

Ш. Ш. Долгинов,
Е. Г. Ерошенко,
Л. Н. Жузгов,
К. И. Грингауз,
В. В. Безруких,
Т. К. Бреус,
М. И. Веригин,
А. П. Ремизов

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПЛАНЕТЫ МАРС

Работа включает два раздела: 1. Магнитное поле планеты Марс по данным спутников «Марс-3» и «Марс-5» (авторы Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов); 2. Магнитное поле Марса по данным плазменных измерений на советских искусственных спутниках Земли (авторы К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Т. К. Бреус, М. И. Веригин, А. П. Ремизов).

Анализируются данные по магнитному полю и плазме в ближайшей окрестности планеты Марс. По показаниям магнитных и плазменных приборов отмечены пересечения ударного фронта, переходной зоны и области, где магнитометром обнаруживается более регулярное поле, а по плазменным датчикам — резкое уменьшение числа ионов из-за увеличения изотропии. Знак поля в этой области не зависит от знака межпланетного поля. Выявлено согласие знака поля по данным спутников «Марс-3» и «Марс-5», которое может быть объяснено при допущении, что северный полюс диполя расположен в северном полушарии, и ось диполя наклонена к оси вращения на угол $\sim 20^\circ$.

Магнитное поле планеты Марс по данным спутников «Марс-3» и «Марс-5». Магнитометрами космических аппаратов «Марс-2» и «Марс-3» (1972 г.) в ближайшей окрестности планеты Марс были измерены магнитные поля, в 7–10 раз превышающие напряженность межпланетных полей на орбите Марса (рис. 1).

На магнитограмме спутника «Марс-3» от 21 января 1972 г. удалось отождествить, пользуясь известными критериями, изменения поля, характерные для движения космического аппарата в солнечном ветре, при пересечении ударного фронта, в переходной области между фронтом и магнитопаузой, пересечения магнитопаузы и области максимального поля в периферии. При удалении от периферии эти области пересекались в обратном порядке.

В публикациях [1, 2] было показано, что совокупность экспериментальных данных о величине и топологии поля, положении ударного фронта, интенсивности солнечного ветра может быть наиболее естественно объяснена при допущении, что планета Марс обладает собственным магнитным полем, которое деформировано и ограничено с дневной стороны действием сверхзвукового потока частиц и полей солнечного ветра.

По измерениям в точках, ближайших к периферии (1100 км), был определен дипольный магнитный момент, который оказался равным $2,4 \cdot 10^{22}$ гс·см³, а напряженность поля на магнитном экваторе — 64 γ. Модели собственного магнитного поля были противопоставлены друге две модели.

1. Наблюденное поле — межпланетное магнитное поле солнечного происхождения, усиленное за ударным фронтом.

2. Наблюденное поле — индуцировано в ионосфере электрическим полем солнечного ветра $E = -[\vec{V} \times \vec{B}]$, где \vec{V} — скорость, \vec{B} — напряженность поля солнечного ветра [3, 4].

Первая из этих моделей была отвергнута на основе магнитограмм Марс-3, полученных 6 и 18 апреля 1972 г. [1, 2]. Высота периферии в этих сеансах была 2200 км и спутник достигал периферии при углах Солнце — Марс — спутник в 22 и 31° соответственно. На магнитограммах отчетливо отмечалось прохождение ударного фронта, но не наблюдалось повышенных значений поля. В то же время магнитометр спутника «Марс-2», орбита которого не менялась, продолжал обнаруживать в периферии повышенное магнитное поле при каждом включении. Это было объяснено тем, что поле ограничено с дневной стороны, а спутник «Марс-3» был 6 и 18 апреля в периферии выше магни-

топаузы. Если бы наблюдаемое поле было полем солнечного ветра, усиленным за ударным фронтом, то мы должны были бы наблюдать максимум усиленного поля сразу же за ударным фронтом, как это имело место в эксперименте вблизи Венеры [5, 6]. Возможная роль механизма индукции полем $E = -[\bar{V} \times \bar{B}]$ не могла быть проверена в экспериментах 1972 г.

Суждения о природе магнитного поля, наблюдаемого магнитометрами, были высказаны и авторами плазменных экспериментов. Единственным доступным критерием для суждения по этой проблеме в этих работах было положение ударного фронта. По данным магнитометра среднее значение вычисленной по формулам газодинамики [7] высоты «препятствия» оказалось 950 ± 430 км [1], по данным широкоугольного детектора [8] 1200 км, по данным электростатического анализатора [9] 1000 км. В работе [10] обращается внимание на то, что в апреле и мае 1972 г. данные электростатического анализатора «Марс-2» указали на более

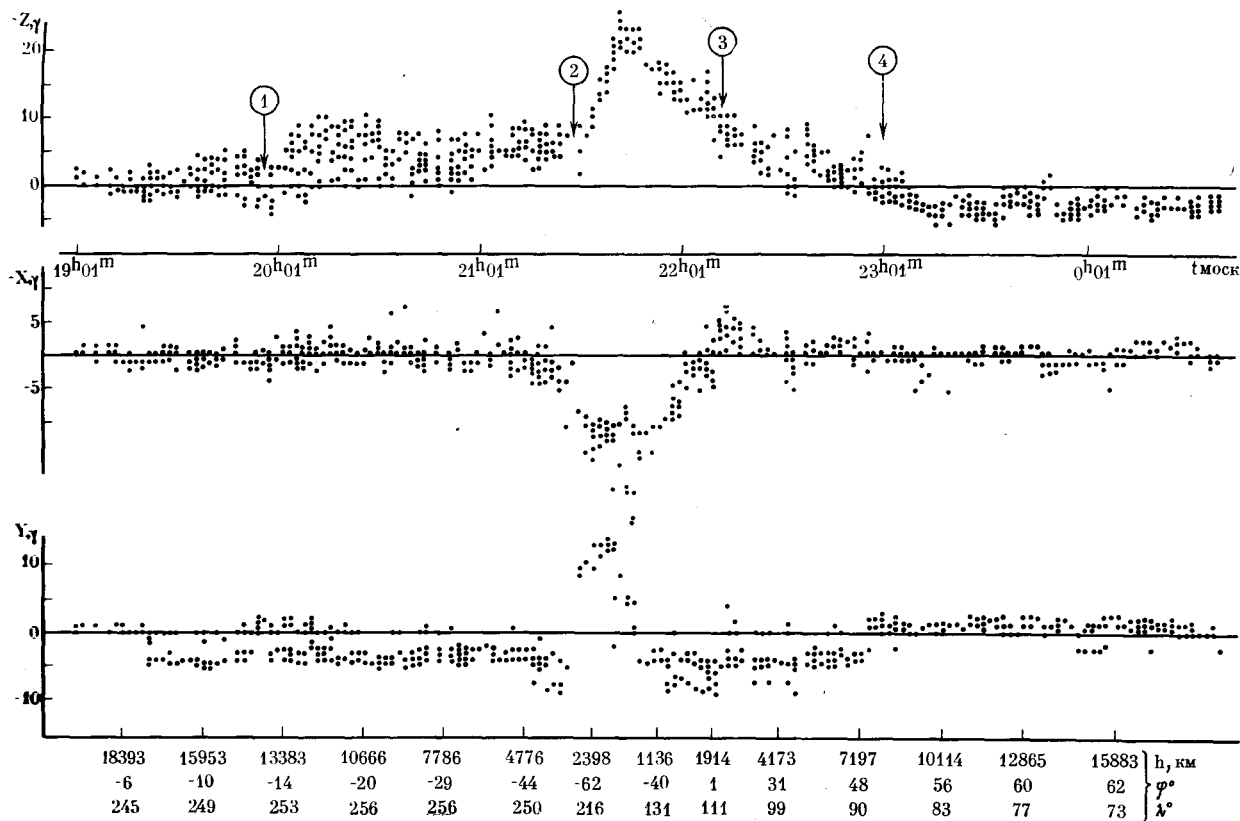
близкое положение ударного фронта и соответственно более низкую высоту «препятствия». Авторы постулировали существование «ионной подушки», которая обеспечивает необходимый баланс давления экзосферы Марса и солнечного ветра.

По мнению авторов [10], наблюдаемое магнитное поле может быть полем токов, индуцированных в «ионной подушке» и ионосфере Марса [10, 11].

Эксперимент по магнитному полю «Марс-2» и «Марс-3» стимулировал появление теоретических моделей обтекания планеты солнечным ветром при учете существования слабого магнитного момента Марса [12, 13]. Магнитные исследования со спутника «Марс-5» предприняты с целью уточнения природы наблюдаемого поля. Краткое изложение результатов исследования магнитного поля со спутника «Марс-5» дано в публикации [14].

Параметры орбиты и метрология эксперимента. Спутник «Марс-5» был выведен на орбиту вокруг Марса 12 февраля 1974 г. Наклон орбиты к плоскости экватора 36° , высота в перигеентре 1760 км, в апоцентре — 20 000 км. Проекция орбиты в солнечно-эклиптической системе координат приведены на рис. 2, 3.

Р и с. 1 Магнитограммы спутника «Марс-3» 21.01 1972 г. — X — направление к Солнцу, + Z — к северному полюсу эклиптики, Y — дополнение до левой системы координат; здесь и далее цифрами обозначены характерные области



На спутнике «Марс-5» был установлен трехкомпонентный феррозондовый магнитометр СГ-70 с диапазоном измерения $\pm 60 \gamma$. Порог чувствительности 1γ . Для определения нулевых значений на станции «Марс-5» были проведены три сеанса закрутки 13 сентября, 12 октября и 27 декабря 1973 г. Нулевые значения по компонентам Y и Z определялись при этом в абсолютной мере. Нулевой уровень компоненты X — вдоль оси вращения, направленной по радиусу к Солнцу, определялся в относительной мере, исходя из угла спирали на соответствующих расстояниях и знака сектора межпланетного поля, определенного по наземным геомагнитным данным, известным из работы [15] методом. Нулевые уровни, принятые для обработки данных на орбите, получены путем экстраполяции значений, полученных в сеансах закрутки. Величина нулевых значе-

ний датчика X оставалась неизменной в пределах $0,5 \gamma$ за весь период полета. Знаки компонент поля, измеренных в солнечном ветре и вычисленных с принятыми значениями нулевых уровней, оказались в согласии со знаками межпланетного поля, сообщенными С. М. Мансуровым и Л. Г. Мансуровой [15].

Малый угол наклона орбиты к плоскости экватора (36°), ее простираение на ночную сторону, постоянная солнечно-звездная ориентация спутника, простая структура полей сол-

Р и с. 2. Проекция вектора поля на плоскость эклиптики (а) и перпендикулярную ей плоскость (б) вдоль орбиты спутника «Марс-5» (в) 13.02 1974 г.

X — направление на Солнце, Z — на северный полюс эклиптики, Y — дополнение до правой системы координат, $D = (Y^2 + Z^2)^{1/2}$. Здесь же нанесены проекции векторов магнитного поля в моменты московского времени

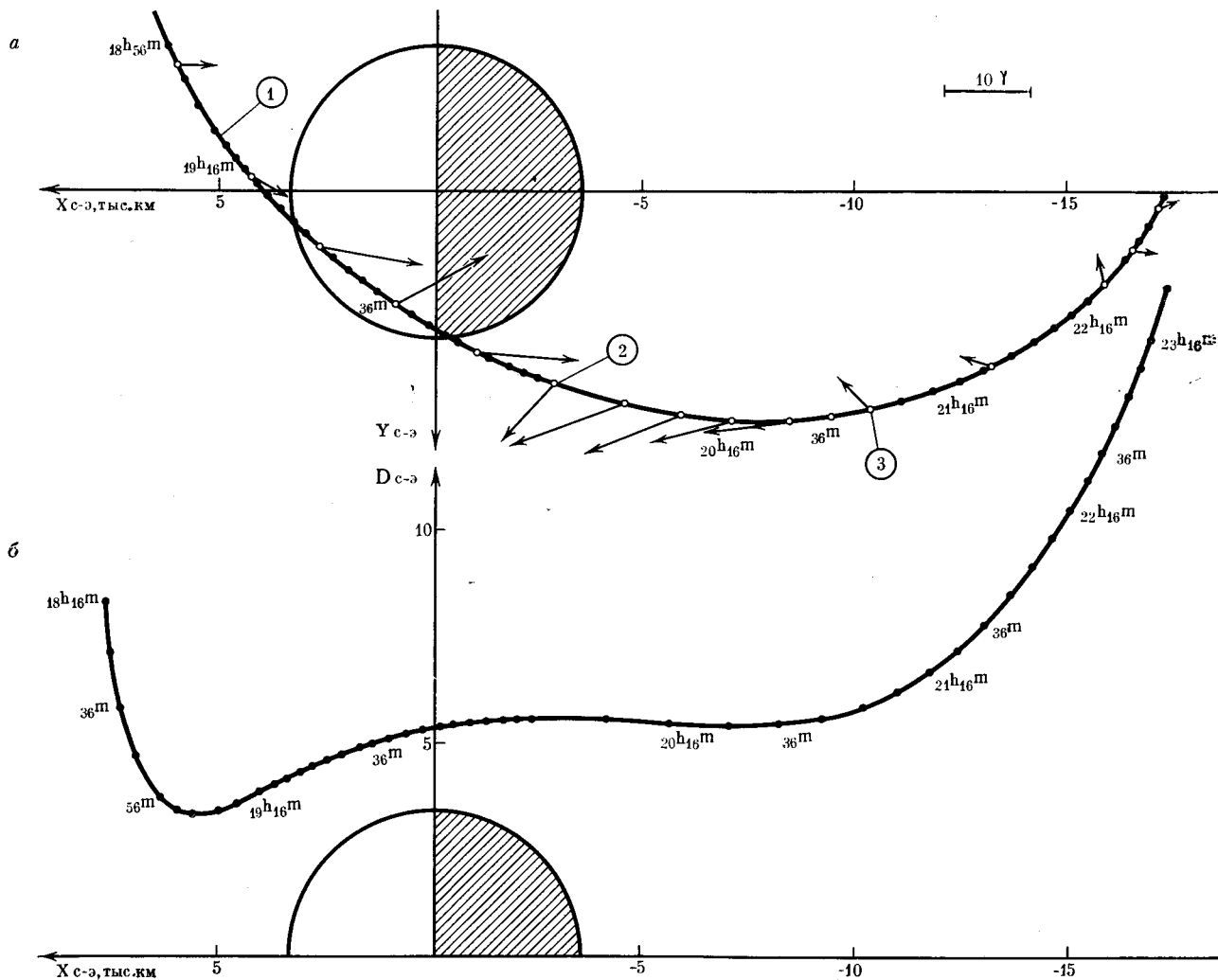


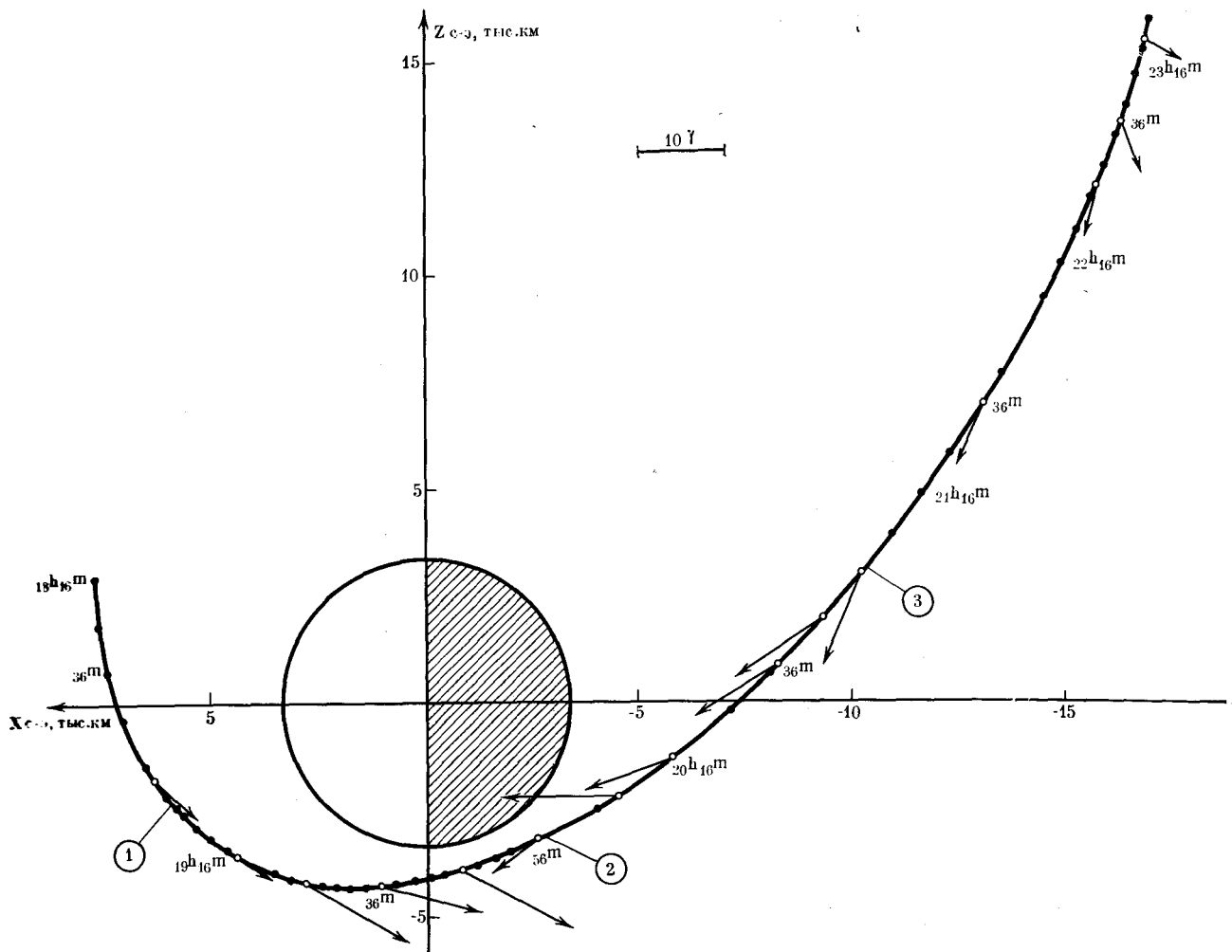
Таблица 1

Дата, февраль 1974 г.	Знак поля	Дата, февраль 1974 г.	Знак поля
10	От Солнца	18	От Солнца
11	»	19	»
12	»	20	К Солнцу
13	»	21	»
14	»	22	»
15	»	23	»
16	»	24	»
17	Два знака	25	»

вечного ветра в период активного существования спутника «Марс-5», способствовали получению новых экспериментальных данных по кругу вопросов природы и топологии поля в ближайшей окрестности планеты Марс, хотя

ближайшие расстояния, на которых была получена информация, отстояли примерно на 700 км дальше от планеты по сравнению с экспериментами «Марс-2» и «Марс-3».

Условия в межпланетном пространстве. Условия в межпланетном пространстве в период активного существования спутника «Марс-5» характеризуются сравнительно умеренной активностью и простой структурой межпланетного поля. По данным магнитометра спутника «Марс-5» в сеансах измерения, проведенных 13, 14 и 15 февраля, межпланетное магнитное поле было направлено от Солнца. 20 февраля межпланетное поле оказалось направлено к Солнцу. 22-го — также к Солнцу, но малой величины по датчику X, который направлен на Солнце. Эти данные находятся в согласии с данными, сообщенными С. М. Мансуровым и Л. Г. Мансуровой на основании определений, сделанных их методом, и приведенными в табл. 1.



Т а б л и ц а 2

v, км/сек	13	14	15	19	20	21	22	23	24	25
	τ, сутки									
450	1,41	1,48	1,55	1,83	1,90	1,97	2,02	2,11	2,17	2,2
700	2,20	2,27	2,35	2,64	2,72	2,79	2,84	2,93	3,0	3,07

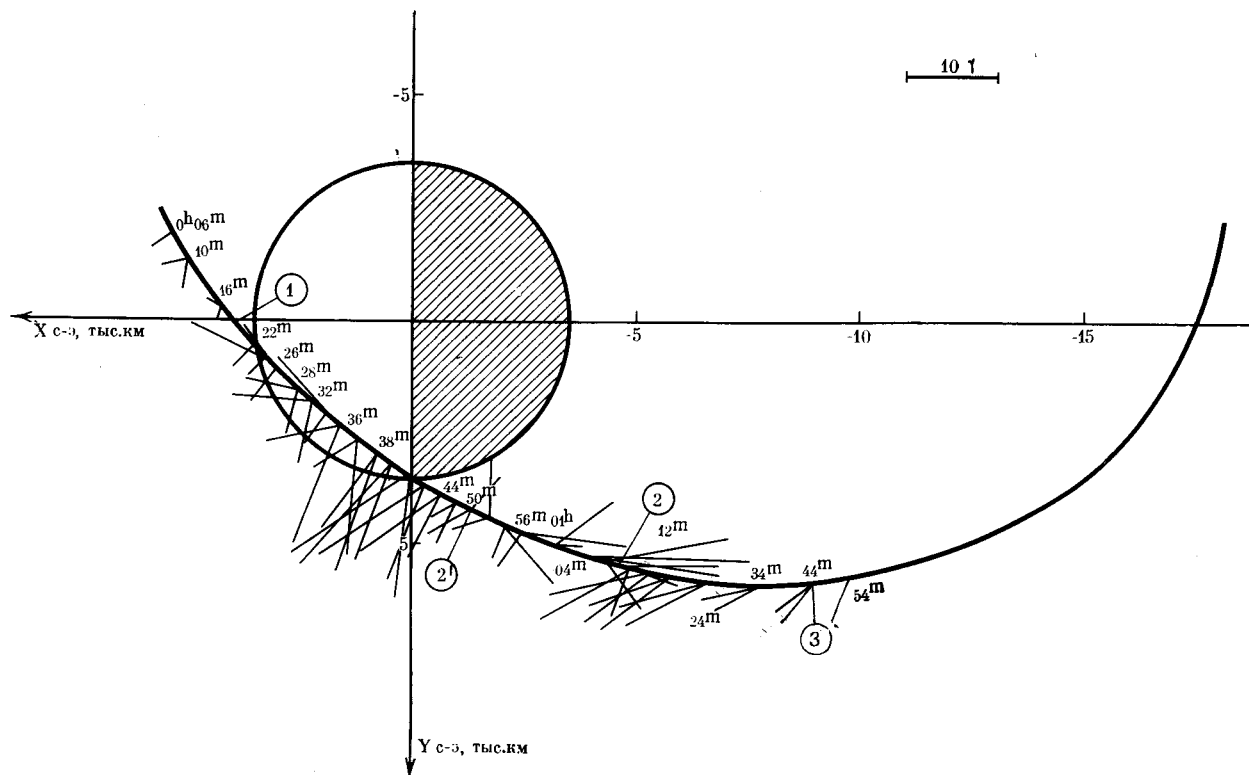
При оценке межпланетных условий в окрестности Марса следует также иметь в виду, что события на Марсе наступают со сдвигом по времени. Сдвиги τ — рассчитанные для скорости солнечного ветра 450 и 700 км/сек в период с 13 по 25 февраля 1974 г., представлены выше в табл. 2. События на Марсе должны наступать раньше, чем на Земле.

Топология поля. На рис. 4 и 5 представлены магнитограммы, полученные 13.02 и 20.02 1974 г. в режимах с редкими и более частыми измерениями. На рис. 2 и 3 представлены проекции векторов поля на плоскость эклиптики и перпендикулярную ей плоскость.

Особенности изменений поля при движении по орбите удобно наблюдать по записям компоненты в плоскости эклиптики, направленной на

Солнце — X. В обоих сеансах измерения начались в солнечном ветре, но при противоположных направлениях межпланетного поля. 13.02 поле имело направление — от Солнца, 20.02 — к Солнцу. В моменты времени, обозначенные на магнитограммах цифрой 1, спутник пересекал ударный фронт. Из-за редкой информативности в сеансе 13.02 можно лишь утверждать, что это событие могло иметь место в интервале между 19^h07^m и 19^h17^m. В обоих случаях за ударным фронтом возросли флуктуации поля, но средние значения сохраняют в каждом случае знак, который поле имело до

Р и с. 3. Проекция траектории «Марс-5» 20.02 1974 г. Обозначения те же, что на рис. 2



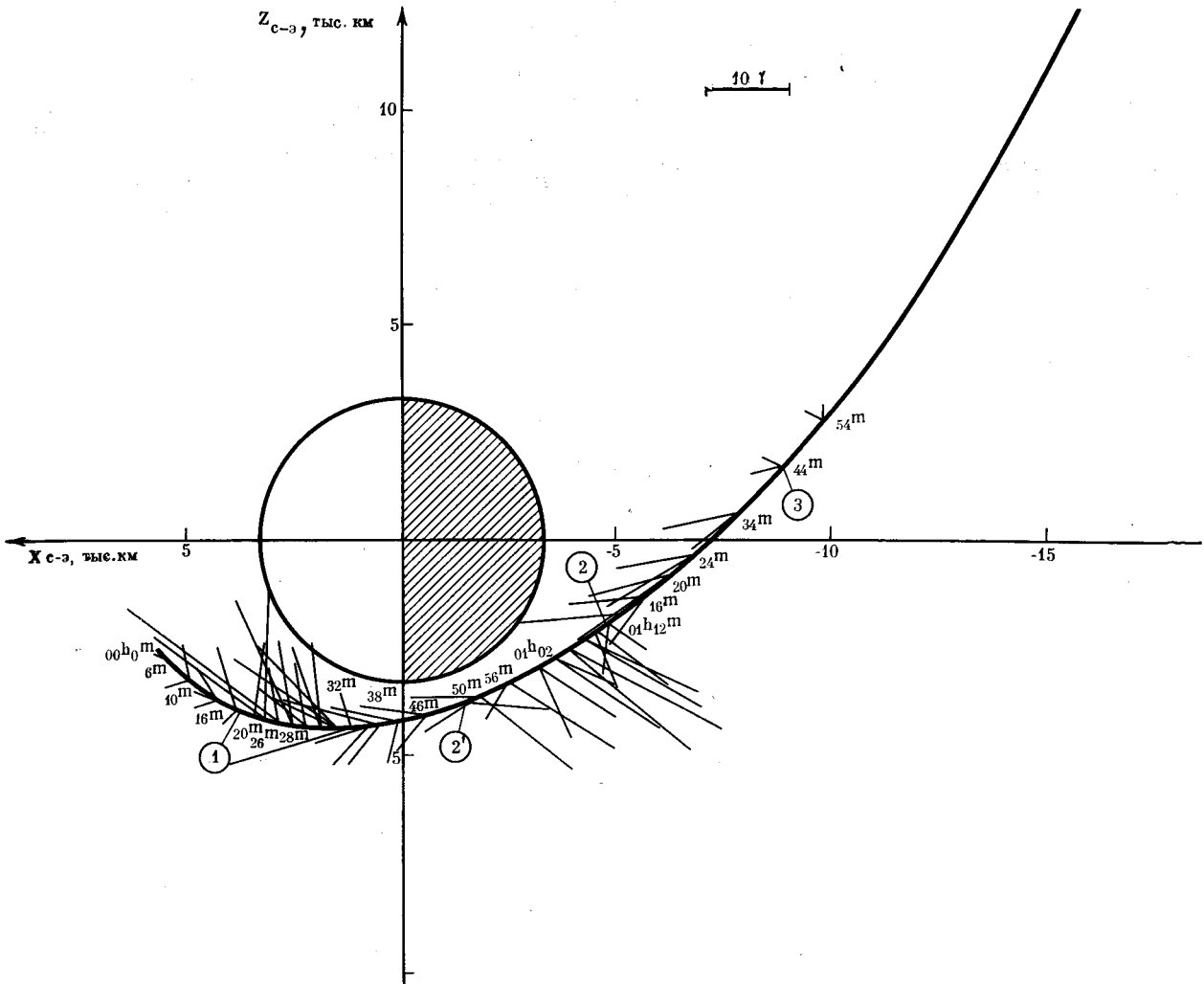
ударного фронта. Так продолжается до моментов, обозначенных цифрами 2 на рис. 6 и 7. В точке 2 среднее значение компоненты X резко меняет знак и становится отрицательным.

В сеансе 20.02 1974 г., который отличался наибольшей интенсивностью солнечного ветра, имеет место смена знака в точках 2 и 2'. В интервале 2'—2 поле флюктуирует в области, где оно граничит с областью 1—2' и более регулярно там, где оно граничит с областью 2—3. Сравнивая отсчеты по компонентам X и Z в солнечном ветре и в границах 1—2' и 1—2 в сеансах 20.02 и 13.02 1974 г., можно заключить, что они вполне соответствуют по характеру флюктуаций полю переходной области между ударным фронтом и «препятствием». В одном и том же диапазоне марсоцентрических координат измеренные поля в области 1—2 и 1—2'

имеют противоположные знаки в согласии с противоположными знаками полей в солнечном ветре, датчики плазмы подтверждают, что в обоих случаях в области 1—2' плазма обладает свойствами переходной области 3—4.

Другими свойствами обладают области, ограниченные на рисунках цифрами 2—3. В этой области Z и X компоненты всегда отрицательны независимо от знака межпланетного поля. Величина радиальной компоненты поля в этой области в ряде сеансов имеет наибольшую величину по сравнению с другими компонентами, а отношение $\Delta X/X$ мало по сравнению с этой величиной в переходной области 1—2. Эта область прослеживается до высоты 7500—9000 км от поверхности.

Особенности области 2—3 проявляются и в показаниях датчиков плазмы. Как показали сопоставления, в этой области наблюдается рез-



кое уменьшение потока ионов, связанное, по-видимому, с их изотропизацией [16]. Из изложенного можно заключить, что область 2—3 как по магнитному полю, так и по плазме проявляет свойства магнитосферы. Независимость знака поля этой области от знака межпланетного поля указывает достаточно однозначно, что это поле принадлежит Марсу. Кроме того, из этого также следует, что эффект индукции токов в ионосфере Марса под действием электрического поля солнечного ветра $\bar{E} = -[\bar{V} \times \bar{B}]$ не проявляется заметно на высотах измерения спутника «Марс-5». Во всяком случае этот механизм не определяет наблюдаемое поле в области 2—3.

Соседняя область 3—4 снова проявляет свойства переходной зоны из-за зависимости знака среднего значения поля от знака межпланетного поля. Уровень флуктуации поля в области 3—4 несколько меньше, чем в 1—2', так как она расположена на ночной стороне. Сообщение [16] об увеличении потока ионов в области 3—4 и изменении спектра по сравнению с областью 2—3 находится в согласии

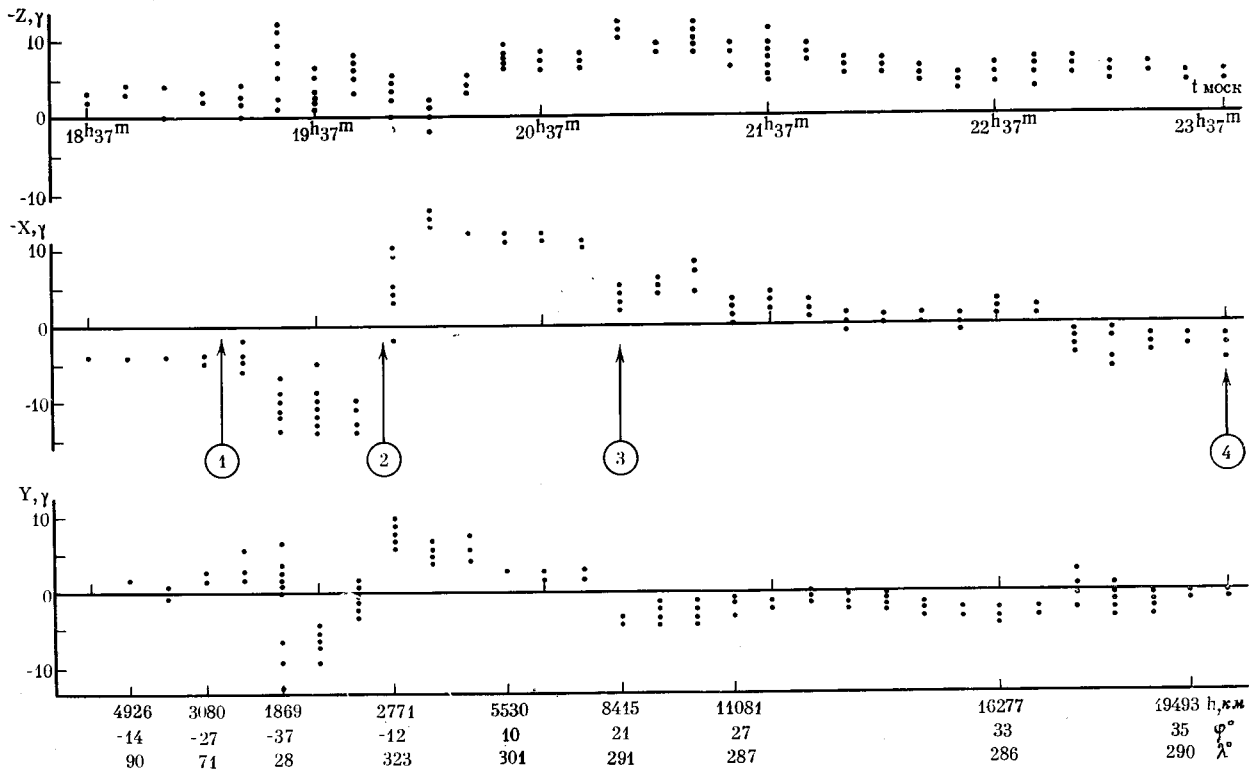
с определением этой области как переходной по магнитометру.

В сеансе 22.02 1974 г. (рис. 6) информация получена при высокой опросности. Знак межпланетного поля соответствовал знаку поля в сеансе 20.02 1974 г. — к Солнцу. Но интенсивность потока солнечного ветра уменьшилась в 4—5 раз по сравнению с сеансом 20.02 1974 г., хотя скорость возросла до 600 км/сек [17].

По данным плазменных датчиков уменьшение потока ионов в этом сеансе отмечено в 2^h41^m [17]. По магнитометру в это время по компоненте X уже отмечены только отрицательные отсчеты, а в 2^h52^m отмечается уменьшение флуктуаций отсчетов и одновременно второе более резкое уменьшение потоков ионов.

Область устойчивого поля во всех компонентах прослеживается до 3^h57^m. Далее спутник пересекает границу магнитосферы и попадает в переходную область. Магнитограммы, полученные со спутника «Марс-5» 21, 25—27 февраля, достаточно идентичны (рис. 7). Магнитометр в каждом из этих сеансов включался тогда, когда спутник находился в северном полушарии, уже в пределах магнитосферы, в области отрицательных отсчетов по компонентам X и Z. Все эти сеансы имеют продолжительность не более 2 час. В этих се-

Р и с. 4. Магнитограммы спутника «Марс-5» 13.02 1974 г. Обозначения те же, что на рис. 1, но Y — дополнение до правой системы координат



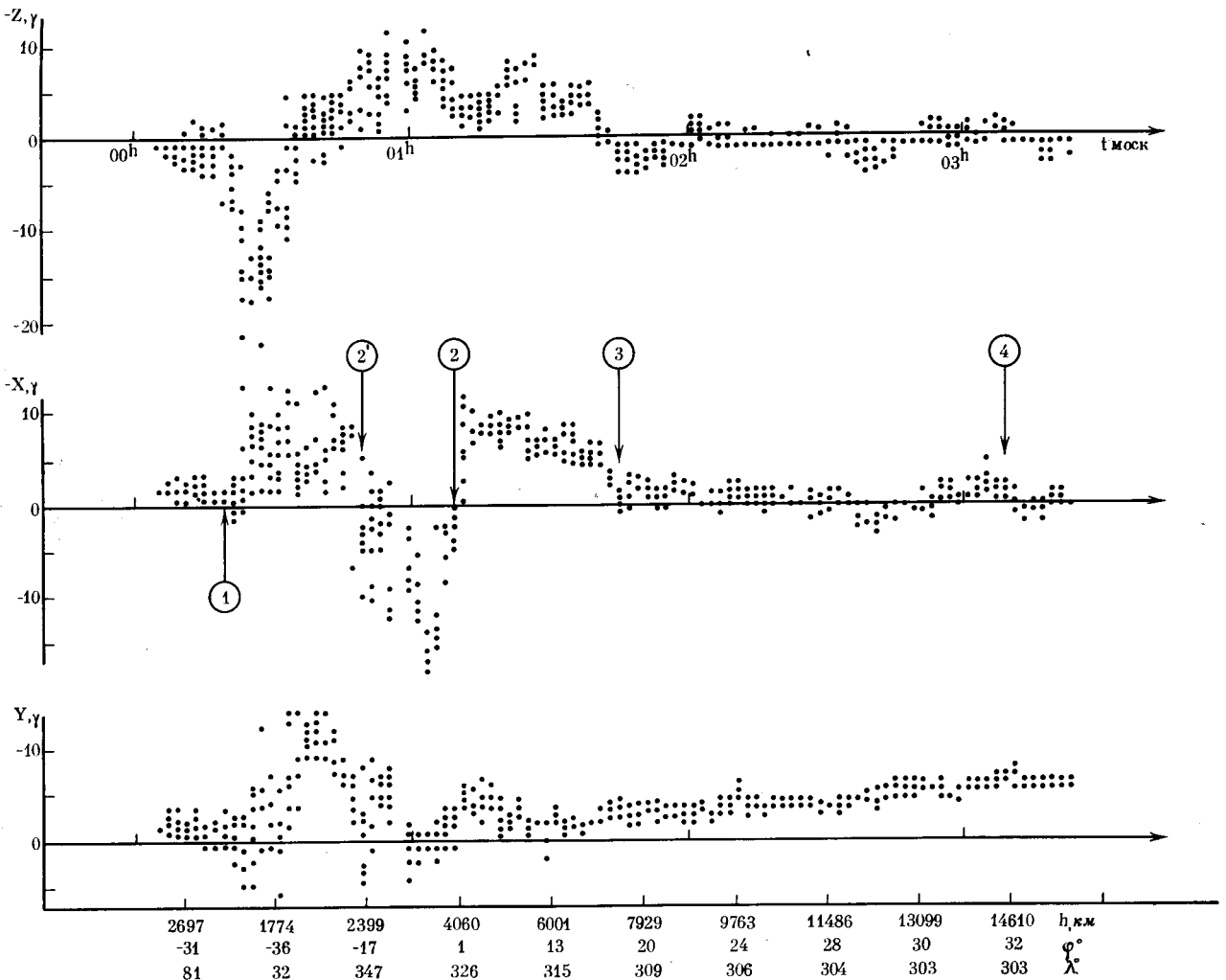
ансах не получены отсчеты в солнечном ветре и на восходящих отрезках траектории.

Магнитограммы спутника «Марс-5» показывают, что в области 2—3 наибольшую величину имеют компоненты X и Z . Поперечная компонента Y в этой области в большинстве сеансов в среднем не превышает 1—3 γ . В то время как знак компонент X и Z в области 2—3 всегда оставался неизменным, знак Y -компоненты иногда менялся, так, например, в сеансах 13, 15, 20, 22 февраля (рис. 2, см. рис. 4—6) Y -компонента была положительна, а в сеансах 21, 25—27 февраля Y -компонента отрицательна. Изменение знака Y -компоненты в области 2—3 не коррелирует с изменением знака межпланетного поля. Возможно, что изменчивость

поперечной компоненты, учитывая ее малую величину, зависит от неточности нулевого уровня. Нельзя исключать также и возможные эффекты взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Марса в граничной области, которые могут приводить к подобным изменениям в поперечной компоненте. Во всяком случае в области 2—3 определяющими компонентами являются X и Z , знак которых не зависит от знака межпланетного поля и остается неизменным. На высотах орбиты «Марс-5» магнитное поле сильно зависит от активности солнечного ветра, причем в большей степени, чем от смены знака межпланетного поля. Это отчетливо видно из сравнения поля области 2—3 магнитограмм 13.02 и 15.02 1974 г. (при одном и том же знаке межпланетного поля) и 20.02 и 22.02 1974 г. (при противоположном знаке межпланетного поля).

Р и с. 5. Магнитограммы спутника «Марс-5» 20.02 1974 г.

Обозначения те же, что на рис. 4



Во время работы спутника «Марс-5» наблюдались два случая 14 и 24 февраля, когда поле было очень слабым и нельзя было отождествить соответствующие характерные области. Это, вероятно, связано с изменением размеров границы магнитосферы и сноса силовых линий на ночную сторону Марса при изменении параметров солнечного ветра.

Сравнение с газодинамическими моделями. Ударный фронт в окрестности Марса был обнаружен станцией «Маринер-4» в 1965 г. при углах с направлением на Солнце $110-150^\circ$ [18]. Определение положения ударного фронта и высоты «препятствия» с подсолнечной стороны по этим данным возможно при значительных погрешностях. Это привело к объяснению возникновения ударного фронта действием «препятствий» различной природы: магнитного поля [19] и ионосферы [20].

Как уже упоминалось, авторы плазменных экспериментов «Марс-2» и «Марс-3» также высказали различные суждения о природе «препятствия», при этом учитывалась возможность существования и индуцированного поля. Маг-

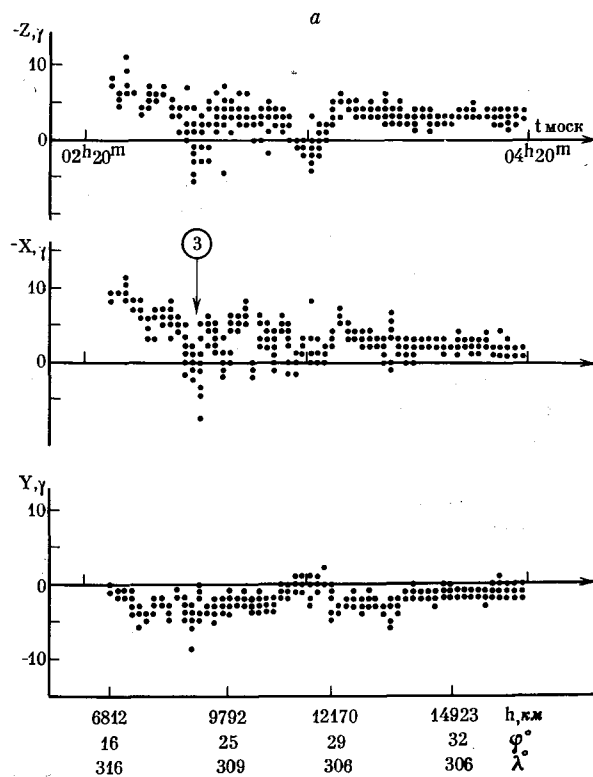
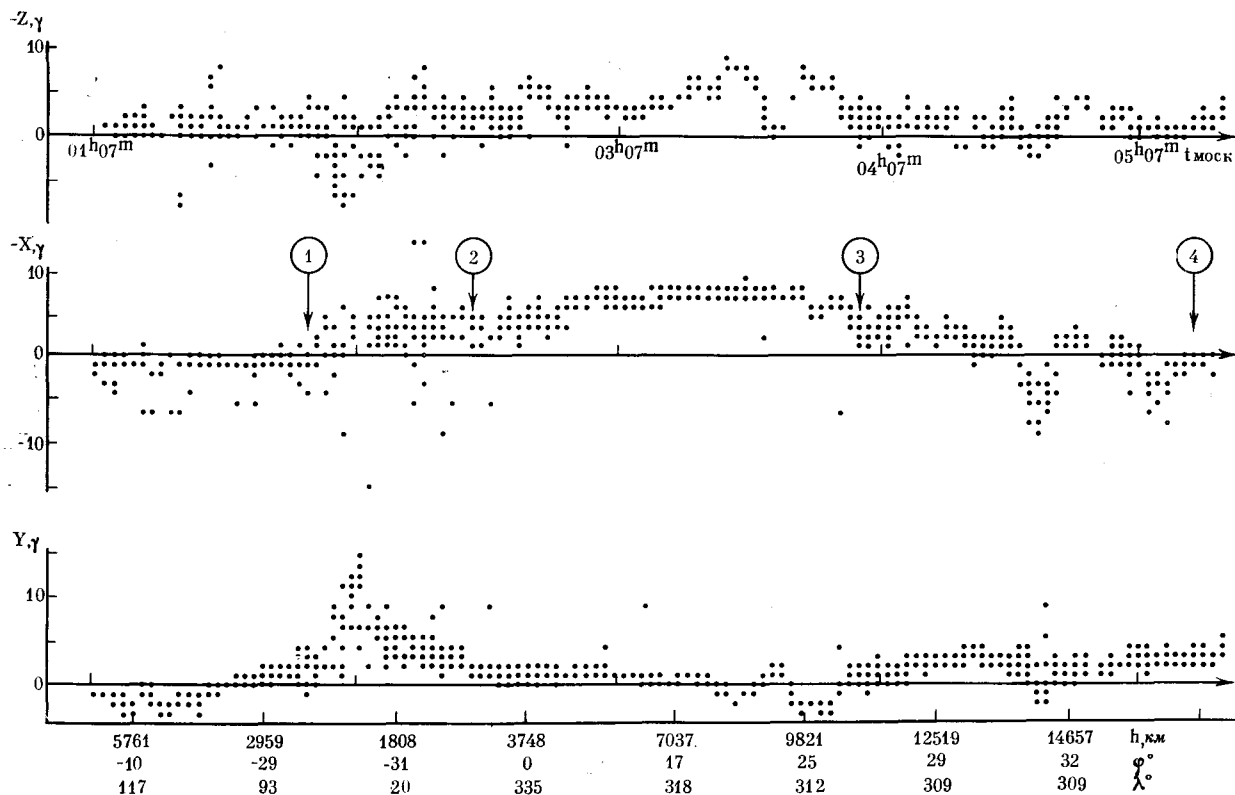


Рис. 6. Магнитограммы спутника «Марс-5» 22.02 1974 г.

Обозначения те же, что на рис. 4



Т а б л и ц а 3

Дата	Пересечение ударного фронта	h , км	φ°	λ°	Угол С-М-О	Высота «препятствия», км
13.02 1974 г.	19 ^h 07 ^m	3168	-26	22	53	1420
	19 ^h 17 ^m	2340	-34	54	39	639
20.02 1974 г.	00 ^h 10 ^m	2052	-36	59	46	333
	00 ^h 12 ^m	2173	-36	65	43	484
22.02 1974 г.	01 ^h 55 ^m	2372	-34	78	39	715
	01 ^h 57 ^m	2249	-35	74	41	592
24.02 1974 г.	03 ^h 37 ^m	2477	-29	84	35	910
	03 ^h 47 ^m	1939	-31	64	47	137

20.02 1974 находится в согласии с этими данными. Средние значения 13.02 (1000 км) и 24.02 1974 г. (500 км) определены с большими погрешностями. Из приведенных средних значений высот «препятствия» следует, так же как из аналогичных определений «Марс-2» и «Марс-3», что ударный фронт в окрестности Марса вызывается причиной, находящейся выше «ионопаузы» Марса, определенной по моделям [21, 22]. Низкое расположение «препятствия» в сеансе 20.02 1974 г. можно объяснить более интенсивным солнечным ветром в этот день по сравнению со всеми другими сеансами измерений.

Эффективный магнитный момент Марса рационально оценить по положению ударного фронта в сеансах 20.02 и 22.02.1974 г. Граница «препятствия» в подсолнечной точке R_0 , магнитный момент диполя M , скорость v , и плотность n солнечного ветра связаны соотношением [23]:

$$R_0 = 1,07 \left[\frac{M^2}{4\pi n m v^2} \right]^{1/6}.$$

По данным К. И. Грингауза и др. [26], 20.02. 1974 г. $n = 10/\text{см}^3$, $v = 474 \text{ км/сек}$ при $h_0 = 400 \text{ км}$, $R_0 = 3780 \text{ км}$, $M = 3,1 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$; 22.02 1974 г. $n = 1,8/\text{см}^3$, $v = 638 \text{ км/сек}$, $h_0 = 650 \text{ км}$, $R_0 = 4030 \text{ км}$, $M = 2,1 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$, что $M = 2,6 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$, что близко к $2,47 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$, указанным в [1, 2].

К вопросу об ориентации диполя. Ориентация марсианского диполя является весьма важной характеристикой поля. Как уже упоминалось, магнитное поле Марса на высотах полета спутников «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5» контролируется солнечным ветром и топология поля определяется действием внутренних и внешних источников магнитного поля. Ориентация магнитного диполя связана с коэффициен-

тами дипольного поля g_1^0 , g_1^1 , h_1^1 соотношениями:

$$\varphi_0 = \arctg \frac{g_1^0}{(h_1^{12} + h_1^{12})^{1/2}}; \quad \lambda_0 = \arctg \frac{h_1^1}{g_1^1}.$$

Коэффициенты g_1^0 , g_1^1 , h_1^1 были определены в 20 точках на минимальных расстояниях от планеты в сеансе 21.01 1972 г. («Марс-3»). Изменчивость коэффициентов g_1^0 , g_1^1 , h_1^1 и их относительная величина могли служить мерой деформации поля и влияния внешних источников поля. Средние значения коэффициентов, определенные в 4 ближайших точках орбиты, оказались равными: $\bar{g}_1^0 = 19 \gamma$, $\bar{g}_1^1 = -29 \text{ гамм}$, $\bar{h}_1^1 = 54 \gamma$, что указывало на сильно наклоненный диполь. Было заключено, что это формальный результат и что без учета деформации поля невозможно точно определить истинную ориентацию диполя [1, 2].

Совокупность данных «Марс-3» и «Марс-5» о топологии поля на дневной и ночной сторонах несет информацию об ориентации диполя и ниже высказываются некоторые соображения по этой проблеме.

1. Сопоставление измеренных компонент поля в области 2 — 3 магнитограммы «Марс-5» 13.02 1974 г. и компонент, вычисленных для этих точек пространства по коэффициентам g_1^0 , g_1^1 , h_1^1 , определенных по магнитограмме Марс-3 21.01 1972 г., выявило их согласие по знакам, что указывает на сохранение главных черт топологии поля.

2. Коэффициент g_1^0 представляет осевую компоненту магнитного диполя. Если допустить, что внешние источники магнитного поля могли изменить численные значения этого коэффициента, но не его знак, то следует заключить, что северный полюс марсианского диполя находится в северном полушарии планеты Марс, т. е. полярность марсианского диполя обратна полярности земного диполя и совпадает с полярностью поля Юпитера.

3. На рис. 9 представлены проекции векторов магнитного поля области 2—3 на плоскость, перпендикулярную эклиптике, с дневной (Марс-3) и ночной стороны («Марс-5»). Пунктирными линиями представлены силовые линии диполя, деформированного действием солнечного ветра. Ось диполя перпендикулярна направлению на Солнце. Если учесть, что в период измерений со спутника «Марс-5» марсоцентрическое склонение Солнца составляло $+ (2,5^\circ - 4^\circ)$, то пунктирные линии указывали топологию поля, деформированного диполя, ось которого совпадает с осью вращения

планеты. Однако вектора поля, как с дневной, так и с ночной стороны, плохо согласуются с пунктирными линиями. Для достижения согласия необходимо ось диполя повернуть относительно оси Y солнечно-эклиптической системы координат на угол $15-20^\circ$, как это указано на рис. 9 сплошными линиями. Поворот на больший угол приведет к рассогласованию силовых линий и векторов поля с дневной стороны. Это чисто качественное построение согласуется со всеми магнитограммами, так как на ночной стороне область 2—3 наблюдалась только в северном полушарии.

4. Обратимся к магнитограмме 20.02 1974 г. (см. рис. 5). Радиальная компонента поля имеет кратковременную, но регулярную часть 2'—2, где поле положительно. Затем радиальная компонента меняет знак на широте -10° , переходя в область 2—3 уже в северном полушарии. Область 2'—2 по показаниям плазменных датчиков имеет те же свойства, что и область 2—3. Смена знака радиальной компоненты может иметь место в этом случае на магнитном экваторе. Это не согласуется с топологией поля во всех других сеансах и в том числе с положением области 2—3 в этом сеансе. Возможно, что область 2'—2 имеет другую природу.

Ориентацию диполя, полученную из качественного построения (см. рис. 9), следует рассматривать как первое приближение при более строгих определениях ориентации диполя.

Магнитограммы («Марс-5»), полученные на вечерней и ночной стороне, как и ранее полученные магнитограммы с дневной стороны («Марс-3») [1, 2], позволяют заключить:

1. В окрестности планеты Марс обнаруживается ударный фронт, и его расположение прослежено при разных углах с направлением на Солнце.

2. Пространство за ударным фронтом обладает характерными особенностями переходной зоны между солнечным ветром и «препятствием».

3. Магнитограммы выявлена область пространства, где магнитное поле обладает свойствами магнитосферного поля по своей топологии и воздействию на плазму.

4. Магнитное поле в области «магнитосфера» не меняет своего знака с изменением знака межпланетного поля, в то время как в соседних граничных областях регулярная часть поля меняется по знаку при изменении знака межпланетного поля.

5. Форма и размеры магнитосферы зависят от интенсивности солнечного ветра. Топология отдельных компонент поля на ночной сто-

роне, представленная в солнечно-эклиптической системе координат, обнаруживает характерные зависимости от аэоцентрических координат, радиальная компонента X отрицательна в северном полушарии Марса.

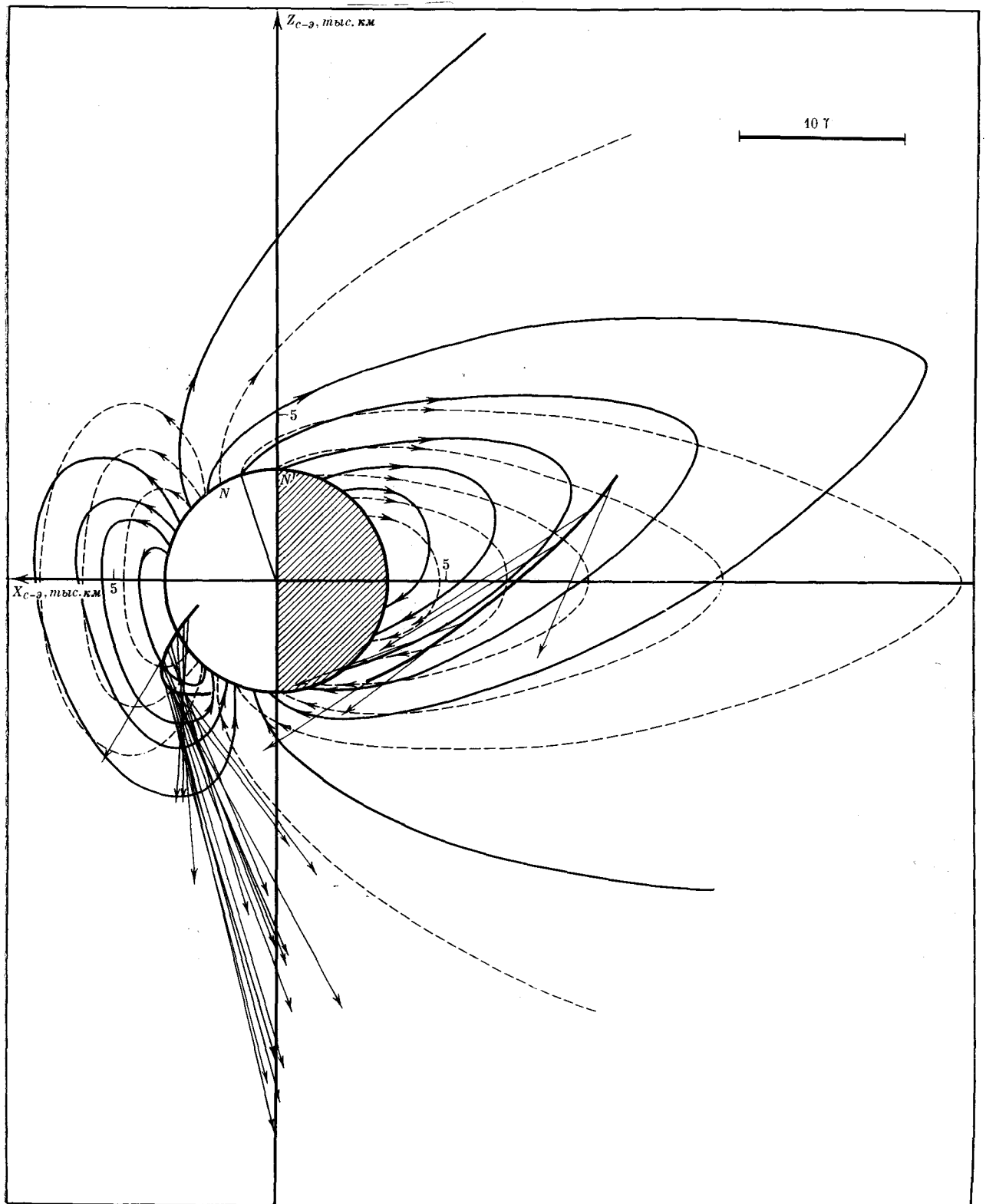
6. В то время как с дневной стороны («Марс-3») магнитосферное поле уже не обнаруживалось на высоте 2200 км [1, 2], на ночной стороне («Марс-5») регулярное поле области 2—3 прослеживается до высот 7500—9500 км от поверхности планеты.

7. Изложенное в пунктах 3—6 однозначно указывает, что планета Марс обладает собственным магнитным полем. Под действием солнечного ветра это поле приобретает характерную форму. Оно ограничено с дневной стороны и вытянуто на ночную сторону. Топология поля во внешнем обследованном пространстве определяется действием совокупности внутренних и внешних источников поля.

8. Топология силовых линий на дневной стороне на высоте 1100 км («Марс-3») и на высотах 2500—9000 км на ночной стороне наилучшим образом объясняется, если принять, что ось магнитного диполя Марса наклонена к оси вращения на угол $15-20^\circ$. Северный магнитный полюс диполя расположен в северном полушарии, т. е. поле Марса обратно по полярности геомагнитному полю.

Магнитное поле Марса, определенное по данным плазменных измерений на советских искусственных спутниках Марса. На космических аппаратах «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5», выведенных на орбиты искусственных спутников Марса 27.11, 2.12 74 г., 12.02 74 г. соответственно, при помощи идентичных электронных ловушек измерялись характеристики электронной компоненты, а на «Марсе-5» при помощи ионной ловушки — также и ионной компоненты плазмы солнечного ветра [25]. Во время каждого из оборотов указанных спутников вокруг планеты Марс регистрировалась отошедшая ударная волна, существование которой было впервые предположено после однократного пролета американского аппарата «Маринер-4» вблизи Марса [30].

На рис. 10, а и 10, б показаны ионные спектры и электронные вольт-амперные характеристики соответственно для солнечного ветра и переходной области за фронтом отошедшей ударной волны, зарегистрированные на «Марсе-5». Видно, что как ионы, так и электроны за фронтом ударной волны термализуются и их концентрация повышается. Характерные изменения спектров и послужили критерием определения фронта ударной волны.



Положение фронта ударной волны зависит от размеров и формы препятствия, останавливающего солнечный ветер. Поэтому экспериментальное определение положения фронта ударной волны вблизи планеты позволяет оценить размеры препятствия и в какой-то степени составить представление о его природе.

На рис. 11 показаны участки орбит аппаратов «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5», на которых они пересекали фронт ударной волны. Характеристики плазмы, полученные в ближайших к планете точках, изображенных на рис. 11 участков орбит, характерны для переходной области за фронтом (см. рис. 10, б), а в наиболее удаленных точках этих участков — для невозмущенного планетой солнечного ветра (см. ←

Р и с. 9. Проекция вектора поля на плоскость, перпендикулярную эклиптике для спутников «Марс-3» и «Марс-5»

Р и с. 10

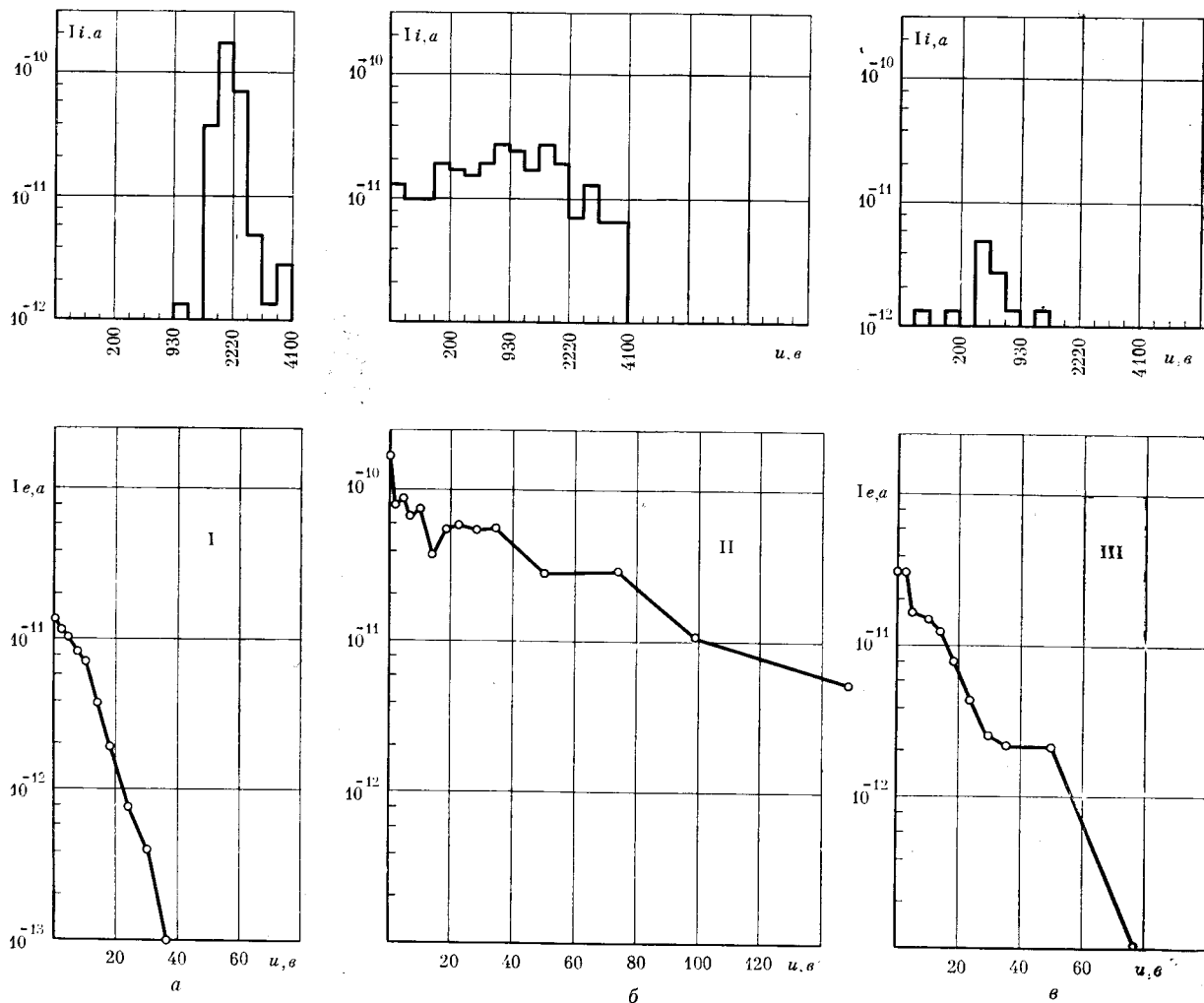


рис. 10, а). Длина изображенных участков орбит зависит от режима работы прибора (2-, 10-, 20-минутный) и от скорости движения спутников на орбите. Оценки размеров препятствия производились в соответствии с расчетами положения фронта ударной волны, сделанными в предположении, что препятствие имеет форму вытянутого тела вращения, подобную земной магнитосфере [36]. Сплошной линией на рис. 11 показаны форма и размеры препятствия, а пунктирной — положение фронта ударной волны для числа Маха $M_\infty = 8$ и $\gamma = 5/3$, рассчитанного в соответствии с расчетами Спрайтера и Алкена [34]. Размеры препятствия выбраны таким образом, чтобы сумма квадратов расстояний от обоих концов, изображенных на рис. 11 участков траекторий до фронта ударной волны, образованной этим препятствием, была минимальной [26].

Ареоцентрическое расстояние до лобовой точки препятствия составляет $(4,6 \pm 0,8) \cdot 10^3$ км, а до лобовой точки фронта ударной волны $(5,7 \pm 1) \cdot 10^3$ км соответственно $(1,2 \pm 0,8) \cdot 10^3$ км и $(2,3 \pm 1) \cdot 10^3$ км от поверхности Марса. Полученная относительная дисперсия в ареоцентрических расстояниях до препятствия и фронта ударной волны ($\sim 17\%$) у Марса соответствует характерным относительным величинам изменений геоцентрических расстояний до лобовой точки фронта отошедшей ударной волны и магнитосферы Земли ($\sim 20\%$), например, вследствие изменений динамического давления солнечного ветра [31]. Большая же относительная дисперсия высоты препятствия и фронта ударной волны над поверхностью Марса связана с тем, что у Марса размеры препятствия, выраженные в радиусах планеты, почти на порядок меньше, чем у Земли.

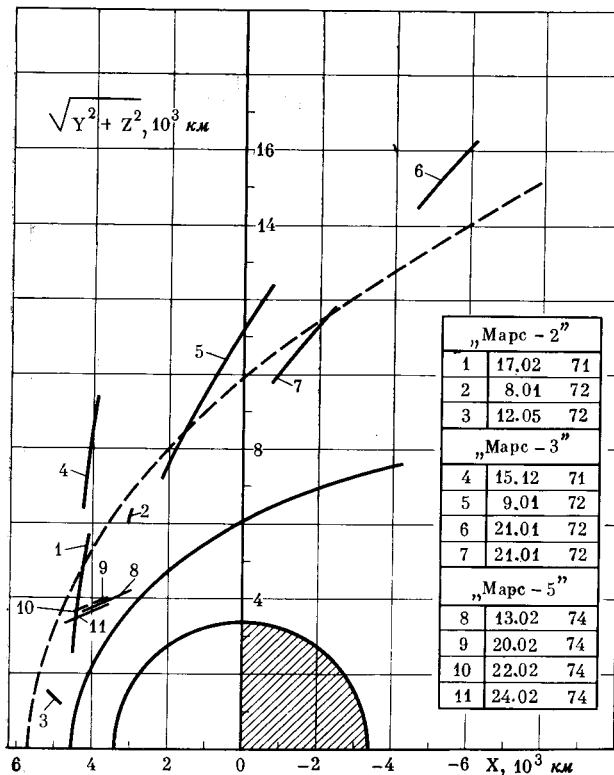
По данным «Марса-2» и «Марса-3» минимальная высота препятствия была оценена по пересечению фронта ударной волны аппаратом «Марс-2» 12.05 72 г. (см. рис. 11) и равнялась ~ 600 км. По данным «Марса-5» за минимальную оценку высоты препятствия следует, по-види-

мому, принять ~ 500 км, оценку, сделанную по пересечению аппаратом фронта в сеансе с двухминутным интервалом между измерениями 20.02 74 г. Следует отметить, что в сеансе 13.02 74 г. с десятиминутным интервалом между измерениями оценка высоты препятствия по ближайшему к планете концу участка траектории, показанного на рис. 11, дает меньшие, а по удаленному концу — большие, чем в сеансе 20.02 74 г., значения высоты препятствия. Однако поскольку динамическое давление солнечного ветра в этом десятиминутном сеансе (определенное по данным ионной ловушки, полученным перед пересечением фронта ударной волны) было меньшим, чем в двухминутном сеансе 20.02 74 г., то фронт ударной волны 13.02 74 г., по-видимому, пересекался аппаратом «Марс-5» не ближе к планете, чем 20.02 74 г. Подтверждением влияния изменения динамического давления солнечного ветра на положение фронта ударной волны может служить сравнение сеансов измерений 20.02 и 22.02 74 г. За время, прошедшее между этими сеансами, давление солнечного ветра уменьшилось; соответственно и граница препятствия поднялась до высоты ~ 900 км.

Полученная по нашим данным величина препятствия, даже при его минимальном размере ~ 500 км, не согласуется с представлением о том, что солнечный ветер останавливается ионосферой Марса [34]. Как следует из экспериментальных данных о высотном распределении электронной концентрации в ионосфере Марса, полученных радиозатменными методами [28, 32], максимум ионосферной ионизации расположен на Марсе на высоте ~ 140 км и уже на высоте $\sim 300-350$ км давление марсианской ионосферы примерно на два порядка меньше динамического давления солнечного ветра.

О. Л. Вайсберг и А. В. Богданов [24] считают, что между ионосферой Марса, ограниченной ионопаузой, и переходным слоем за фронтом ударной волны находится «ионная подушка» (на дневной стороне) и «пограничный слой» (на ночной стороне), которые служат препятствием, создающим ударную волну. Этот пограничный слой, согласно О. Л. Вайсбергу и А. В. Богданову [24], образуется в результате вязкого взаимодействия набегающего потока (т. е., очевидно, потока в переходном слое за фронтом ударной волны) с частицами, диссипирующими из ионосферы Марса. Очевидно, что давление диссипирующих из ионосферы частиц меньше, чем давление внутри ионосферы или на ионопаузе. Количественных оценок,

Рис. 11



поясняющих, каким образом реализуется баланс давлений на границе препятствия, в работе О. Л. Вайсберга и А. В. Богданова не содержится.

Результаты наблюдений можно, однако, объяснить, если препятствием является магнитосфера Марса. Преположив, что основной вклад в величину собственного магнитного поля Марса дает его дипольный член, можно оценить величину магнитного момента Марса по следующей формуле [35]:

$$M_M = D^3 \sqrt{2\pi k \rho_\infty V_\infty^2},$$

где $k = 0,88$, ρ_∞ и V_∞ — плотность и скорость солнечного ветра, D — ареоцентрическое расстояние до лобовой точки магнитосферы. Для $D = 4,6 \cdot 10^3$ км (размеры препятствия, оцененные выше), концентрации протонов $\rho_\infty \sim 3 \text{ см}^{-3}$ и $V_\infty \sim 400 \text{ км/сек}$ величина магнитного момента Марса $M_M \approx 2 \cdot 10^{22} \text{ гс} \cdot \text{см}^3$.

Магнитные измерения, проведенные на спутниках «Марс-2» и «Марс-3» Ш. Ш. Долгиновым и др. [1], привели авторов этих измерений к выводу, что у Марса может существовать собственное магнитное поле, причем наши оценки величины магнитного момента не противоречат оценкам M_M , сделанным Ш. Ш. Долгиновым и др. [1] по магнитным измерениям.

Свидетельством в пользу существования марсианской магнитосферы могут служить характерные вариации плазмы и магнитного поля при вхождении аппаратов в препятствие. На аппаратах «Марс-2» и «Марс-3» при пересечении границы препятствия одновременно с падением потоков электронов наблюдался рост модуля магнитного поля. Такое поведение плазмы и магнитного поля характерно для магнитосферы Земли и нехарактерно для Венеры, по-видимому, не имеющей собственного магнитного поля (потоки плазмы и магнитное поле при приближении аппарата «Венера-4» к ее поверхности изменялись синхронно [5]).

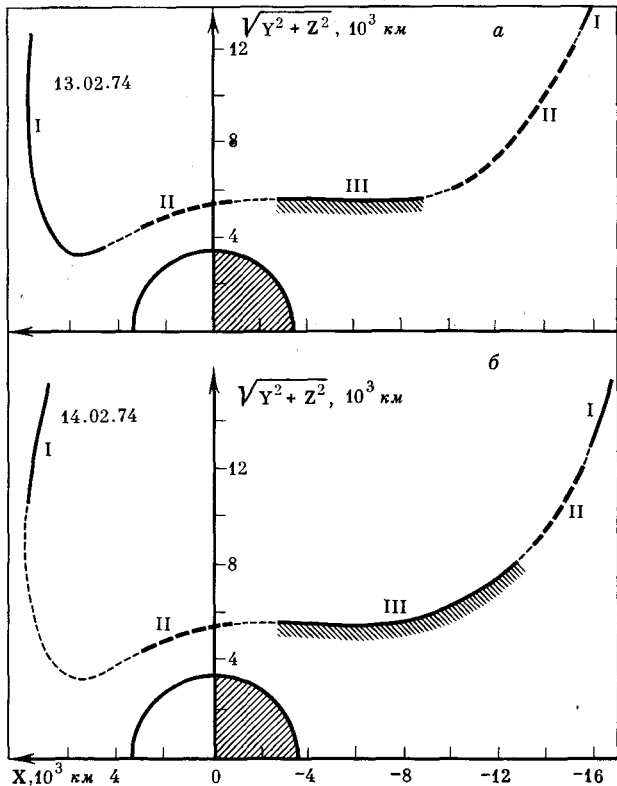
Рассмотрим изменения характеристик плазмы при вхождении в препятствие аппарата «Марс-5». На рис. 12 в координатах $X, \sqrt{Y^2 + Z^2}$ приведены участки траекторий «Марс-5» вблизи планеты во время двух последовательных оборотов спутника вокруг планеты (13.02 и 14.02 74 г.). Римскими цифрами и различными условными знаками показаны три пересекаемые аппаратом характерные зоны, типичные спектры для которых представлены на рис. 10. Первые две зоны соответствуют солнечному ветру (см. рис. 10, а) и пере-

ходному слою (см. рис. 10, б). Зона III (см. рис. 10, в) соответствует вхождению «Марс-5» в препятствие. Для зоны III характерны резкое падение ионных токов по сравнению с зонами I и II и уменьшение по сравнению с зоной II потоков электронов и их температуры. Однако токи электронов и их температура в зоне III выше, чем в невозмущенном ветре — в зоне I.

Одновременные магнитные измерения на «Марсе-5» [27] также показали наличие трех зон с отличающимися друг от друга характеристиками, причем границы зон по данным наших и магнитных измерений совпадают. По магнитным данным в зоне III отсутствовали сильные флуктуации магнитного поля, характерные для зоны II, и преобладала компонента магнитного поля, направленная вдоль линии Солнце — Марс.

Таким образом, вариации плазмы и магнитного поля, зарегистрированные на «Марсе-5», также свидетельствовали о том, что препятствие у Марса типа магнитосферы, причем на аппарате «Марс-5» из-за особенностей его орбиты регистрировался, по-видимому, хвост марсианской магнитосферы.

Р и с. 12



Обнаруженная плазменная зона III, граничащая с переходным слоем за фронтом ударной волны, может быть подобна либо пограничному слою в хвосте земной магнитосферы [29], либо ее плазменному слою. Сравнение электронных и ионных спектров свидетельствует о том, что в этой зоне, по-видимому, велика изотропность ионов. Это позволяет считать зону III скорее плазменным слоем в магнитосфере Марса, чем ее пограничным слоем. В последнем, как известно из околоземных наблюдений, сохраняется существенная антисолнечная компонента направленной скорости ионов. Следует, разумеется, иметь в виду возможность того, что земные аналоги вообще малоприменимы к физическим явлениям, наблюдавшимся у Марса в описываемых экспериментах, из-за существенного различия в относительной роли внутреннего и внешних источников марсианского магнитного поля.

Литература

1. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Докл. АН СССР, 1972, 207, № 6.
2. Sh. Sh. Dolginov, Ye. G. Yeroshenko, L. N. Zhuzgov. I. Geophys. Res., 1973, 78, N 22.
3. A. J. Dessler. The Atmosphere of Venus and Mars. New York, 1968.
4. F. S. Johnson, J. E. Midgley. Space Res., 1969, 9, p. 760.
5. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Космич. исслед., 1968, 6, № 4.
6. H. S. Bridge, A. J. Lazarus, C. W. Snyder, E. J. Smith, L. Davis, P. J. Coleman, D. E. Jones. Science, 1967, 158, p. 1669.
7. T. J. Obayashy. I. Geophys. Res., 1964, 69, p. 864.
8. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, Г. И. Волков, Т. К. Бреус, Л. С. Мусатов, Л. П. Навкин, Г. Ф. Слутченков. J. Geophys. Res., 1973, 78, p. 5808.
9. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов, А. Ф. Бородин, А. В. Дьячков, А. А. Зерцалов, И. П. Карпинский, С. П. Кондаков, З. Н. Мамотко, Б. В. Поленов, С. А. Романов, В. Н. Смирнов, Б. Н. Хазанов, Косм. исслед., 1973, 11, № 5.
10. A. V. Bogdanov, O. L. Vaisberg. J. Geophys. Res., 1974, 79.
11. О. Л. Вайсберг. Земля и вселенная, 1973, № 2.
12. S. Bauer, R. E. Harle. J. Geophys. Res., 1973, 78, p. 16.
13. M. E. Rossbach, R. A. Wolf, R. E. Daniell. Preprint NASA, Texas, 1974.
14. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов, В. А. Шарова. Докл. АН СССР, 1974, 218, № 4.
15. S. M. Mansurov, L. G. Mansurova. Ann. Geophys., 1970, 26, p. 397.
16. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин, А. И. Ремизов. Докл. АН СССР, 1974, 218, № 4.
17. К. И. Грингауз, В. В. Безруких, М. И. Веригин, А. И. Ремизов. Косм. исслед., 1975, 13, № 1.
18. E. J. Smith, L. J. Davis, D. E. Jones. Science, 1965, 149.
19. M. Dryer, G. R. Heckman. Solar Phys., 1967, 2, N 1.
20. J. S. Spreiter, A. W. Rizzi. Planet. Space Sci., 1972, 20, N 2.
21. P. A. Cloutier, M. B. McElroy, F. C. Michel. J. Geophys. Res., 1969, 74, N 26.
22. P. A. Cloutier, R. E. Daniell. Planet. Space Sci., 1973, 21, N 3.
23. J. V. Choe, D. B. Beard, E. C. Sullivan. Planet. Space Sci., 1973, 21, p. 485.
24. О. Л. Вайсберг, А. В. Богданов. Косм. исслед., 1974, 12, с. 296.
25. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Косм. исслед., 1974, 12, 430.
26. К. И. Грингауз, В. В. Безруких и др. Косм. исслед., 1975, 13, № 1.
27. Ш. Ш. Долгинов, Е. Г. Ерошенко, Л. Н. Жузгов. Наст. сб., 1975, 13, № 1.
28. М. А. Колосов, Н. А. Савич и др. Радиотехн. и электрон., 1973, 18, с. 2009.
29. S. I. Akasofu, E. W. Hones, Jr. et al. J. Geophys. Res., 1973, 78, p. 7257.
30. M. Dryer, G. R. Heckman. Solar Phys., 1967, 2, p. 112.
31. W. N. Hess. The radiation belt and magnetosphere (Русский перевод: «Радиационный пояс и магнитосфера». Атомиздат, 1972, стр. 216).
32. A. J. Kliore, D. L. Cain et al. Science, 1965, 149, p. 1234.
33. A. J. Kliore, G. Fjeldbo et al. Science, 1972, 175, p. 313.
34. J. R. Spreiter, A. Y. Alksne. Rev. Geophys., 1969, 7, p. 11.
35. J. R. Spreiter, A. W. Rizzi. Planet. Sp. Sci., 1972, 20, p. 205.

Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн, Москва

Институт космических исследований АН СССР, Москва