

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ВЕСТНИК  
АКАДЕМИИ НАУК  
СССР

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

5

---

МОСКВА · 1965

## ОКОЛОЗЕМНАЯ И МЕЖПЛАНЕТНАЯ ПЛАЗМА

Доктор технических наук  
К. И. ГРИНГАУЗ

В настоящем обзоре речь будет идти о плазме вблизи Земли (с температурой не более десятков тысяч градусов) и в межпланетном пространстве (с температурой не более сотен тысяч градусов). В нем не будут затрагиваться вопросы, связанные с радиационными поясами Земли, хотя потоки заряженных частиц в них следует относить к энергичной компоненте околоземной плазмы (что стало особенно очевидным после открытия в 1961 г. Л. Р. Дэвисом и Дж. Уильямсоном протонных потоков во внешнем радиационном поясе). Мы не будем также касаться физических свойств самого внешнего пояса заряженных частиц, который был открыт в 1959 г. во время полетов советских лунных ракет, расположенного за радиационными поясами Земли и состоящего из потоков электронов и ионов с энергиями порядка сотен и тысяч электронвольт.

\*

Наши сегодняшние представления об ионизированном газе вблизи Земли и в межпланетном пространстве весьма отличаются от тех, которые существовали до пусков космических ракет. В 1957 г. считалось, что в межпланетном пространстве в районе орбиты Земли содержится порядка 600—1000 электронов в  $1 \text{ см}^3$ . Считалось также, что верхняя граница ионосферы (т. е. область, где концентрация электронов становится равной концентрации их в межпланетной среде) лежит на высоте 1000 км. При этом о высотном распределении электронов имелись данные лишь до 400 км; о возможности существования ионосферы на высотах до 1000 км судили лишь по тому, что там иногда наблюдались верхние границы полярных сияний.

После запуска в 1957 г. первого советского спутника, в феврале 1958 г. — первой вертикальной ракеты Академии наук СССР, а в мае 1958 г. — третьего советского спутника, стало ясно, что на высоте 1000 км содержится примерно 50 000 заряженных частиц в  $1 \text{ см}^3$ , т. е. граница ионосферы проходит значительно выше. Новые результаты привели в 1958 г. некоторых геофизиков к выводу, что она расположена на высоте 2000—3000 км. Эти взгляды просуществовали очень недолго: эксперименты на первых советских лунных ракетах, уже в 1959 г. дали основания для пересмотра взглядов как на размеры ионизированной газовой оболочки Земли, так и на свойства межпланетной плазмы.

Каковы же были представления о межпланетной плазме до 1959 г.?

О существовании и свойствах межпланетной плазмы можно было судить по следующим явлениям: рассеянию солнечного света на частицах межпланетного вещества и его поляризации; взаимодействию газовых хвостов комет (так называемых хвостов первого типа) с межпланетной плазмой; вариациям космических лучей (являющимся результатом их взаимодействия с межпланетной плазмой и вмороженными в нее космическими полями); геомагнитным возмущениям.

Кроме того, надежным способом получения сведений о межпланетной плазме считался тогда метод, основанный на наблюдениях низкочастотных электромагнитных импульсов (так называемых свистящих атмосфериков), распространяющихся по силовым линиям геомагнитного

поля. Так как в экваториальной плоскости эти силовые линии удаляются от Земли на многие тысячи километров, а граница ионосферы считалась лежащей на высоте 1000—2000 км, то, естественно, сведения о концентрации ионизованного газа, получаемые из наблюдений свистящих атмосфериков, относились к межпланетной среде.

В 1953 г. немецкие астрофизики А. Бэр и Х. Зидентофф, измерив поляризацию зодиакального света и предположив, что она полностью определяется свободными электронами в межпланетном пространстве, пришли к выводу, что электронная концентрация  $N_e$  вблизи орбиты Земли близка к 600 электронов в  $1 \text{ см}^3$ . Некоторые астрофизики (в том числе В. Г. Фесенков) считали, что поляризация зодиакального света может в большой степени определяться межпланетной пылью. Однако в том же 1953 г. канадский радиофизик Л. Стори, наблюдая распространение свистящих атмосфериков вдоль магнитной силовой линии с максимальным удалением от Земли  $\sim 12\,500 \text{ км}$ , определил величину  $N_e$  на этой высоте: она оказалась равной  $\sim 1000$  электронов в  $1 \text{ см}^3$ , т. е. очень близкой к оценке А. Бэра и Х. Зидентоффа. Это совпадение (как потом оказалось случайное) сочли за взаимное подтверждение результатов, и оценка величины  $N_e \sim 1000$  электронов в  $1 \text{ см}^3$  для межпланетного пространства вблизи земной орбиты стала практически общепринятой.

Так, в модели межпланетной плазмы одного из основоположников современной геофизики английского ученого С. Чэпмена, относящейся к 1957 г., принималось, что межпланетное пространство заполнено продолжением солнечной короны — ионизованным газом, находящимся в гидростатическом равновесии; вблизи орбиты Земли, согласно этой модели,  $N_e \approx 10^3$  электронов в  $1 \text{ см}^3$ , а температура плазмы  $T \sim 10^5 \text{ }^\circ\text{K}$ . Межпланетное магнитное поле с межпланетной плазмой в теории Чэпмена не связывалось.

В 1958—1959 гг. Ю. Паркер (США) предложил новую теорию, учитывавшую наблюдения Л. Бирмана над газовыми хвостами комет, систематические отклонения которых в направлении от Солнца могли быть вызваны только воздействием движущихся от него потоков плазмы. В отличие от статической модели Чэпмена Паркер создал динамическую модель, в которой межпланетное пространство заполняется потоками плазмы, непрерывно истекающими из внешних областей солнечной короны, поскольку в них энергия частиц превышает потенциальную энергию удерживающего их гравитационного поля Солнца. Эти потоки плазмы были названы «солнечным ветром». Истечение плазмы вблизи Солнца происходит со сравнительно малыми скоростями (порядка десятков километров в секунду), но по мере удаления от Солнца скорости увеличиваются и вблизи орбиты Земли достигают нескольких сот километров в секунду. Это непрерывное ускорение частиц солнечной плазмы объясняется непрерывно действующими на них силами, обусловленными разностью давлений вблизи Солнца и в межзвездном пространстве. Формально уравнения Паркера, описывающие движение ионизованного газа от Солнца, оказались подобными хорошо известным в газодинамике уравнениям, характеризующим поведение газа в сопле Лавала, на входе которого газ движется с дозвуковой скоростью, а на выходе — со сверхзвуковой. Потоки плазмы, покидающие корону Солнца, уносят с собой, по Паркеру, вмороженное в них магнитное поле, напряженность которого убывает пропорционально квадрату расстояния. Существенно идеализируя магнитную обстановку на Солнце и принимая напряженность магнитного поля на нем равной  $\sim 1$  эрстеду, Паркер оценил напряженность межпланетного магнитного поля вблизи орбиты Земли в  $\sim 2 \cdot 10^{-5}$  эрстед.

Так как энергия магнитного поля, уносимая потоками плазмы, составляет лишь весьма малую часть общей энергии потоков (носителями которой являются в основном протоны), потоки солнечной плазмы движутся относительно Солнца по направлениям, весьма близким к радиальным. В то же время силовые линии межпланетного магнитного поля, начала которых находятся на вращающемся Солнце, должны представлять собой, согласно теории, о которой идет речь, подобия спиралей Архимеда.

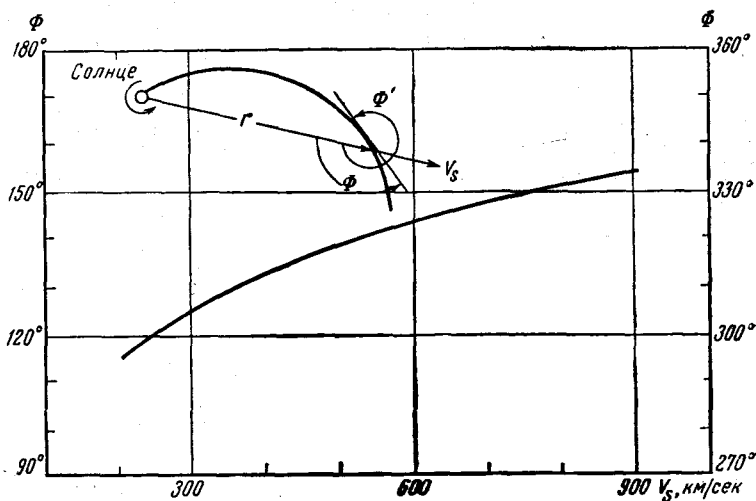


Рис. 1. Зависимость угла  $\Phi$ , определяющего ориентацию вектора напряженности межпланетного магнитного поля в плоскости эклиптики, от скорости потоков солнечной плазмы  $V_s$  (рассчитана Н. Ф. Нессом и др. на основе теории Паркера)

В зависимости от скорости потоков плазмы ориентация вектора напряженности межпланетного магнитного поля будет меняться так, как это показано на рис. 1.

По расчетам Паркера, сделанным в 1958—1959 гг., потоки плазмы вблизи орбиты Земли должны были составлять величины порядка  $10^{11}$  частиц через  $1 \text{ см}^2/\text{сек}$ , что при скорости потока  $\sim 1000 \text{ км/сек}$  соответствует концентрации  $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$ , как и в модели Чэпмена.

Теория Паркера после ее опубликования была подвергнута критике. Казалось парадоксальным, что расширение солнечной короны на больших расстояниях от Солнца происходит со скоростями, превышающими тепловые скорости протонов в самой короне (при температуре  $10^6 \text{ К}$  тепловая скорость протона составляет  $\sim 130 \text{ км/сек}$ ). Указывалось, что при решении дифференциальных уравнений автор теории необоснованно выбирает постоянные интегрирования. Дж. Чэмберлен в 1960 г. создал новую теорию расширения солнечной короны, согласно которой скорость потоков солнечной плазмы у орбиты Земли должна составлять около  $30 \text{ км/сек}$ .

Тем не менее прямые эксперименты, проведенные в межпланетном пространстве в последние годы, большей частью свидетельствуют в пользу правильности основных выводов Паркера.

В 1958 г. В. В. Безруких, К. И. Грингауз, В. Д. Озеров и Р. Е. Рыбчинский впервые осуществили эксперименты по изучению плазмы вблизи



Земли (на высотах более 2000 км) и в межпланетном пространстве с помощью методов, близких к обычно применяющимся в лабораториях при изучении плазмы газового разряда. На всех трех советских лунных ракетах, запущенных в 1959 г., были установлены приборы, непосредственно измеряющие потоки заряженных частиц, которые попадают из среды, окружающей космический аппарат, в собирающее устройство-ловушку. Потоки заряженных частиц регистрировались в виде токов, величина которых передавалась на Землю через радиотелеметрическую систему. При этом можно было грубо оценивать энергии регистрируемых частиц.

Результаты измерений токов в ловушках, установленных на лунных ракетах, с несомненностью показали, что вплоть до высот около 20 000 км Земля окружена ионизированным газом, частицы которого имеют тепловые скорости. При этом на высотах от ~10 000 до ~20 000 км концентрация положительных ионов  $N_i$  менялась соответственно от ~ $10^3$  частиц в  $1 \text{ см}^3$  до ~ $10^2$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ . Выше 22 000—24 000 км тепловые ионы в этих опытах обнаружены не были. Следует заметить, что хотя определение величины  $N_i$  вблизи Земли в опытах на лунных ракетах 1959 г. не могло быть осуществлено с высокой точностью, изменения  $N_i$  на высотах более 10 000 км были, несомненно, значительнее, чем возможные погрешности опытов.

Анализ результатов измерений, относящихся к области, близкой к Земле (он выполнялся при участии В. Г. Курта, В. И. Мороза и И. С. Шкловского), позволил сделать вывод, что зарегистрированные выше 2000 км ионы с тепловыми скоростями представляют собой протоны. По-видимому, они образуются в результате ионизации атомов водорода, появляющихся в верхней атмосфере Земли при испарении Мирового океана. Как диссоциация молекул воды, так и ионизация водорода происходят за счет ультрафиолетового излучения Солнца.

Поскольку нейтральность ионизированного газа (т. е. равенство  $N_i$  и электронной концентрации  $N_e$ ) на высотах >2000 км не вызывала сомнений, то из опытов на лунных ракетах следовало, что упоминавшееся выше определение  $N_e$  на высоте ~12 500 км, выполненное в 1953 г. Л. Ф. Стори ( $N_e \approx 1000 \text{ см}^{-3}$ ), было правильным, но оно относилось не к межпланетному пространству, как считалось ранее, а к ионизированной газовой оболочке Земли. Отсюда следовало также, что поляризация зодиакального света, измеренная в 1953 г. А. Бэрром и Х. Зидентопфом, вызывалась не электронами, а пылевой компонентой межпланетной среды.

Интересно отметить, что характерная область спада концентрации заряженных частиц на высотах >10 000 км, обнаруженная в опытах 1959 г. на советских лунных ракетах, никем более не наблюдалась, пока ее не установил в экваториальной ионосфере Д. Карпентер (США), который опубликовал в 1963 г. данные о высотном распределении  $N_e$ , полученные при изучении свистящих атмосфериков (рис. 2). Он назвал это явление «эффектом колена».

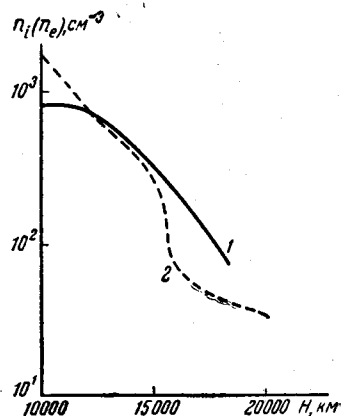


Рис. 2. Высотное распределение заряженных частиц в периферийной части земной ионосферы. 1 — концентрация ионов по данным ловушек заряженных частиц на станции «Луна-2», 2 — концентрация электронов над экваториальной областью по данным свистящих атмосфериков

В настоящее время мы располагаем обширными экспериментальными данными о толщине ионосферы Земли, полученными методом ловушек заряженных частиц на советском спутнике «Электрон-2», который был запущен в январе 1964 г. на орбиту с апогеем  $\sim 67\,500$  км в составе космической системы «Электрон». При каждом удалении этого спутника

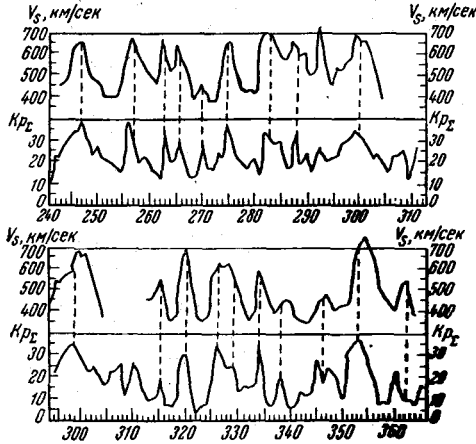


Рис. 3. Результаты измерений скоростей потоков солнечной плазмы, проведенных в 1962 г. при помощи станции «Маринер-2». По оси абсцисс отложено время (в сутках). По осям ординат отложены: на верхней кривой — средняя скорость потока в км/сек, на нижней кривой — индекс, характеризующий среднюю за сутки интенсивность геомагнитных возмущений, наблюдаемых на Земле

реляция между регистрируемыми ловушками потоками солнечной плазмы и индексами геомагнитных возмущений на Земле. Наибольший поток солнечной плазмы ( $10^9$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>) наблюдался при полете в 1961 г. советской межпланетной станции к Венере во время сильной магнитной бури на Земле.

Измеренные в советских экспериментах 1959—1961 гг. величины потоков солнечной плазмы означали, что если скорость потоков соответствовала теории Паркера (т. е. была порядка 500—1000 км/сек), то концентрация протонов в межпланетном пространстве составляет единицы частиц в 1 см<sup>3</sup> (а не сотни частиц, как считал Паркер в 1959 г.).

Первые американские наблюдения потоков солнечной плазмы в межпланетном пространстве были выполнены в опытах Б. Росси, Г. Бриджа и др. на ракете «Эксплорер-10» (максимальное удаление от Земли  $\sim 200$  тыс. км), запущенной в марте 1961 г. Эти опыты подтвердили порядок величин потоков, определенный в опытах на советских лунных ракетах. Но на «Эксплорере-10» кроме величин потоков определялись и энергии протонов, а следовательно, и их скорости  $V_s$ , оказавшиеся близкими к 400—500 км/сек, т. е. к величинам, полученным в расчетах Паркера.

Однако, поскольку все опыты до 1962 г. носили отрывочный характер, т. е. проводились в виде сравнительно кратковременных сеансов наблюдений, они не позволяли утверждать, что зарегистрированные потоки солнечной плазмы существуют всегда, т. е. относятся к «солнечному ветру»

от Земли и каждом приближении к ней наблюдались соответственно убывание и возрастание ионного тока в ловушке.

Когда в 1959 г. советские лунные ракеты удалялись от Земли на расстояния более 100 тыс. км, в установленных на них ловушках заряженных частиц регистрировались направленные потоки положительных ионов с энергиями, превышающими несколько десятков электронвольт. Величины потоков колебались от  $10^8$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup> до нескольких единиц на  $10^8$  см<sup>-2</sup> сек<sup>-1</sup>.

Таким образом, были осуществлены первые наблюдения потоков солнечной плазмы в межпланетном пространстве вне геомагнитного поля.

Во время сеансов наблюдений которые неоднократно проводились во время полета третьей лунной ракеты (облетевшей и сфотографировавшей Луну в октябре 1959 г.), была установлена кор-

**Паркера.** Только почти непрерывные четырехмесячные наблюдения потоков солнечной плазмы, выполненные М. Найгебауэр и К. Снайдером в августе — декабре 1962 г. с помощью американской станции «Маринер-2», запущенной к Венере, позволили сделать окончательный вывод о том, что потоки солнечной плазмы существуют всегда, как и должно быть согласно модели Паркера, и их скорости близки к предсказанным его теорией. Вариации скоростей солнечного ветра в период наблюдений на «Маринере-2», а также одновременные вариации индекса геомагнитных возмущений, зарегистрированные на Земле, показаны на рис. 3.

Измерения потоков солнечной плазмы и их скоростей велись также на советской станции «Марс-1», запущенной в ноябре 1962 г. к Марсу. Однако на этой станции скорости частиц солнечной плазмы измерялись только во время сравнительно редких сеансов радиосвязи с Землей.

Выше приведена часть таблицы, составленной японским геофизиком Т. Обаяши, в которой даны результаты ракетных наблюдений потоков солнечной плазмы (теперь уже можно говорить «солнечного ветра»).

К этим цифрам следует добавить, что, по данным измерений на советской станции «Марс-1», во время геомагнитных бурь величины потоков солнечного ветра достигают  $10^9 \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  (это наблюдалось и на станции «Венера-1»). Величины потоков до  $10^9 \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$  были

Название космического аппарата	Год	Поток ионов, $\text{см}^{-2}\text{сек}^{-1}$
«Луна-2» (СССР)	1959	$2 \times 10^8$
«Луна-3» (СССР)	1959	$4 \times 10^8$
«Венера-1» (СССР)	1961	$10 \times 10^8$
«Эксплорер-10» (США)	1961	$3 \times 10^8$
«Маринер-2» (США)	1962	$2 \times 10^8$

зарегистрированы также американским спутником «Эксплорер-18» (ИМП-1), запущенным в 1963 г. на орбиту с апогеем  $\sim 200\,000 \text{ км}$ .

Значительно подкрепляют теорию солнечного ветра Паркера результаты радиолокации Солнца, проведенной в 1962 г. на частоте 38 мгу А. Максвеллом, Р. Дефоу и Р. Кэмпингсом в Гарвардской радиоастрономической обсерватории (США). Анализ доплеровских частот в спектре отраженных сигналов показал, что на высоте  $\sim 350\,000 \text{ км}$  над фотосферой Солнца солнечная корона расширяется со скоростью  $\sim 16 \text{ км/сек}$ ; это близко к значению скорости, рассчитанному Паркером для данной высоты в предположении, что температура короны  $\sim 10^6 \text{ К}$  (см. рис. 4).

Таким образом, в настоящее время имеются убедительные экспериментальные данные, свидетельствующие в пользу правильности представлений Паркера о расширении короны Солнца с возрастающей по мере удаления от него скоростью.

Изменения магнитных полей вблизи орбиты Земли, проведенные после 1960 г. на нескольких советских и американских космических аппаратах, показали, что напряженность поля в межпланетном пространстве имеет величину порядка единиц на  $10^{-5}$  эрстед. Эта величина близка к оценке Паркера, которая основана на предположении, что межпланетное магнитное поле является частью магнитного поля Солнца, вмороженной в потоки солнечного ветра.

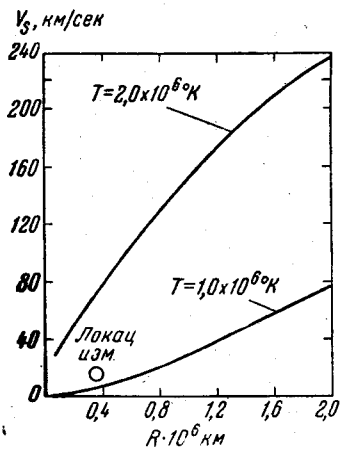


Рис. 4. Результаты радиолокационного определения скорости расширения солнечной короны вблизи Солнца и теоретического расчета Паркера для двух температур изотермической солнечной плазмы  $10^6 \text{ К}$  и  $2 \cdot 10^6 \text{ К}$

Особенно интересны магнитные измерения, проведенные Н. Ф. Нессом и др. на спутнике «Эксплорер-18». Первые опубликованные результаты этих измерений свидетельствуют о том, что ориентация вектора магнитного поля на наиболее удаленной от Земли части орбиты спутника находится в удовлетворительном соответствии с кривой, изображенной на рис. 1, т. е. подтверждают спиралевидную структуру межпланетного магнитного поля. Обнаружена также хорошая корреляция между вариациями магнитных полей на Солнце и в межпланетном пространстве, дополнительно подтверждающая «солнечное» происхождение межпланетного магнитного поля.

Разумеется, теория Паркера в ее первоначальном виде, построенная с использованием грубых идеализаций физических явлений на Солнце и в межпланетном пространстве (к таким идеализациям относятся предположения о сферической симметрии солнечной короны, об изотермичности плазмы при ее расширении, о радиальности солнечного магнитного поля, объяснение активных М-областей на Солнце чисто температурными эффектами), не может соответствовать всем деталям наблюдаемых явлений. Однако экспериментальные данные, полученные при помощи ракетной техники в последние годы, по нашему мнению, убедительно свидетельствуют о том, что основные свойства межпланетной плазмы эта теория объясняет правильно.

Как следует из приведенных выше данных, эксперименты нескольких последних лет показали, что толщина ионосферы Земли на порядок больше, а концентрация межпланетной плазмы на два порядка меньше, чем это представлялось до запуска первых космических ракет. Нет сомнений, что будущие ракетные эксперименты, методика которых непрерывно улучшается, в сочетании с такими наземными опытами, как наблюдение свистящих атмосфериков и радиолокация Соянца, позволят получить новые сведения о структуре периферийной области ионосферы Земли и ценные данные для уточнения теории солнечного ветра. Эти эксперименты, в частности, смогут показать, на каком удалении от Солнца солнечный ветер ослабевает, переходя в «солнечный бриз», и где проходит граница между межпланетной и межзвездной плазмой.