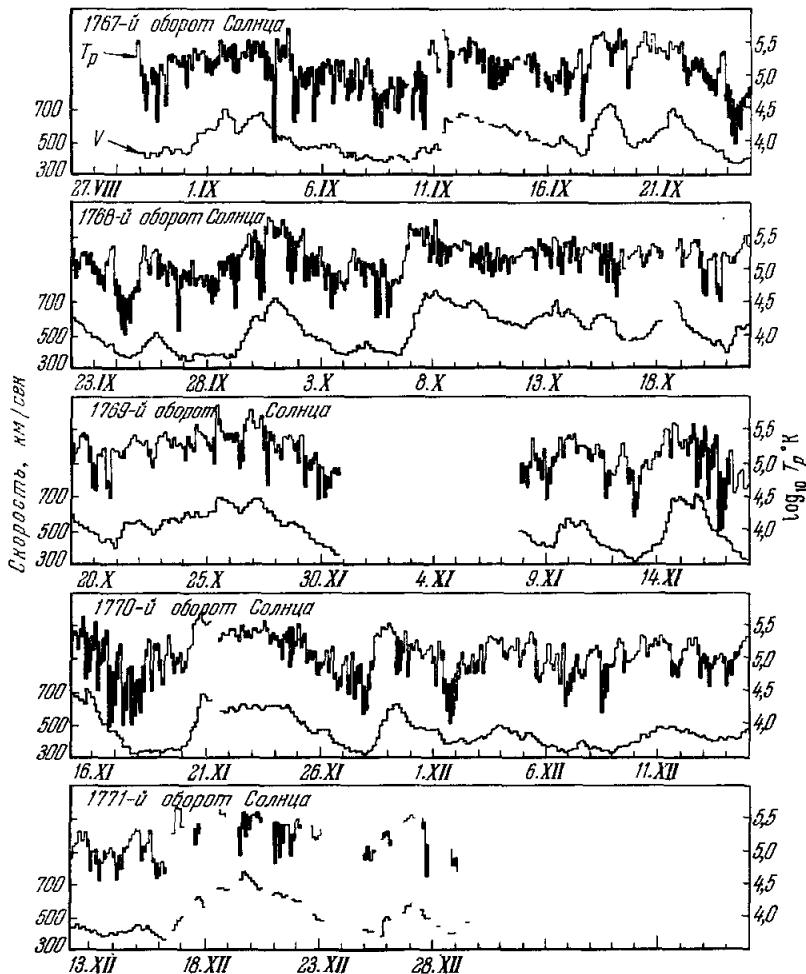


Рис. 2. Трехчасовые средние скорости солнечной плазмы и температуры ионов в ней.

Скорость солнечного ветра менялась в пределах  $u_{\min} = 319 \text{ км/сек}$ ,  $u_{\max} = 771 \text{ км/сек}$ .

Отметим, что с ростом скорости плотность падает, при уменьшении скорости плотность растет. Такая связь следует из непрерывности потока ( $\text{div } \mathbf{u} = 0$ ).

Эти особенности кривых  $n(t)$ ,  $T(t)$ ,  $u(t)$  подтверждаются измерениями межпланетной плазмы на «Пионере VI» (1966 г. Лазарус и др.<sup>3</sup>), показанными на рис. 4. Согласие с результатами Лазаруса и др. весьма важно для физической достоверности. Дело в том, что данные Нейгебауэр и Снайдера на «Маринере II» были получены с помощью электростатического анализатора, а данные Лазаруса, Бриджа и Дэвиса — с помощью ионных ловушек (цилиндр Фарадея, по типу ловушек Грингауза). Между тем в литературе многократно отмечалось, что ловушки дают иные результаты, чем электростатические анализаторы. Поэтому согласие в данном случае столь разноречивых методов значительно повышает достоверность результата.

Сопоставим характеристики межпланетной плазмы со значениями магнитного поля, которые измерены на «Маринере II» и опубликованы в статье Кольмана и др.<sup>4</sup> для тех же дней, что и в<sup>1</sup> (см. также<sup>6</sup>).

Не имеет смысла претендовать здесь на точность, поскольку в <sup>4</sup> опубликована лишь компонента  $H$  вдоль паркеровской спирали  $H_W$ , остальные компоненты (возмуще-

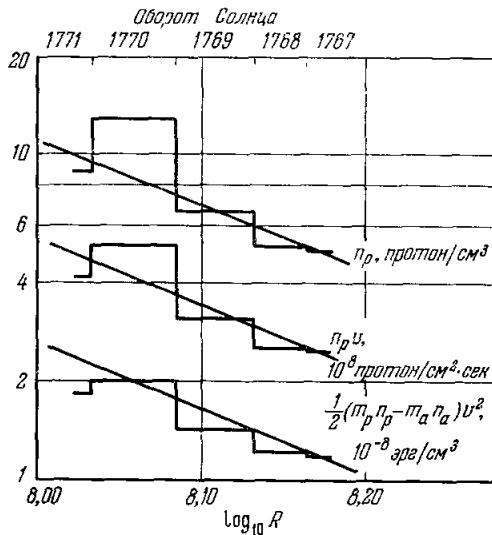


Рис. 3. Характеристики солнечной плазмы в их зависимости от расстояния от Солнца  
(усреднение за оборот Солнца — за 27 дней;  $R$  выражено в км).

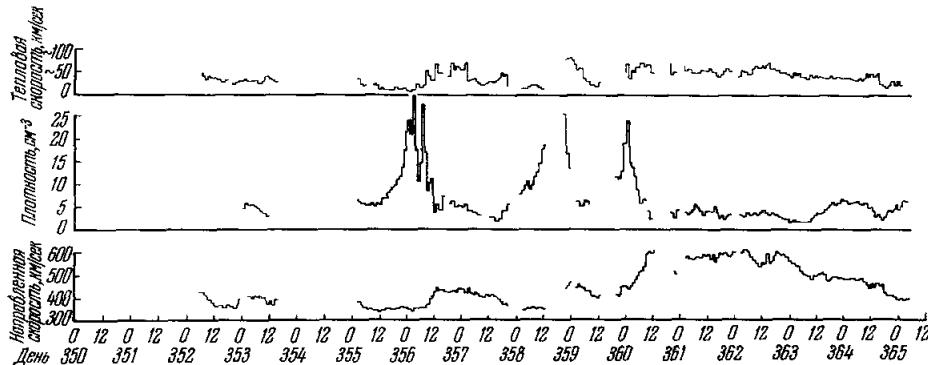


Рис. 4. Параметры плазмы солнечного ветра (протоны). Данные усреднены за 1 час. Значения тепловой скорости зависят от принятой модели плазмы, их следует считать оценочными.

ние) неизвестны. Однако направление паркеровской спирали — это преимущественное направление поля, и поэтому для следующих ниже качественных оценок можно принять  $H_W$  за полное поле. Тогда для разных дней получаем следующие числа Маха ( $\mathfrak{M} = u/v_A$ ,  $v_A$  — альвеновская скорость) и значения  $\beta = \frac{n_e T_i}{H^2} 8\pi$ :

	23. IX	24 IX	25. IX	26. IX	27. IX	28. IX	29. IX	30. IX	2. X	3. X	4. X
$\mathfrak{M}$	17	8,3	12,5	11	13	9,2	6		11	9	20
$\beta$	2,5	0,44	0,45	1,4	0,4	0,83	0,1	0,1	2	1,53	4,5

Т. е. течение сверхзвуковое, а плазма имеет иногда низкое давление ( $p < H^2/8\pi$ ), а иногда высокое ( $p > H^2/8\pi$ ). Между 9 и 16. XI  $\beta = 2$ . Тогда магнитное поле не в состоянии удержать плазму, оно нерегулярно и меняется по направлению и величине в соответствии с флюктуациями плазмы.

Таким образом, в динамике межпланетной плазмы могут быть использованы (для разных периодов и областей) обе модели — горячей и холодной плазмы, таковы результаты измерений на языке физики. На языке геофизики — межпланетная плазма состоит из сложной совокупности холодного солнечного ветра и более горячих потоков в нем.

М. Г.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. Neugebauer, C. Snyderr, Preliminary results of «Mariner II» Report to COSPAR Meeting, 1964.
2. M. Neugebauer, C. Snyderr, J. Geophys. Res. **71**, 4469 (1966).
3. A. Lazarus et al., J. Geophys. Res. **71**, 3787 (1966).
4. P. Coleman et al., J. Geophys. Res. **71**, 11, 2831 (1966).
5. P. Sturrock, R. Hartlie, Phys. Rev. Letts **16**, 628 (1966).
6. P. Coleman, Phys. Rev. Letts **17**, 207 (1966); J. Geophys. Res. **71**, 5509 (1966).