

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том VI

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

3

МОСКВА • 1968

УДК 533.9.07 : 629.195.5

*Е. И. Грингауз, В. В. Безруких, Л. С. Мусатов,
Т. К. Бреус*

ПЛАЗМЕННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ПРОВЕДЕННЫЕ ВБЛИЗИ ВЕНЕРЫ, НА КОСМИЧЕСКОМ АППАРАТЕ «ВЕНЕРА-4»

Приводятся предварительные результаты проводившихся на припланетном участке полета космического аппарата «Венера-4» измерений потоков плазмы ловушками заряженных частиц.

Обнаружено возрастание потоков плазмы на расстояниях $\sim 19\,000$ км, которое интерпретируется как пересечение аппаратом фронта ударной волны, образующейся около планеты.

Приводятся соображения по поводу низких концентраций заряженных частиц, измеренных в ночной ионосфере Венеры.

1. Основной задачей описываемых в настоящей статье экспериментов являлось изучение концентрации заряженных частиц в ионосфере Венеры. Измерение характеристик ионосфер планет может производиться как радиофизическими методами (связанными с изучением прохождения радиоволн через ионосферу или с их отражением от ионосферы), так и зондовыми методами (при помощи зондов Ленгмюра или ловушек заряженных частиц, установленных на космическом аппарате, проходящем через ионосферу планеты). Соображения в пользу применения зондовых методов для изучения ионосфер планет были изложены в [1]; описываемый ниже опыт является первой попыткой реализации подобных зондовых измерений.

На космическом аппарате «Венера-4», запущенном 12 июня 1967 г., были установлены четыре ловушки заряженных частиц. Схемы плоской и полусферической ловушек, их соединения и размещение на аппарате показаны на рис. 1. Конструкции ловушек были подобны использованным ранее для изучения ионосферы Земли (в частности на спутниках типа «Электрон» [2]). Угол между осями двух плоских ловушек, так же как и угол между осями двух полусферических ловушек, составлял 60° ; коллекторы плоских ловушек были соединены с входом общего усилителя тока. Аналогично были соединены и полусферические ловушки. Цель подобного соединения — существенное расширение угловой диаграммы ловушки, т. е. уменьшение зависимости регистрируемого тока, создаваемого потоком ионосферных положительных ионов, от ориентации ловушки относительно вектора скорости аппарата. Так как скорость космического аппарата вблизи планеты составляла $\sim 10^6$ см/сек, то предполагалось, что можно пренебрегать тепловыми скоростями ионосферных ионов по сравнению с их направленной скоростью относительно аппарата.

Плоские ловушки были предназначены для измерения малых концентраций ионов в периферийной области ионосферы Венеры. Коллекторы этих

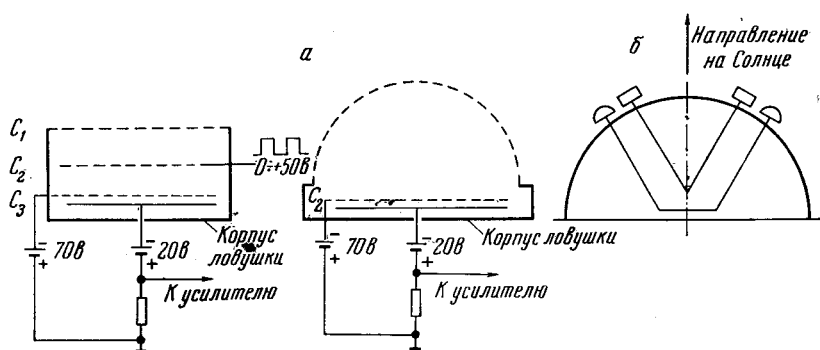


Рис. 1

ловушек были подсоединены к электрометрическому усилителю, на входе которого имелась электрометрическая лампа с сеточным током $\sim 10^{-14} \text{ а}$. Минимальный регистрируемый коллекторный ток составлял $1 \cdot 10^{-10} \text{ а}$. Такое соотношение указанных токов обеспечивало высокую стабильность нулевого отсчета усилителя за время полета. Постоянная ориентация космического аппарата на Солнце позволяла регистрировать в плоских ловушках потоки положительных ионов солнечного ветра (на первом этапе припланетного сеанса измерений, начавшегося на расстоянии $\sim 40\,000 \text{ км}$ от Венеры, ионосферных ионов в окружающей аппарат среде быть не могло). Измерения суммарного коллекторного тока плоских ловушек на припланетном участке проводились 1 раз в 7 сек. Для того чтобы разделить регистрацию плоскими ловушками ионосферных ионов от регистрации частиц более высоких энергий неионосферного происхождения (например, ионов солнечного ветра), на одну из сеток плоской ловушки подавалось 1 раз в 14 сек. положительное напряжение относительно корпуса аппарата $+50 \text{ в}$, которое затормозило бы ионосферные ионы, но не мешало попаданию на коллектор неионосферных заряженных частиц. Изменения величин коллекторных токов при изменениях напряжения на сетке от 0 до 50 в должно было позволить оценить вклад неионосферных ионов в измеряемый ток.

Плоские ловушки позволяли измерять концентрации ионов в ионосфере от 50 до 5000 см^{-3} .

Полусферические ловушки заряженных частиц были предназначены для измерения больших концентраций положительных ионов вблизи главного ионизационного максимума в верхней атмосфере Венеры. Для получения детального высотного распределения концентрации заряженных частиц вблизи главного максимума измерения коллекторных токов этих ловушек производились существенно чаще, чем в плоских ловушках, а именно — 1 раз в $0,8 \text{ сек}$. При помощи полусферических ловушек могли быть измерены концентрации ионосферных ионов в пределах от 10^4 до 10^7 см^{-3} .

Плоские ловушки, как отмечалось выше, могли регистрировать потоки положительных ионов солнечного ветра на пути между Землей и Венерой. Однако результаты этой регистрации будут рассмотрены отдельно и не включаются в настоящую публикацию, в которой приводятся лишь предварительные результаты измерений, проведенных 18 октября 1967 г. на расстояниях от Венеры, меньших чем $\sim 40\,000 \text{ км}$, во время последнего, припланетного сеанса радиосвязи с космическим аппаратом. Во втором

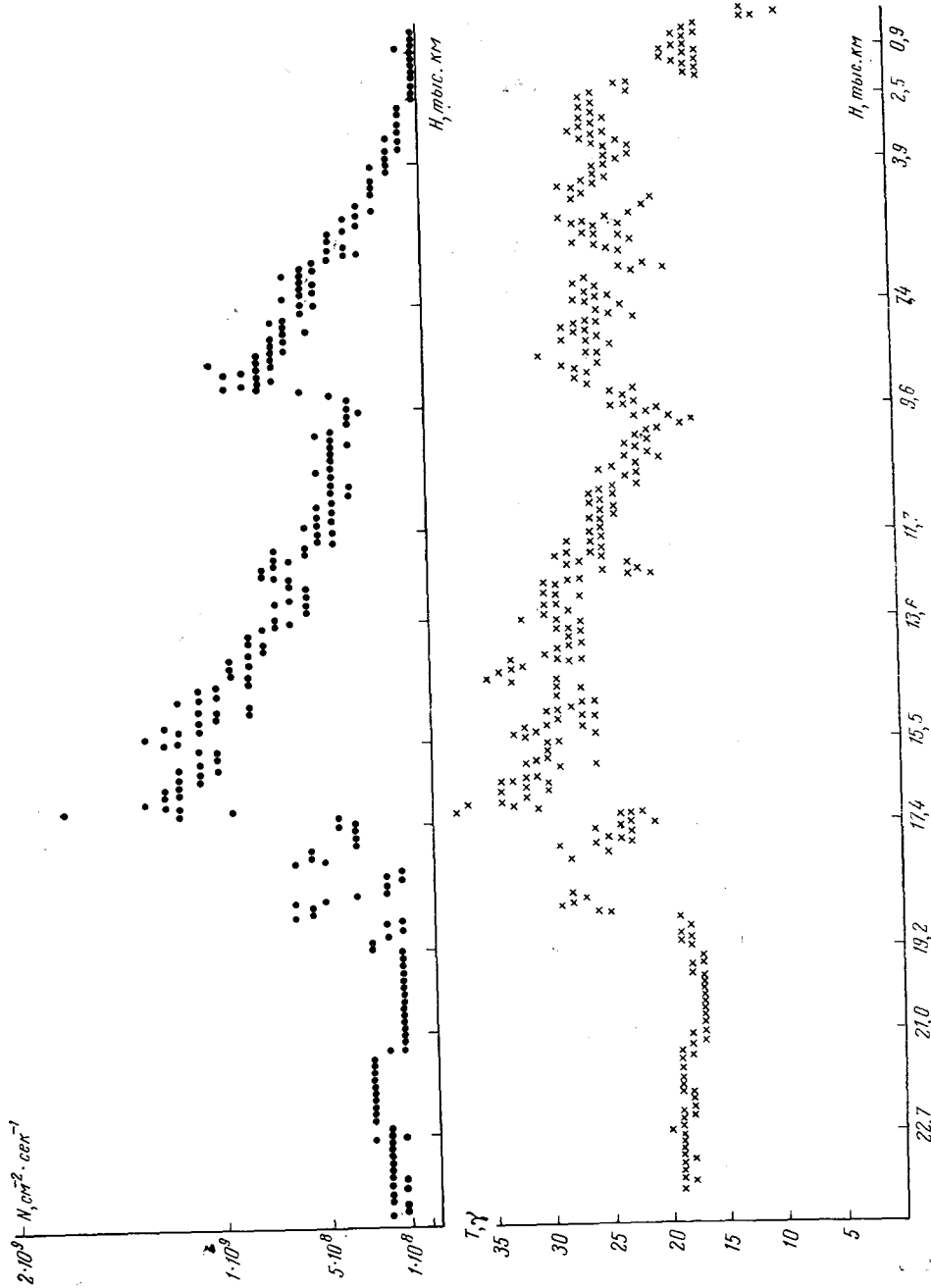


Рис. 2

разделе статьи рассматривается и обсуждается явление возрастания потоков ионов, зарегистрированного на расстояниях от планеты менее 22 000 км; в последнем разделе рассматриваются выводы, которые могут быть сделаны из полученных при помощи ловушек данных об ионосфере Венеры.

2. В чувствительных плоских ловушках на расстояниях от 40 000 до ~ 19 000 км от планеты регистрировались почти неизменные значения тока, соответствующие сравнительно малым потокам протонов солнечной плазмы. Магнитометр, установленный на том же космическом аппарате [3], в это время также регистрировал устойчивую величину магнитного поля (около 16 γ). На прессконференции о научных результатах, полученных при помощи «Венеры-4»¹, проведенной через несколько дней после окончания ее полета, отмечалось, что были обнаружены возмущения межпланетной плазмы и магнитного поля, созданные планетой. Начиная с расстояния примерно 19 400 км от поверхности планеты, началось значительное возрастание потоков положительных ионов, регистрируемых ловушками. Одновременно началось возрастание измеряемого магнитного поля. В дальнейшем колебания величин потоков положительных частиц, регистрируемых ловушками, и поля, измеряемого магнитометром, происходили с большой степенью синхронности (рис. 2).

Картина быстрого возрастания потоков заряженных частиц и магнитного поля очень напоминала аналогичную картину, наблюдаемую при приближении к Земле космического аппарата, движущегося из межпланетного пространства (спутника с апогеем порядка сотен тысяч км), когда космический аппарат пересекает фронт бесстолкновительной ударной волны, возникающей при взаимодействии солнечного ветра и геомагнитного поля. Однако у Земли наибольшее приближение фронта этой ударной волны имеет место в направлении Земли — Солнце и составляет примерно $14R_z$, т. е. около 80 тыс. км от поверхности Земли [4, 5].

Можно предположить, что у Венеры, не имеющей собственного магнитного поля, ударная волна образуется при обтекании потоками солнечной плазмы (в которые вморожено магнитное поле) планеты как твердого препятствия на пути потока. Образование бесстолкновительной ударной волны в этом случае возможно, так как ларморовский радиус протонов солнечного ветра существенно меньше линейных размеров планеты.

Приближенную оценку положения фронта ударной волны в этом случае можно произвести, если, пользуясь законами газодинамики, вместо скорости звука при определении числа Маха в невозмущенном потоке солнечной плазмы брать альвеновскую скорость. Тогда число Маха равно

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}} \approx \frac{V}{\sqrt{\gamma \frac{H^2}{8\pi\rho}}},$$

где $\gamma = 2$ для ионизованного газа, V — скорость невозмущенного потока, H — напряженность магнитного поля, ρ — плотность в потоке плазмы (все эти параметры характеризуют невозмущенный планетой солнечный ветер), и выражения

$$\frac{r}{r_s} = \frac{1 + \sec \beta}{1 + \sec \beta \cos \varphi}, \quad \sin \beta = \frac{1}{M},$$

$$r_s = 1,24 r_B \sec \beta$$

¹ В кн. «Два чуда космической техники». Изд-во «Известия», 1967, стр. 130.

определяют положение фронта ударной волны (см., например, [5]). (Использованные обозначения показаны на рис. 3.) На рисунке в масштабе показаны результаты такого расчета для $M = 5 \pm 4$, что соответствует наиболее характерной для солнечного ветра скорости $V = 350 \pm 100$ км/сек [6] и напряженности магнитного поля $H = 7 \pm 3$ γ [7]. Наименьшее рас-

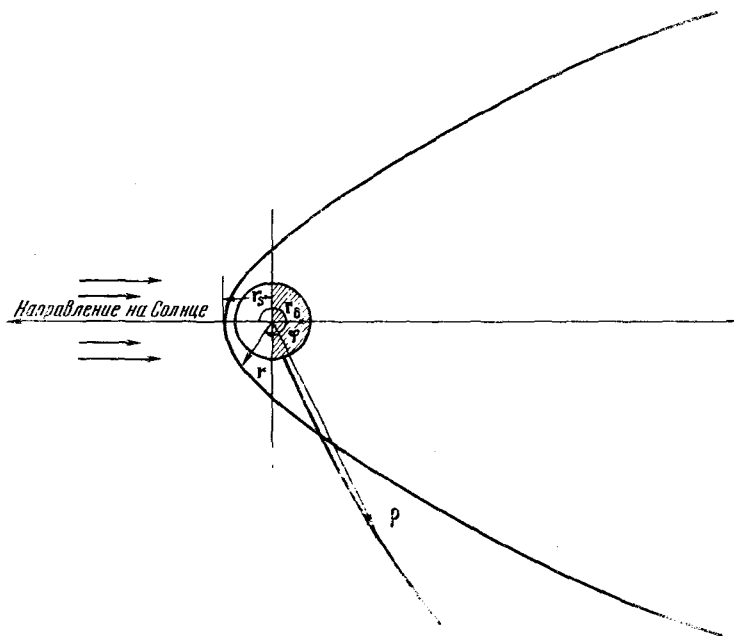


Рис. 3

стояние фронта ударной волны от планеты (в направлении Солнце — Венера) составляет ~ 2000 км.

Имея данные о траектории космического аппарата, можно было определить угол между радиус-векторами, направленными из центра планеты на Солнце и на текущую точку траектории (см. рис. 3, относящийся

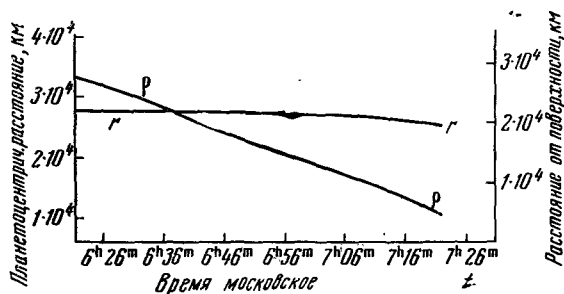


Рис. 4

к плоскости, проходящей через траекторию «Венеры-4»). Для этих углов φ , соответствующих припланетному участку траектории, и чисел Маха $M = 5 \pm 4$ и были рассчитаны по формулам (1) расстояния до фронта ударной волны r и сравнены с расстояниями до космического аппарата ρ (рис. 4). Они оказались равны на расстояниях $\sim 21\,000 \pm 2000$ км от по-

верхности планеты. Как указывалось выше, возрастание потоков положительных ионов и магнитного поля началось с расстояния $\sim 19\,400$ км.

Таким образом, эти приближенные оценки дают основания считать, что это возрастание действительно связано с ударной волной, образующейся возле планеты.

В работе [8] приведены соображения о возможности образования ударной волны при обтекании сверхзвуковым потоком солнечного ветра Луны. Эти соображения можно применить к обтеканию солнечным ветром Венеры.

Если планета представляет собою непроводящий, ненамагниченный шар, то частицы солнечного ветра должны поглощаться его поверхностью (нейтрализоваться на ней), и ударная волна не должна образоваться, тогда как если планета обладает идеальной проводимостью, то ударная волна образуется.

По аналогии с Землей можно предположить, что Венера имеет хорошо проводящее ядро, окруженное непроводящей или слабо проводящей оболочкой. Магнитное поле, вмороженное в солнечный ветер, не проникает в проводящее ядро, и у его поверхности со стороны набегающего потока образуется сгущение магнитных силовых линий.

Если толщина оболочки планеты меньше толщины той области над верхней границей ядра, куда основная масса частиц солнечного ветра не попадает из-за отражения их возмущенным магнитным полем, то эти частицы не поглощаются поверхностью планеты, и возникнет ударная волна.

Если методом, аналогичным примененному в [8], оценить предельную толщину непроводящей оболочки, окружающей проводящее ядро Венеры, которая необходима для образования ударной волны при параметрах солнечного ветра, указанных в начале настоящего раздела, то она окажется равной $0,05$ радиуса Венеры, т. е. толщина оболочки не должна превышать ~ 300 км. Как известно, у Земли толщина оболочки, окружающей ядро, составляет ~ 3000 км [9]. Различные гипотезы, описывающие свойства и строение земного ядра [10—12], сходятся на представлениях о том, что оно должно обладать металлическими свойствами и, следовательно, высокой электропроводностью и теплопроводностью, а также должно обладать более высокой температурой, чем прилегающий к нему слой оболочки.

Если предположить, что у Венеры ядро обладает сходными свойствами, а оболочка, как это следует из указанной оценки, не менее чем в 10 раз тоньше земной, то описанный выше механизм может объяснить образование ударной волны, а горячее, близко расположенное к поверхности ядро может оказаться причиной того, что температура у поверхности планеты существенно выше температуры поверхности Земли (как это следует из измерений на аппарате «Венера-4» [13]).

3. Выше отмечалось, что эксперимент позволял оценить концентрацию заряженных частиц в ионосфере Венеры над неосвещенной частью поверхности планеты.

В литературе нередко высказывались соображения, на основании которых делался вывод, что электронная концентрация N_e в ионосфере Венеры существенно превышает N_e в земной ионосфере. Имелись оценки, из которых следовало, что N_e в ионосфере Венеры достигает $\sim 10^9$ см $^{-3}$, т. е. в 1000 раз больше, чем в земной ионосфере [14—17]. Однако полусферические ловушки с чувствительностью $n_c = 10^4$ см $^{-3}$ на всем протяжении полета не зарегистрировали каких-либо токов. Анализ разностей зарегистрированных вблизи планеты коллекторных токов плоских ловушек, соответствующих наличию тормозящего потенциала на сетке S_2 (рис. 1) и его отсутствию, показывает, что концентрации положительных

ионов на высотах порядка сотен км над поверхностью планеты во всяком случае не превышает $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$, т. е. существенно (на несколько порядков) меньше концентрации заряженных частиц в ночной ионосфере Земли на соответствующих высотах.

Вся траектория космического аппарата проходила над неосвещенной частью поверхности Венеры; аппарат опустился вблизи той части терминатора, которая отделяет ночь от утра. Это в значительной степени может объяснить неожиданно малые величины концентрации заряженных частиц.

Естественно при этом сопоставить данные о верхней атмосфере Венеры с имеющимися сведениями об условиях в верхней атмосфере и ионосфере Земли.

В. Г. Курт и В. И. Мороз, основываясь на результатах опытов, проведенных на «Венере-4», пришли к выводу, что шкала высот в ночной верхней атмосфере Венеры составляет 13 км [18].

В земной верхней атмосфере на тех же высотах шкала высот в 3—4 раза больше, а это означает, что верхняя атмосфера Венеры менее протяженна, чем земная и, следовательно, исходного материала для образования ионосферы на Венере меньше, чем на Земле.

Как известно, в земной ионосфере ионы образуются в основном на высотах $< 400 \text{ км}$, а на большие высоты они попадают, двигаясь вдоль магнитных силовых трубок [19].

В той области, где преобладают ионы одного сорта и имеется температурное равновесие между нейтральными и заряженными частицами, шкала высот ионизированной компоненты должна равняться удвоенной шкале высот соответствующей нейтральной компоненты [20].

В применении к условиям на Венере шкала высот для заряженных частиц в ночной ионосфере на высотах 100—400 км должна быть $\sim 30 \text{ км}$ (тогда как на Земле она составляет $\sim 80\text{—}100 \text{ км}$). Отсюда следует, что и ночная ионосфера Венеры должна быть менее протяженной и плотной, чем земная, тем более, что из-за отсутствия магнитного поля у Венеры нет такого эффективного механизма транспортировки и удержания заряженных частиц на больших высотах, как диффузия заряженных частиц вдоль силовых линий магнитного поля планеты. Последнее обстоятельство должно повлиять на протяженность ионосферы так же и на дневной стороне планеты.

Если учесть еще, что ночь на Венере длится примерно 110 суток [14], то при отсутствии дополнительного источника, непрерывно поддерживающего ионизацию ночью, все ионы в плотной ночной верхней атмосфере планеты должны рекомбинировать. Таким источником могут быть турбулизированные за фронтом ударной волны потоки солнечного ветра, частично попадающие в атмосферу Венеры. Однако данные для количественных оценок воздействия этого источника ионизации на ночную атмосферу Венеры в настоящее время отсутствуют (величины потоков и энергии ионизирующих частиц неизвестны). На больших высотах, тем не менее, влияние этого дополнительного источника ионизации пренебрежимо мало, поскольку мала плотность нейтральной атмосферы Венеры. Даже в освещенном Солнцем пространстве над ночной стороной планеты по той же причине концентрация заряженных частиц должна быть чрезвычайно низкой, несмотря на действие такого источника ионизации, как коротковолновое излучение Солнца. Приток ионизации снизу из-за отсутствия магнитного поля у Венеры, как уже отмечалось будет чрезвычайно мал.

Имеется некоторая возможность появления в этой области частиц из-за притока их с дневной стороны за счет горизонтальной диффузии, а на тех высотах, где соударения отсутствуют, за счет попадания на ночную сто-

рону баллистических траекторий частиц, начинающихся на дневной стороне. Этот эффект, очевидно, должен быть сильнее выражен на ночной стороне вблизи вечерней, а не утренней границы тени. В то же время «Венера-4» опустилась вблизи утренней границы неосвещенной части поверхности планеты.

Таким образом, зарегистрированные ловушками заряженных частиц во время описываемого эксперимента малые токи не противоречат всем приведенным выше соображениям о низких концентрациях заряженных частиц в ночной ионосфере Венеры.

В настоящее время трудно еще прогнозировать характеристики дневной ионосферы Венеры, поскольку они весьма сильно зависят от плотности, температуры и состава дневной нейтральной верхней атмосферы. В частности если в последней вследствие процессов диффузии содержатся молекулы CO_2 , то атмосфера на дневной стороне может оказаться достаточно холодной и непроявленной, что соответствующим образом повлияет и на дневную ионосферу.

Если температура дневной атмосферы окажется высокой, то могут оправдаться предположения о более высоких значениях электронной концентрации в дневной ионосфере Венеры по сравнению с ионосферой Земли.

В этом случае при обтекании планеты солнечным ветром ударная волна может образовываться при помощи механизма, рассмотренного выше с тем различием, что роль проводящего слоя будет играть не ядро, расположенное внутри планеты, а дневная ионосфера. Образование ударной волны при этих условиях возможно, если время формирования фронта ударной волны мало по сравнению со временем проникновения межпланетного магнитного поля в ионосферу.

Примечание при корректуре. После сдачи статьи в печать авторы познакомились с предварительными результатами экспериментов по изучению плазмы и магнитного поля, проведенных 19 ноября 1967 г. вблизи Венеры на аппарате «Маринер-5» (Science, 158, 1665, 1967). Из этих результатов, в частности, следует существование ударной волны в солнечном ветре около планеты и достаточно интенсивной дневной ионосферы. Результаты сопоставления данных плазменных измерений, проведенных на «Венере-4» и «Маринере-5», авторы опубликуют в дальнейшем.

Дата поступления
12 января 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. I. Gringauz. XII International Astronautical Congress, Washington, D. C., Academic Press, New York — London, 1961. Сб. «Космос», вып. 1. Изд-во АН СССР, 1963.
2. В. В. Безруких, К. И. Грингауз. Сб. «Исследования космического пространства». Изд-во «Наука», 1965, стр. 177.
3. Ш. Ш. Долгинов, Л. Н. Жузгов, Е. Г. Ерошенко. Космич. исслед., 6, № 4, 1968.
4. N. F. Ness. Solar Terrestrial Physics, Academic Press, London — New York, 1967, p. 57.
5. T. Obayashi. Space Res., IV, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1964, p. 841.
6. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Л. С. Мусатов. Космич. исслед., 5, № 2, 251, 1967.
7. N. F. Ness, C. S. Scearce, J. B. Seck. Space Res., V, North-Holland Publ. Co., Amsterdam, 1965, p. 967.
8. F. S. Johnson, J. E. Midgley. Notes of the Lunar Magnetosphere, to be submitted to J. Geophys. Res., 1968.
9. Е. Ф. Саваренский, Д. П. Кириос. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Госгехтеоретиздат, 1955.
10. W. Ramsey. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., Geophys. Suppl., 5, No. 9, 1949.
11. J. A. Jacobs. Nature, 172, No. 4372, 1953.

-
12. В. А. Магницкий, В. Н. Жарков. Развитие наук о Земле в СССР. Изд-во «Наука», 1967, стр. 45.
 13. Сб. «Венера-4». Изд-во «Наука», 1968 (в печати).
 14. В. И. Мороз. Физика планет. Изд-во «Наука», 1967.
 15. D. E. Jones. Planet. Space Sci., 5, 166, 1961.
 16. А. Д. Данилов, С. П. Яценко. Космич. исслед., 2, № 2, 276, 1964; Докл. АН СССР, 162, 774, 1965.
 17. А. Д. Кузьмин. Изв. высш. учебн. завед. Радиофизика, 6, 1090, 1963.
 18. В. Г. Курт, В. И. Мороз. Космич. исслед., 6, № 4, 1968.
 19. W. B. Hanson, I. B. Ortenburger. J. Geophys. Res., 66, No. 5, 1425, 1961.
 20. P. M ange. J. Geophys. Res., 65, No. 11, 1960.
-