

УДК 523.42

АСТРОНОМИЯ

Ю. Н. АЛЕКСАНДРОВ, М. Б. ВАСИЛЬЕВ, А. С. ВЫШЛОВ, В. К. ГОЛОВКОВ,
А. И. ДАНИЛЕНКО, В. М. ДУБРОВИН, А. Л. ЗАЙЦЕВ, А. П. МЕСТЭРТОН,
Г. М. ПЕТРОВ, О. Н. РЖИГА, В. А. САМОВОЛ,
Л. Н. САМОЗНАЕВ, А. И. СИДОРЕНКО, Д. Я. ШТЕРН

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ МАРСА МЕТОДОМ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СОВЕТСКИХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ СТАНЦИЙ «МАРС»

(Представлено академиком В. А. Котельниковым 10 X 1974)

Для осуществления двухчастотного радиопросвечивания межпланетные станции «Марс» были оборудованы передатчиками на волны 32 см и 8 см, излучавшими когерентные сигналы. В данном сообщении приводятся результаты измерений нейтральной атмосферы Марса. Результаты измерений ионосферы Марса были описаны раньше ⁽¹⁾.

На Земле сигналы, прошедшие через атмосферу Марса, принимались на общую антенну и с выхода двухканального супергетеродинного приемника записывались в аналоговой форме на магнитную ленту с сохранением фазовых соотношений. При воспроизведении записей использовалось когерентное гетеродинирование сигналов по программе, учитывающей изменение частоты вследствие движения межпланетной станции. Затем сигналы подавались на два аналого-цифровых преобразователя, работающих синхронно, и записывались в цифровом виде. Измерение остаточных отклонений частоты сигналов осуществлялось с помощью цифровой фильтрации при ширине полосы фильтров около 0,8 гц (время измерения 1,2 сек.).

Во время радиопросвечивания нейтральная атмосфера

и ионизованная плазма (ионосфера) Марса изменяли оптическую длину на пути распространения луча, что приводило к некоторому смещению частоты принимаемых сигналов (наряду с доплеров-

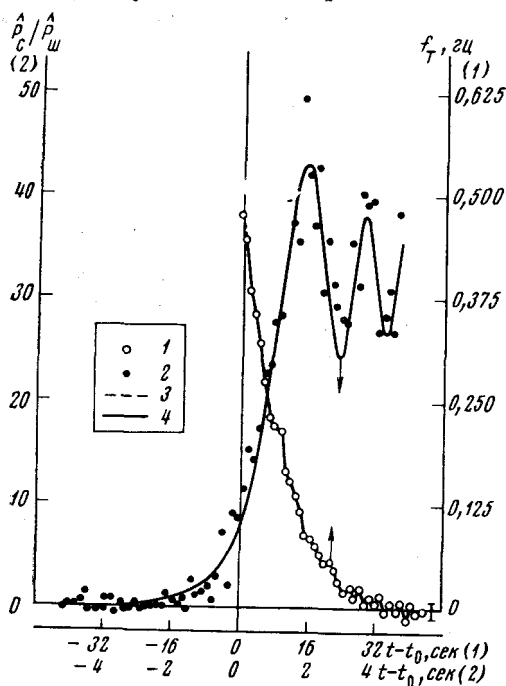


Рис. 1. Частотное смещение, вызванное тропосферой Марса (1), и изменение мощности (2) принимаемого сигнала в канале 32 см при выходе межпланетной станции «Марс-4» из затмения 10 II 1974 г., 3 — экстраполяция измерений частоты к моменту выхода, 4 — аналитическая аппроксимация дифракционного изменения мощности. Мощность сигнала приводится в единицах мощности шума; для измерений частоты указана ошибка, определенная на участке, свободном от влияния тропосферы

ским смещением частоты из-за движения межпланетной станции). Смещение частоты за счет ионосферы обратно пропорционально частоте сигнала, в то время как смещение, вызванное нейтральной атмосферой (так же как и величина доплеровского смещения в свободном пространстве), прямо пропорционально частоте сигнала. Это свойство и было использовано для исключения влияния марсианской ионосферы при комбинировании результатов измерений частоты обоих сигналов.

По этим данным на участке, свободном от влияния тропосферы, определялся ход частоты, вызванный движением межпланетной станции и нестабильностью задающих генераторов, который экстраполировался на тро-

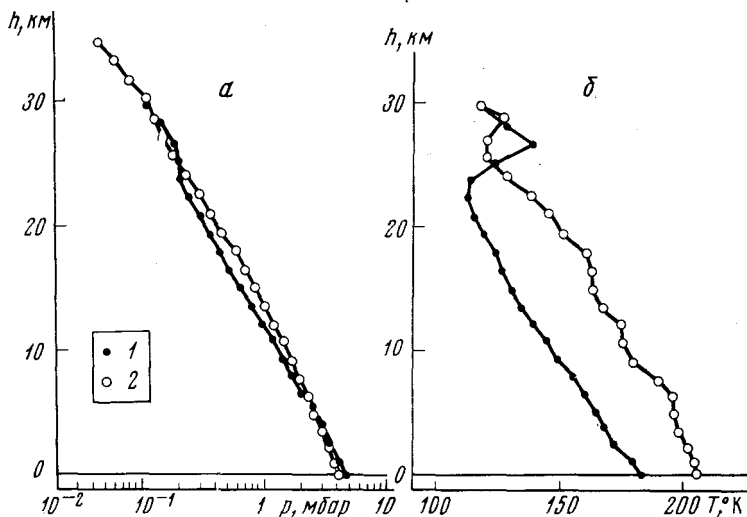


Рис. 2. Высотные профили давления (а) и температуры (б) тропосферы Марса, полученные при заходе (1) и выходе (2) межпланетной станции «Марс-4» 10 II 1974 г. Обе кривые $T(h)$ сходятся в точке, соответствующей граничным условиям (30 км, 120° К)

посферный участок. Разность измеренного и экстраполированного значений частоты давала величину частотного смещения, вызванного тропосферой.

Частотное смещение в канале 32 см, вызванное тропосферой Марса при выходе межпланетной станции «Марс-4» из затмения 10 II 1974 г., представлено на рис. 1, 1. Влияние тропосферы на частоту сигнала продолжалось 34–36 сек. и окончилось, когда радиолуч находился на высоте около 40 км от поверхности планеты. Экстраполируемый участок составлял 45 сек. и был в 15 раз меньше последующего опорного участка, на котором определялись коэффициенты аппроксимирующего полинома. Благодаря этому экстраполяция получилась устойчивой к изменению границ опорного участка, хотя измерения выполнялись в режиме, когда стабильность частоты сигнала определялась бортовым задающим генератором*. Средне-квадратичное значение отклонений частоты на опорном участке составило 0,01 гц.

На том же рисунке показана дифракционная картина изменения мощности принимаемого сигнала при выходе межпланетной станции из затмения. Измерения мощности велись с интервалом 0,15 сек., причем ширина

* В случае радиопросвечивания на одной частоте ионосферная составляющая не позволяет начать экстраполяцию ближе, чем на 300–400 км от поверхности, что приводит к неустойчивости результата (2).

полосы цифровых фильтров увеличивалась в 8 раз по сравнению с частотными измерениями. Для получения оценок параметров тропосферы непосредственно у поверхности Марса измерения частоты экстраполировались

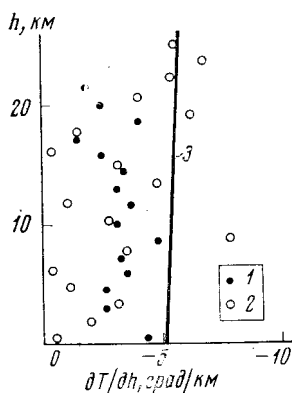


Рис. 3. Температурный градиент тропосферы Марса, полученный при заходе (1) и выходе (2) межпланетной станции «Марс-4» 10 II 1974 г., 3 — адиабатический градиент, вычисленный для двуокиси углерода по данным (4)

к моменту выхода из затмения, который определялся по дифракционной картине на уровне, составляющем $\frac{1}{4}$ от мощности сигнала вдали от планеты.

Обращение частотных измерений в высотный профиль коэффициента преломления тропосферы проводилось с учетом рефракционного искривления луча в тропосфере по методике, описанной в (3). Высотные профили давления и температуры марсианской тропосферы, полученные при заходе и выходе межпланетной станции «Марс-4» 10 II 1974 г., показаны на рис. 2. Предполагалось, что тропосфера состоит из двуокиси углерода, а температура на высоте 30 км равна 120°K . Высота луча h над поверхностью определялась интегрированием от момента захода (выхода) скорости изменения расстояния луча относительно центра Марса.

Давление у поверхности Марса в точке касания луча по измерениям 10 II 1974 г. составляет 4,4 и 4,1 мбар. Шкала высот 7–10 км. Температура у поверхности при заходе оказалась ниже, чем при выходе (183 и 205°K соот-

ветственно), хотя заход произошел на освещенной Солнцем стороне Марса, а выход — на ночной стороне (зенитный угол Солнца 82 и 127°). По-видимому, это вызвано тем, что выход был вблизи экватора (на широте -9°), а заход в более высоких и холодных широтах (-52°). В этот период в южном полушарии Марса была осень.

Таблица 1

Результаты измерений параметров тропосферы Марса

Дата	Долгота	Широта	Область касания луча	Давление, мбар	Температура, $^\circ\text{K}$	Зенитный угол Солнца	Давление, мбар «Маринер 9»	
							(^б)	(^в)
10 II 74								
заход	17°	-52°	Argyre	$4,4 \pm 0,4$	183 ± 12	82°	—	5
выход	236°	-9°	Tritonis	$4,1 \pm 0,3$	205 ± 10	127°	4,6	4,5
18 II 74 *								
выход	214°	38°	Cebrenia	$4,7 \pm 1,9$	174 ± 45	106°	6,4	—
12 III 74								
заход	14°	-35°	Mare Erythracum	$5,2 \pm 1,3$	182 ± 35	72°	4,9	5

* Измерение менее надежное из-за слабого сигнала.

Средняя величина температурного градиента марсианской тропосферы (рис. 3) для освещенной и ночной стороны Марса получилась близкой ($3,1$ – $3,3$ град/км). Температурный градиент ниже адиабатического для двуокиси углерода (5 – $5,5$ град/км) (4). Выше 20 – 25 км в тропосфере Марса, по-видимому, начинается изотермическая область (см. рис. 2б).

Результаты этих и еще двух измерений параметров тропосферы Марса приведены в табл. 1. Для сравнения в таблице приведены также оценки давления для близких районов, полученные с помощью межпланетной

станции «Маринер 9» по радиопросвечиванию на одной частоте ⁽⁵⁾ и по измерениям в полосе поглощения двуокиси углерода в инфракрасном диапазоне ⁽⁶⁾. Совпадение получилось достаточно хорошим, хотя в некоторых случаях точки, в которых проводились измерения одночастотным и двухчастотным методами, отстоят одна от другой на несколько сотен километров.

Двухчастотный метод исследования тропосферы, свободный от влияния ионизированной плазмы на пути распространения радиолуча, дает независимую выборочную проверку большого количества данных, полученных при одночастотном просвечивании Марса (см., например, ^{(5), (8)}).

В случае одночастотного радиопросвечивания необходимым условием разделения профилей коэффициента преломления ионосферы и нейтральной атмосферы является наличие промежуточной области высот, где влияние нейтральной атмосферы и ионосферы пренебрежимо мало ⁽³⁾. В действительности же есть указания на то, что ионизация в атмосфере Марса может простираться до самой поверхности ⁽⁷⁾. Поскольку коэффициент преломления ионизованного газа меньше 1, это должно привести к заниженной оценке коэффициента преломления и параметров нейтральной атмосферы. К завышенной или заниженной оценке коэффициента преломления и параметров нейтральной атмосферы приводит также использование сферически симметричной модели ионосферы при нахождении высотного профиля коэффициента преломления. Соизмеримость коэффициентов преломления разреженной марсианской тропосферы и ионосферы в дециметровом диапазоне волн делает двухчастотные измерения в случае Марса особенно ценными.

Авторы глубоко признательны В. И. Морозу за полезные замечания при обсуждении результатов работы.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР
Москва

Поступило
31 VII 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ М. Б. Васильев, А. С. Вышков и др., ДАН, т. 218, № 6 (1974). ² J. S. Kogan, R. W. Stewart, S. I. Rasool, Radio Sci., v. 7, 525 (1972). ³ V. R. Eshleman, Planet. Space Sci., v. 21, 1521 (1973). ⁴ М. П. Вукалович, В. В. Алтунин, Теплофизические свойства двуокиси углерода, М., 1965. ⁵ A. J. Kliore, G. Fjeldbo et al., J. Geophys. Res., v. 78, 4331 (1973). ⁶ B. Conrath, R. Curran et al., ibid., v. 78, 4267 (1973). ⁷ R. C. Whitten, I. G. Poppoff, J. S. Sims, Planet. Space Sci., v. 19, 243 (1971). ⁸ М. А. Колосов, О. И. Яковлев и др., Радиотехника и электроника, т. 17, № 12, 2483 (1972).