

М. Б. ВАСИЛЬЕВ, А. С. ВЫШЛОВ, М. А. КОЛОСОВ, Н. А. САВИЧ,  
В. А. САМОВОЛ, Л. Н. САМОЗНАЕВ, А. И. СИДОРЕНКО, Ю. П. АЛЕКСАНДРОВ,  
А. И. ДАНИЛЕНКО, В. М. ДУБРОВИЦ, А. Л. ЗАЙЦЕВ, Г. М. ПЕТРОВ,  
О. П. РЖИГА, Д. Я. ШТЕРЦ, А. П. МЕСТЭРТОН

## ОБНАРУЖЕНИЕ НОЧНОЙ ИОНОСФЕРЫ МАРСА

(Представлено академиком В. А. Котельниковым 21 VI 1974)

Во время пролета станции «Марс-4» вблизи планеты Марс 10 II 1974 г. было проведено радиопросвечивание атмосферы планеты двумя когерентными монохроматическими сигналами в дециметровом ( $\lambda_1 \approx 32$  см) и сантиметровом ( $\lambda_2 \approx 8$  см) диапазонах волн с отношением частот  $p = f_2/f_1 = 4$ , которые излучались со станции и принимались на Земле.

Основная цель эксперимента заключалась в обнаружении плазмы над неосвещенной Солнцем поверхностью Марса и определении высотного профиля электронной концентрации в ночной ионосфере, условия для радиопросвечивания которой выполнялись при выходе станции из-за диска планеты.

Зенитный угол Солнца в точке касания радиолуча с поверхностью Марса при выходе станции составлял  $\chi \approx 127^\circ$ , что соответствовало предутренним часам марсианских суток. При этом до высот  $\sim 250$  км радиолуч полностью проходил над неосвещенной стороной поверхности и лишь незначительная часть его пути вблизи терминатора на высоте 250–300 км освещалась лучами восходящего Солнца. Ареографическая широта точки касания составляла  $\varphi \approx -9^\circ$  (к югу от экватора), ареографическая долгота  $\lambda \approx 236^\circ$  (к западу от нулевого меридиана, время года в этом районе Марса осень), время выезда (москowsкое) станции из-за планеты  $20^h 41^m 13^s$ .

Бортовые передатчики станции «Марс-4» были включены за  $\sim 20$  мин. до захода, оставались включенными во время нахождения станции за планетой и были включены через  $\sim 20$  мин. после выхода из-за планеты. На наземном приемном пункте осуществлялся отдельный прием каждого из сигналов и их обработка одновременно двумя независимыми системами дисперсного интерферометра (<sup>1</sup>, <sup>2</sup>), которые при подготовке рассматриваемого эксперимента были существенно модернизированы с целью повышения точности и надежности измерений.

В системе (<sup>2</sup>) аналоговым способом измерялась и регистрировалась приведенная разность фаз принятых сигналов:  $\Delta\varphi = 1/15(4\Phi_1 - \Phi_2)$ , где  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  — полные фазы дециметрового и сантиметрового сигналов соответственно. В системе (<sup>1</sup>) принятые сигналы сначала регистрировались на магнитной ленте, а затем обрабатывались с помощью ЦВМ. При этом после цифровой фильтрации в полосе  $\Delta f_\Phi = 0,8$  гц измерялась частота каждого из сигналов и формировалась приведенная разность частот

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{4}{15} (4\dot{\Phi}_1 - \dot{\Phi}_2), \text{ где } \dot{\Phi}_1 \text{ и } \dot{\Phi}_2 \text{ — производные полных фаз принятых}$$

сигналов. Для уменьшения флуктуационной погрешности измеренные значения  $\Delta\varphi$  и  $\Delta f$  сглаживались по 11 точкам (на интервале 13 сек.) методом скользящего среднего. В системе (<sup>2</sup>) эффект ночной ионосферы Марса обнаружен непосредственно в ходе сеанса измерений, а в системе (<sup>1</sup>) при

обработке данных на ЦВМ. С помощью обеих систем получены идентичные результаты.

По баллистическим данным была осуществлена привязка результатов измерений к высоте  $h$  радиолуча над поверхностью Марса. На рис. 1 показаны зависимости сглаженных значений приведенной разности частот  $\Delta f_{cp}$  и приведенной разности фаз  $\Delta \varphi_{cp}$  от высоты  $h$ . Максимальное изменение приведенной разности частот, обусловленное влиянием почной ионосферы Марса,  $\Delta f_{cp \max} = \pm 0,15$  гц, максимальное изменение разности фаз, пропорциональное приращению интегральной электронной концентрации, вызванное той же причиной, составило  $\Delta \varphi_{cp \max} \approx 320^\circ$ .

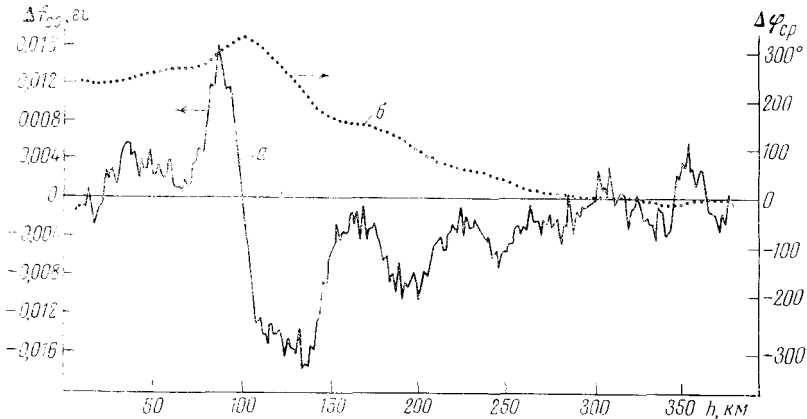


Рис. 1. Зависимость приведенных разностей частот (а) и фаз (б) от расстояния между лучевой линией и поверхностью Марса

Через 5 мин. после выхода станции из-за диска планеты на контрольном участке полета, свободном от влияния ионосферы Марса, в течение 10 мин. измерялся средний ход  $\Delta f_{cp}$  и  $\Delta \varphi_{cp}$ , обусловленный изменением электронной концентрации вдоль пути радиолуча в околоземной и межпланетной плазме. Для выделения эффектов, связанных только с ионосферой Марса, показанных на рис. 1, средний ход экстраполировался назад до поверхности и вычитался из результатов измерений. Кроме того на контрольном участке полета станции были измерены среднеквадратичные флуктуационные ошибки измерений, вызываемые шумами приемников и вариациями электронной концентрации на трассе связи; эти ошибки составили  $\sigma_{\Delta f_{cp}} = 0,003$  гц,  $\sigma_{\Delta \varphi_{cp}} = 14^\circ$ .

По полученным данным, в предположении сферической симметрии ионосферы, был рассчитан (1) высотный профиль распределения электронной концентрации в ночной ионосфере Марса  $N(h)$ , который приведен на рис. 2. Среднеквадратичные погрешности  $\sigma_N$ , соответствующие значениям  $\sigma_{\Delta f_{cp}}$ , показанные горизонтальными линиями, слабо зависят от высоты и составляют  $\sigma_N \approx 250$  см<sup>-3</sup> при  $h = 170$  км. На графике четко виден основной максимум ионизации вблизи высоты  $h_m \approx 110$  км над поверхностью с концентрацией частиц  $N_m \approx 4,6 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup> и полутолщиной слоя  $y_m \approx 35$  км. Ошибка измерений в области максимума  $\sigma_N \approx 250$  см<sup>-3</sup>, что составляет  $\sim 5\%$  от  $N_m$ . Возможные смещения кривой  $N(h)$  из-за ошибок аппроксимации среднего хода изменения электронной концентрации вдоль трассы связи за время радиопросвечивания ионосферы оцениваются величиной  $\Delta N = \pm 500$  см<sup>-3</sup>. Обращает внимание наличие двух дополнительных максимумов ионизации — одного на высоте  $h_{m1} \approx 65$  км с концентрацией частиц  $N_{m1} \approx 1,5 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>, а другого при  $h_{m2} \approx 185$  км с  $N_{m2} \approx 2,3 \cdot 10^3$  см<sup>-3</sup>. Однако вследствие возможных вариаций электронной концентрации вдоль пути радиолуча в земной ионосфере и межпланетном пространстве наличие

этих двух слоев и их параметры нельзя считать установленными окончательно.

Характерной особенностью полученного распределения  $N(h)$  является наличие плазмы с концентрацией  $N \sim 10^3 \text{ см}^{-3}$  до малых высот над поверхностью, что можно объяснить на основе имеющихся гипотез <sup>(1)</sup>. Однако в

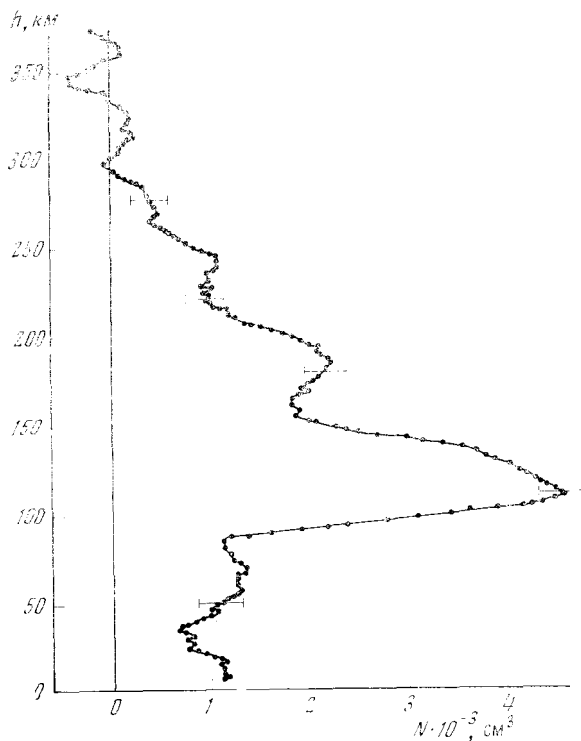


Рис. 2. Распределение концентрации электронов по высоте в ночной ионосфере Марса

этом интервале вклад в интегральную концентрацию электронов может внести небольшая освещенная Солнцем часть просвечиваемой области попо́сферы, что соответственно приведет к изменению профиля  $N(h)$ , найденного в предположении сферической симметрии попо́сферы. Для уточнения распределения  $N(h)$  в этой области необходимо в дальнейшем учитывать асимметрию попо́сферы.

Для сравнения интересно сопоставить полученные данные с параметрами дневной и вечерней ионосферы Марса. При заходе станции «Марс-4» за планету 10 II 1974 г. было осуществлено двухчастотное радиопросвечивание вечерней ионосферы при зенитном угле Солнца  $\chi \approx 82^\circ$  в точке касания радиолуча, ареографические координаты которой

$\varphi \approx 52^\circ$ ,  $\lambda \approx 17^\circ$ . Найденный в предположении сферической симметрии (в качестве первого приближения) профиль  $N(h)$  представлен на рис. 3, где изображено также распределение  $N(h)$  для ночной ионосферы. Кроме того, на том же рисунке дан профиль  $N(h)$  для дневной ионосферы при  $\chi \approx 50^\circ$ , полученный в 1971 г. при помощи спутника «Марс-2» <sup>(1)</sup>. Для вечерней ионосферы характерно наличие главного максимума с  $N_m \approx 5,9 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$  на высоте  $\sim 140 \text{ км}$  и вторичного, менее четко выраженного, на уровне  $\sim 100 \text{ км}$  с концентрацией  $\sim 10^4 \text{ см}^{-3}$ . На кривой  $b$  для дневной ионосферы также намечается второй максимум на высотах менее 115 км. По-видимому, основной максимум в ночной ионосфере и вторичные в вечерней и дневной <sup>(3)</sup> могут быть связаны с одним и тем же источником ионизации. Возможно, что формирование этих максимумов электронной концентрации обусловлено галактическим космическим <sup>(4)</sup> или корпускулярным излучением.

Следует отметить, что многократное одночастотное просвечивание ночной ионосферы Марса было осуществлено при помощи станции «Марипер 9» <sup>(2, 5)</sup>. Однако тщательный анализ условий экспериментов <sup>(3-7)</sup> приводит авторов к выводу о том, что погрешности измерений, присущие одночастотному методу в некогерентном режиме при работе бортового передатчика от кварцевого генератора, не позволяют обнаружить ночную ионосферу Марса, не имея дополнительной априорной информации. Действительно, среднеквадратичная ошибка определения профиля электронной

концентрации составляет по данным (6, 7)  $\sim 0,7 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ , что превышает найденное нами значение концентрации в максимуме ночной ионосферы.

Таким образом, измерения, выполненные методом двухчастотного радиопросвечивания, впервые позволили получить достоверное распределение электронной концентрации в ночной ионосфере Марса и установить

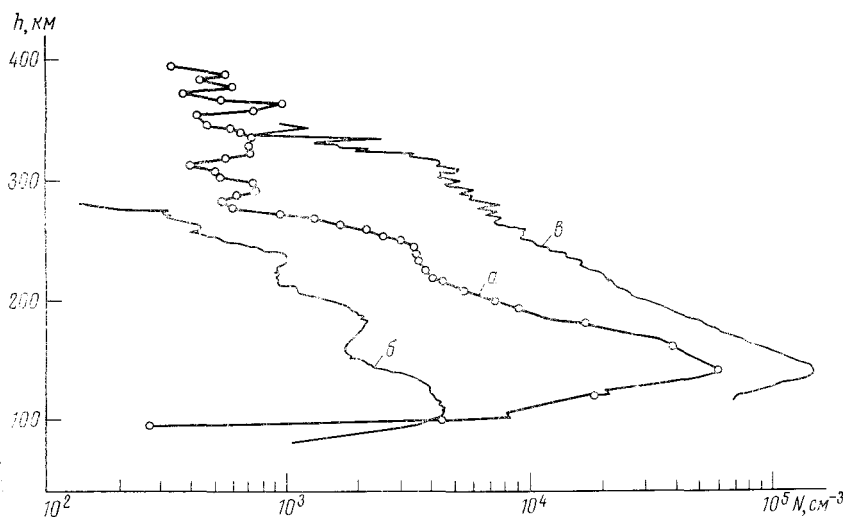


Рис. 3. Профили электронной концентрации для вечерней (а), ночной (б) и дневной (в) ионосферы Марса

его основные характеристики: высота основного максимума ионизации  $h_m \approx 110 \text{ км}$ , электронная концентрация  $N_m \approx (4,6 \pm 0,25) \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ .

Авторы приносят искреннюю благодарность всем товарищам, принимавшим участие в подготовке комплекса бортовой передающей и наземной приемной аппаратуры и в проведении эксперимента.

Институт радиотехники и электроники  
Академии наук СССР  
Москва

Поступило  
11 VI 1974

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> М. А. Колосов и др., Радиотехника и электроника, т. 18, 2009 (1973). <sup>2</sup> Н. А. Савич и др., Космические исследования, т. 11, 756 (1973). <sup>3</sup> А. I. Kliore et al., Icarus, v. 17, 484 (1972). <sup>4</sup> R. C. Whitten, I. G. Poppoff, J. S. Sims, Planetary Space Science, v. 19, 243 (1971). <sup>5</sup> А. I. Kliore et al., J. Geophys. Res., v. 78, 4331 (1973). <sup>6</sup> I. S. Hogan et al., Radio Sci., v. 7, 525 (1972). <sup>7</sup> R. W. Stewart, I. S. Hogan, Radio Sci., v. 8, 109 (1973).