

АКАДЕМИЯ НАУК
СССР
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ
СЕРИЯ



КОСМОС

К. И. Грингауз

Изучение межпланетного газа и ионосфер планет при помощи ловушек заряженных частиц¹

Изучение межпланетного газа

Согласно имеющимся в настоящее время представлениям, ионизованный газ в межпланетном пространстве существует в двух формах: в виде «стационарного» газа, состоящего из заряженных частиц с тепловыми скоростями, и в виде солнечных корпускулярных потоков, представляющих собой потоки ионизованного газа, движущиеся в направлении от Солнца со скоростью около 1000 км/сек.

По оценке С. Чепмена, рассматривавшего стационарный ионизованный газ в Солнечной системе как продолжение солнечной короны, на расстоянии 1 астрономической единицы от Солнца концентрация свободных электронов (и ионов) должна быть порядка 10^3 см^{-3} при температуре 10^5° . Л. Бирман допускал, что в солнечных корпускулярных потоках концентрация свободных электронов (или ионов) может достигать 10^3 и даже 10^4 частиц в 1 см^3 . Высказывались также предположения о существовании постоянного потока заряженных частиц, испускаемого Солнцем, часто называемого «солнечным ветром»,

¹ Сокращенное изложение доклада, прочитанного на XII Международном астронавтическом конгрессе в октябре 1961 г. в Вашингтоне.

в котором, по оценке Е. Паркера, возможна концентрация ионов порядка сотен в 1 см^3 при скорости потока $\sim 500 \text{ км/сек}$.

Изучение вопроса о состояниях и концентрации ионизованного газа в межпланетном пространстве важно для астрофизики, ибо оно позволяет уточнить физические свойства среды, в которой движутся планеты Солнечной системы, и для геофизики, ибо солнечные корпускулярные потоки вызывают такие существенные геофизические эффекты, как полярные сияния, геомагнитные бури и ионосферные бури, оказывающие значительное влияние на радиосвязь между различными районами Земли. Кроме того, этот вопрос имеет значение и для астронавтики или, точнее, для радионавигации в межпланетном пространстве.

В самом деле, по мере увеличения инструментальной точности радионавигационных средств, компоненты радионавигационных ошибок, связанные с неточным знанием скорости распространения радиоволн, будут приобретать все большее и большее значение.

Скорость света в вакууме в настоящее время можно считать известной с точностью до $0,3 \text{ км/сек}$, т. е. до 10^{-6} . Если концентрация свободных электронов n_e в районе нахождения межпланетного корабля равна 10^3 см^{-3} , то для всех радиоволн с частотами не более $2 \cdot 10^8 \text{ гц}$ погрешность определения на Земле координат и скорости корабля при помощи радиометодов, вызванная различием скорости распространения радиоволн в ионизованном газе и в вакууме, будет больше, чем погрешность, вызванная неточным знанием скорости света; если же $n_e = 10^4 \text{ см}^{-3}$, то сказанное будет относиться ко всем радиоволнам с частотами менее $6 \cdot 10^8 \text{ гц}$ (при этом влияние ионосферы планеты на радиоизмерения не учитывается).

Таким образом, некоторые возможные характеристики межпланетной плазмы, встречающиеся в литературе, давали основания опасаться, что влияние межпланетного ионизованного газа может лимитировать точность радионавигационных измерений в межпланетном пространстве.

Можно, конечно, исключить влияние ионизованной среды на скорость распространения радиоволн, используя одновременные измерения при помощи радиоволн различных частот, но это связано с увеличением веса аппаратуры

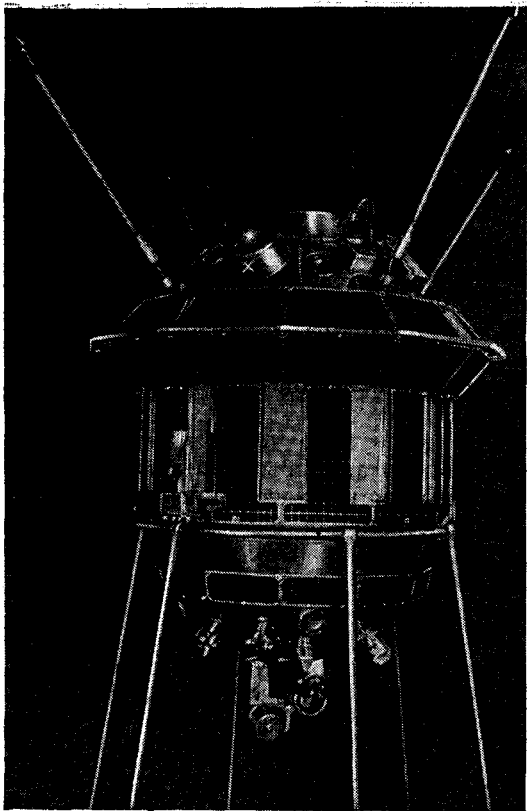


Рис. 1. Размещение трехэлектродных ловушек на третьей советской космической ракете
Ловушка отмечена крестиком

и энергопотребления на борту космического корабля, и поэтому нежелательно.

На всех советских космических ракетах, начиная с первой искусственной планеты, запущенной 2 января 1959 г., и включая автоматическую межпланетную станцию (АМС), запущенную в направлении к Венере 12 февраля 1961 г., были установлены трехэлектродные ловушки заряженных частиц, предназначенные для изучения межпланетной плазмы.

Проведенные с этими ловушками опыты позволили сделать ряд заключений, относящихся как к возможной концентрации межпланетного ионизованного газа с тепловыми скоростями частиц, так и к направленным потокам солнечных корпускул.

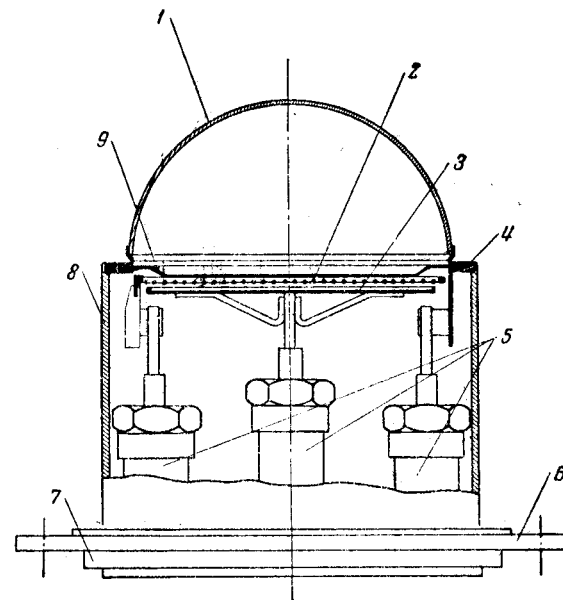


Рис. 2. Трехэлектродная ловушка

1 — внешняя сетка (никель); 2 — внутренняя сетка (вольфрам диам. 18 μ);
3 — коллектор (никель); 4 — изолятор (фторопласт); 5 — гермовводы
6 — основание; 7 — уплотнитель (резина); 8 — экран (алюминий);
9 — бленда (никель)

На третьей советской космической ракете, запущенной 3 октября 1959 г., были установлены четыре трехэлектродные ловушки заряженных частиц. Размещение этих ловушек показано на рис. 1. Конструкция всех ловушек была одинакова — она показана на рис. 2. На коллекторы всех ловушек были поданы одинаковые отрицательные потенциалы относительно корпуса — 30 в; на внутренние сетки — также одинаковые потенциалы — 200 в относительно корпуса (для подавления тока фотоэлектронов,

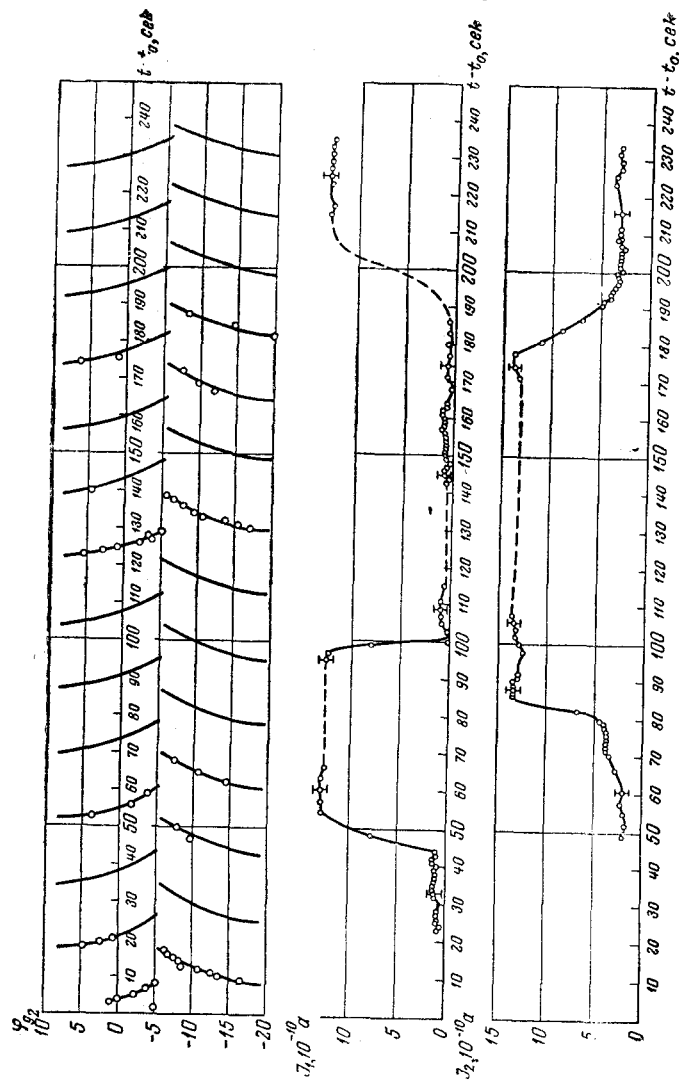


Рис. 3. Изменение потенциала внешних сеток и коллекторных токов двух ловушек

эмитируемых с коллектора под действием ультрафиолетового излучения Солнца). Потенциалы же внешних сеток были не одинаковы. На внешние сетки двух ловушек (на нижней и на верхней части контейнера) несколько раз во время полета в течение четырехминутных интервалов времени подавались пилообразные импульсы напряжения с периодом 20 сек., наложенные на постоянное напряжение — 5 в относительно корпуса, в результате чего потенциалы внешних сеток этих ловушек относительно корпуса менялись от +9 до —19 в. Графики изменений потенциала внешних сеток и коллекторных токов обеих ловушек во время одного из таких интервалов (в 14 час. 52 мин. московского времени 4 октября 1959 г. при $R = 126\,000$ км от Земли) приведены на рис. 3. За интервал времени $t - t_0$, соответствующий этим графикам, с ракеты было передано в общей сложности 240 значений напряжений на внешних сетках ловушек и коллекторных токов. Пунктирная линия означает отсутствие измеренных величин.

На телеметрических записях отчетливо видно попеременное увеличение и уменьшение положительных коллекторных токов обеих ловушек (с периодом 150 сек.), что отражает вращение АМС. Вместе с тем ясно, что изменение коллекторных токов ловушек совершенно не связано с изменением потенциалов их внешних сеток. Это, по-видимому, происходит потому, что положительные частицы, создающие коллекторные токи, обладают настолько большими энергиями, что изменения потенциалов внешних сеток примерно на 30 в на них не влияют. Если бы в окружающей среде имелась достаточная концентрация малоэнергичных заряженных частиц (с тепловыми скоростями), то создаваемый ими коллекторный ток обязательно был бы модулирован пилообразным напряжением с размахом около 30 в, подаваемым на внешние сетки ловушек. Поэтому отсутствие подобной модуляции может быть использовано для оценки n_i . Такая оценка была проведена и показала, что n_i не превышает единиц в кубическом сантиметре.

Указанная весьма малая концентрация стационарного межпланетного ионизованного газа оказалась неожиданной и противоречащей существовавшим ранее представлениям, на основе которых концентрацию электронов на расстоянии Земли от Солнца обычно оценивали как

$5 \cdot 10^2 - 10^3 \text{ см}^{-3}$. Вместе с тем следует заметить, что в самое последнее время появились работы, которые подтверждают, что концентрация межпланетного ионизованного газа весьма мала.

Из результатов опыта с ловушками заряженных частиц на третьей советской космической ракете следует, что свободные электроны стационарного межпланетного газа не могут оказывать заметного влияния на точность радионавигационных измерений в межпланетном пространстве, ибо их концентрация слишком мала. Таким образом, единственной формой существования межпланетной плазмы, представляющей интерес с этой точки зрения, являются солнечные корпускулярные потоки.

Коллекторные токи ловушек, показанные на графиках рис. 3, могут быть объяснены лишь попаданием АМС в поток положительно заряженных частиц с энергиями, значительно превышающими 200 эв, а изменения этих токов — изменением ориентации АМС относительно направления потока частиц. Заметим, что кинетическая энергия движения протонов относительно ракеты, при скорости ее относительно среды $\sim 30 \text{ км/сек}$ (равной орбитальной скорости Земли), составляет всего $\sim 5 \text{ эв}$. Электронная компонента потока не влияет на коллекторный ток, так как энергия электронов солнечных корпускулярных потоков недостаточна, чтобы преодолеть тормозящее электрическое поле, создаваемое внутренней сеткой ловушки. Точки, показанные на рис. 3, соответствуют потоку корпускул $4 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

Впервые ионная компонента солнечных корпускулярных потоков вне магнитного поля Земли была зарегистрирована 13 сентября 1959 г. при помощи трех-электродных ловушек во время полета второй советской космической ракеты. Во время полета третьей космической ракеты в первой половине октября 1959 г. на расстояниях порядка сотен тысяч километров от Земли при помощи ловушек заряженных частиц неоднократно регистрировались солнечные корпускулярные потоки, причем, как правило, наблюдалась хорошая корреляция между регистрацией корпускулярных потоков и возрастанием геомагнитных возмущений на Земле.

До настоящего времени наиболее интенсивный корпускулярный поток был зарегистрирован при помощи ловушек заряженных частиц во время полета советской кос-

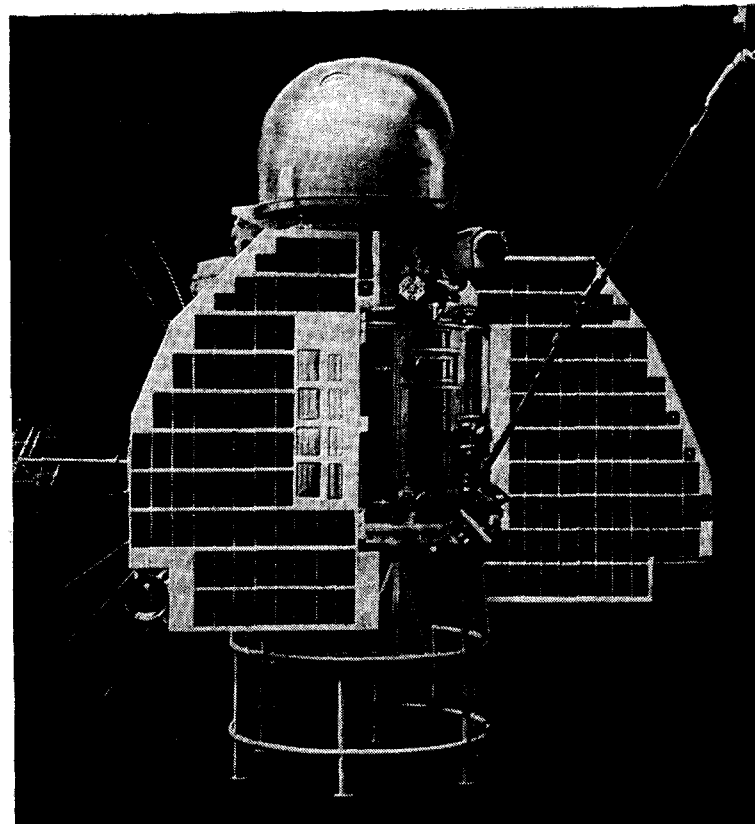


Рис. 4. Размещение ловушек на АМС
Ловушки показаны стрелками

мической ракеты, запущенной к Венере в феврале 1961 г. Размещение ловушек на АМС, запущенной к Венере, показано на рис. 4. Потенциалы внешних сеток ловушек: у первой 0 в, у второй +50 в. Во время сеансов радиотелеметрической связи ловушки были с большой точностью ориентированы на Солнце; в связи с этим зарегистрированные коллекторные токи впервые не были модулированы из-за вращения контейнера. Во время сеанса связи, начавшегося 17 февраля 1961 г. в 14 час. 35 мин. московского времени, АМС находилась на расстоянии 1 890 000 км

от Земли. При этом на протяжении двадцатиминутного сеанса в ловушках были зарегистрированы токи, соответствующие плотности потока положительных корпускул $10^9 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$.

На Земле в 12 час. московского времени было зарегистрировано начало магнитной бури. Скорость корпускулярного потока, определенная по времени запаздывания начала магнитной бури относительно прохождения области, по-видимому, являющейся источником корпускул, через центральный меридиан солнечного диска, оказалась равной 400 км/сек . Это означает, что концентрация протонов в потоке была примерно равна 25 см^{-3} .

Таким образом, пока еще немногочисленные опыты, проведенные в межпланетном пространстве с ловушками, показывают, что концентрации заряженных частиц в солнечных корпускулярных потоках могут быть большими, чем в стационарной плазме.

Следует отметить, что именно прямые наблюдения корпускулярных потоков вне магнитного поля Земли могут дать сведения, необходимые для установления количественных соотношений между плотностью солнечного корпускулярного потока и интенсивностью вызываемых им геомагнитных возмущений. В дальнейшем систематическая регистрация солнечных корпускулярных потоков в межпланетном пространстве с помощью ловушек позволит определить максимальную концентрацию заряженных частиц в корпускулярных потоках и окончательно оценить их возможное влияние на радионавигационные ошибки.

В настоящее время уже разработаны приборы с многоэлектродными ловушками, которые позволяют определить не только плотность потока заряженных частиц, но и их распределение по энергиям.

Изучение ионосфер планет

С точки зрения астронавтики проблема исследования ионосфер планет еще более важна, чем проблема межпланетной плазмы, так как вблизи планет можно ожидать существования значительных концентраций заряженных частиц, сильно влияющих на скорость распространения радиоволн, точность радиоизмерений, а быть может и на возможность радиосвязи в некоторых диапазонах волн.

Строго говоря, степень точности результатов радиолокации с Земли какой-либо планеты не может быть определена до тех пор, пока нет данных о распределении концентрации электронов в ионосфере этой планеты.

Если бы химический состав и плотность атмосферы у всех планет были одинаковы, то можно было бы оценить максимальную электронную концентрацию ионосферы каждой планеты, предполагая, что единственным источником ионизации является ультрафиолетовое излучение Солнца. В этом случае оказалось бы, что концентрация электронов в ионосфере Венеры примерно вдвое больше, чем в ионосфере Земли (в соответствии с ее удалением от Солнца), в ионосфере у Марса — примерно вдвое меньше, чем у Земли и т. п. В действительности, однако, пользоваться подобными оценками нельзя, ибо атмосфера каждой планеты по химическому составу и структуре отличается от атмосфер других планет. Отличаются друг от друга, по-видимому, и магнитные поля различных планет, а, как известно, магнитное поле существенно влияет на картину распределения заряженных частиц вокруг планеты. Неясен вопрос об ионосфере Венеры. По мнению советского астронома Н. А. Козырева, основанному на изучении спектра тепельного свечения Венеры, концентрация электронов в ионосфере Венеры значительно больше, чем в ионосфере Земли. Следует, однако, отметить, что опыт Козырева пока не подтвержден другими наблюдениями. Всплески радиоизлучения Юпитера в декаметровом и дециметровом диапазонах могут быть объяснены наличием у него плотной ионосферы и очень сильного магнитного поля. Все это показывает, что изучение ионосфер планет должно занимать одно из первых мест в комплексе научных проблем, которые должны быть решены до высадки людей на другие планеты, так как надежная радиосвязь между планетой и Землей является одним из важнейших условий безопасности подобной экспедиции.

При подготовке экспериментов по изучению ионосфер планет Солнечной системы совершенно естественно представлять их структуру в какой-то степени подобной структуре ионосферы Земли и рассматривать методы изучения, подобные применяемым на Земле.

На рис. 5 представлена ориентировочная кривая распределения по высоте заряженных частиц в ионизированной газовой оболочке Земли. Кривая построена по данным

экспериментов, проведенных в дневное время в 1958—1959 гг. при помощи советских геофизических ракет, третьего спутника и советских космических ракет, и характеризует период, близкий к максимуму солнечной активности. Часть кривой, относящаяся к высотам 470—1000 км, построена по данным опытов со сферическими

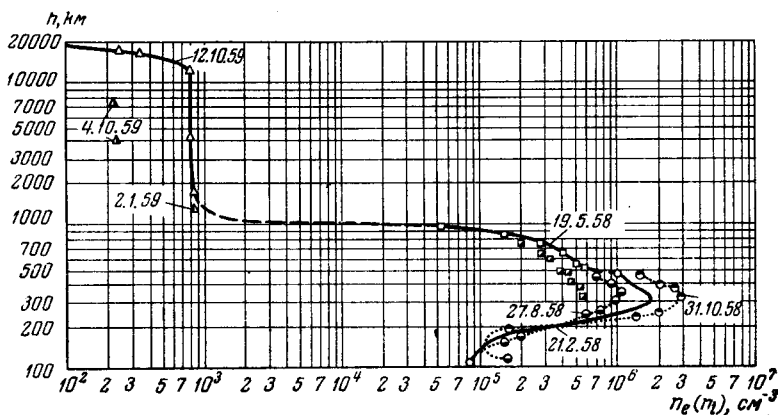


Рис. 5. Распределение по высоте заряженных частиц в ионизированной газовой оболочке Земли в период, близкий к максимуму солнечной активности

ионными ловушками, установленными на третьем советском спутнике; часть кривой, относящаяся к высотам 1400—20 000 км, — по данным опытов с трехэлектродными ловушками заряженных частиц, проведенных на космических ракетах. На графике вблизи ряда точек указаны даты соответствующих измерений. Пунктир соответствует отсутствию измерений. Масс-спектрометрические измерения на третьем спутнике показали, что до высоты 1000 км ионосфера состоит в основном из ионов атомарного кислорода.

Высотный ход концентрации заряженных частиц, показанный на рис. 5, до высот 15 000 км легко объясняется, если в интервале высот 1000—1500 км в ионосфере начинают доминировать ионы водорода. Увеличение отрицательных вертикальных градиентов концентрации заряженных частиц по высоте, начинающееся с высоты около 15 000 км, еще нуждается в теоретическом объяснении.

Целесообразно отметить, что при помощи тех же трехэлектродных ловушек на первых советских космических ракетах, которые позволили получить верхнюю часть графика, приведенного на рис. 5, было обнаружено существование потоков электронов с энергиями более 200 эв с плотностью порядка $10^8 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ на расстояниях 55 000—

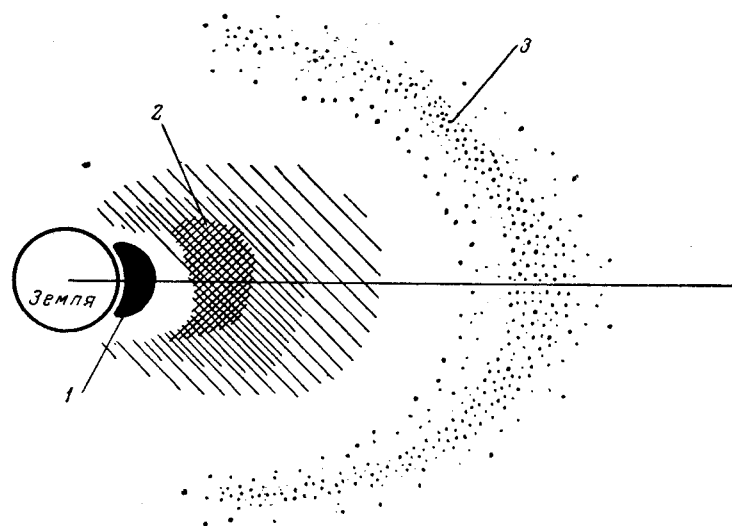


Рис. 6. Конфигурация окружающих Землю поясов заряженных частиц

1 — внутренний радиационный пояс; 2 — внешний радиационный пояс; 3 — самый внешний пояс заряженных частиц

75 000 км от поверхности Земли (в экваториальной плоскости), т. е. за пределами радиационных поясов. Это дало основание для предположения о существовании самого внешнего пояса заряженных частиц, окружающего Землю, с границами, проходящими вдоль силовых линий геомагнитного поля, состоящего из частиц с энергиями, меньшими чем в радиационных поясах (рис. 6). Сопоставление данных токового кольца, рассчитанного американскими учеными (Соннетом и др.) по результатам измерений магнитного поля на космической ракете «Пионер-5», с ранее опубликованными данными опытов с трехэлектродными ловушками на советских космических ракетах

показало, что рассчитанное токовое кольцо и обнаруженные в наших опытах потоки электронов расположены в одной и той же области пространства и что оба эксперимента взаимно подтверждают и дополняют друг друга. Концентрация свободных электронов в самом внешнем поясе заряженных частиц, окружающем Землю, слишком мала для того, чтобы заметным образом влиять на распространение радиоволн. Однако, по-видимому, нет оснований, чтобы утверждать то же самое в отношении возможно существующих вокруг других планет подобных поясов.

Нам представляется, что важные данные об ионосферах планет, характеризующие общее содержание электронов в вертикальном столбе ионосферы планеты, можно получить с помощью одновременной радиолокации планеты с Земли на различных частотах. Однако таким путем невозможно получить сведения о распределении концентрации заряженных частиц по высоте и о максимальной концентрации электронов в ионосфере планеты, имеющие решающее значение для радиосвязи с Землей космонавтов, высадившихся на планету.

Так как нет сомнений в том, что посадке людей на планеты будут предшествовать полеты к планетам ракет с автоматическим оборудованием, то должна быть создана аппаратура для изучения высотного распределения концентрации заряженных частиц вблизи планеты при помощи таких разведывательных ракет.

Такой аппаратурой может быть, например, импульсная ионосферная станция, доставленная на ракете к исследуемой планете на достаточно близкое расстояние; результаты ее измерений должны передаваться на Землю через радиотелеметрию. Этот метод связан со значительными трудностями — станция должна иметь весьма широкий диапазон длин волн (так как критические частоты изучаемой ионосферы неизвестны), а это означает, что приемно-передающая аппаратура будет иметь большой вес. О весе станции, предназначенной для изучения со сравнительно небольшой высоты верхней земной ионосферы, можно судить по канадскому проекту искусственного спутника, который будет весить более 100 кг. Отправка к изучаемой планете еще более тяжелой ионосферной станции, которая обладала бы характеристиками, необходимыми для изучения ионосферы, свойства которой неизвестны, в близком будущем могла бы значительно ограни-

чить возможность одновременного проведения других научных исследований на той же ракете.

В то же время установка на автоматизированной исследовательской ракете, отправляемой на какую-либо планету, аппаратуры для исследования ионосферы планеты зондовым методом (например, типа сферических ионных ловушек третьего спутника, трехэлектродных ловушек, примененных на космических ракетах, или какой-либо их модификации) позволит легко осуществить измерения при прохождении ракеты через ионосферу планеты при сколь угодно большом диапазоне концентраций заряженных частиц (ограничения будут накладываться только возможностью прохождения радиоволн телеметрической системы через изучаемую ионосферу) и при незначительном весе аппаратуры. Такие измерения вполне могут сочетаться с целым комплексом других физических исследований. Поэтому можно считать, что ловушки заряженных частиц явятся важнейшим средством изучения ионосфер планет Солнечной системы при помощи ракет.

В заключение следует остановиться еще на одной важной возможности применения ловушек заряженных частиц в астронавтике. При входе межпланетного корабля в атмосферу планеты весьма существенна правильная ориентация корабля относительно его вектора скорости. Так как ионный ток в несферических ловушках существенно зависит от их ориентации относительно набегающего потока ионов, то с момента входа в ионосферу ловушки могут использоваться как датчики ориентации относительно вектора скорости корабля.