

УДК 523.43

СМЕНА СОСТАВА ПЛАЗМЫ НА ПОВОРОТЕ МАГНИТОПАУЗЫ МАРСА

© 2024 г. О. Л. Вайсберг^{a,*}, А. Ю. Шестаков^a, Р. Н. Журавлев^a,
Д. Н. Морозова^{a,**}, А. Рамазан^b

^a Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт, Москва, Россия

e-mail: *olegv@iki.rssu.ru; **dashia110999@mail.ru

Поступила в редакцию 28.07.2023 г.

После доработки 12.01.2024 г.

Принята к публикации 02.02.2024 г.

Высокое временное разрешение измерений магнитного поля и плазмы Марса обеспечиваются наблюдениями на спутнике Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN; Jakosky и др., 2015), позволяют анализировать тонкие слои плазменной оболочки Марса. В этой статье описана магнитная структура, связанная с дневной марсианской магнитопаузой. Было показано, что прошедший через ударную волну солнечный ветер на дневной стороне Марса напрямую не взаимодействует с ионосферой Марса. Слой плазмы и магнитного поля толщиной 200–300 км образует дневную магнитосферу, которая является областью между магнитослоем и ионосферой (Вайсберг, Шувалов, 2020). Дневная магнитосфера бывает двух типов: 1) магнитосфера более распространенного типа состоит из нагретых и ускоренных ионов O^+ и O_2^+ , находящихся между ионосферой и обтекающим горячим потоком Марса; 2) другой тип дневной магнитосферы состоит из ускоренных ионов O^+ и O_2^+ в магнитослое, где они образуют продолжающийся ускоренный пучок, формирующий плюм. Между магнитослоем и магнитосферой находится магнитная структура, которая вращается, почти не меняя своей величины. Эта структура расположена во второй части перехода $np/(np + nh)$ от величины ~ 1 до $\sim 10^{-2}$. Переход между магнитослоем и магнитосферой происходит плавно, как по плотности энергии, так и по составу ионов при уменьшении потока протонов и увеличении потока тяжелых ионов

Ключевые слова: Марс, магнитослой, магнитопауза, магнитосфера, аттрактор

DOI: 10.31857/S0320930X24040063, EDN: LUBDRB

ВВЕДЕНИЕ

Дневная магнитосфера Марса имеет два типа (Vaisberg, Shuvalov, 2022): 1) магнитосфера более распространенного типа состоит из нагретых и ускоренных ионов O^+ и O_2^+ собственно в магнитосфере; 2) второй тип магнитосферы состоит из ускоренных ионов O^+ и O_2^+ в магнитослое, которые, очевидно, являются продолжением внутреннего пучка частиц в магнитосфере. Этот слой ускоренной плазмы на широком участке магнитослоя с ускорением является плюмом (Liemohn и др., 2014; Dong и др., 2015).

В области между магнитослоем и магнитосферой находится область со сменой основного обтекающего межпланетного потока к планетарному составу Марса. Эта область является магнитной прослойкой, в которой происходит поворот магнитного поля от магнитослоя к магнитосфере с почти неизменной величиной напряженности. Этот поворот происходит плавно, как по плотности энергии, так и по изменению состава ионов. В то же время поток протонов уменьшается, а поток тяжелых ионов увеличивается. Эта область приближенно находится в интервале 23:36 – 23:37 UT на рис. 1.

Магнитосфера Марса была впервые исследована в 1960-х годах с помощью орбитальных аппаратов Марс-2, Марс-3 и Марс-5 (Vaisberg и др., 1976). Были обнаружены головная ударная волна, слой низкоэнергетической плазмы на дневной стороне (“плазменная подушка” — название предложено в разговоре Вайсберга с Norman Ness на Советско-американском совещании в 1975 г.) и протяженный магнитоплазменный хвост тяжелых ионов.

Позже КА Фобос-2 и MEX (Mars Express, ESA) внесли значительный вклад в исследование Марса, а в настоящее время КА MAVEN дает возможность исследовать детали марсианской магнитосферы.

Идентификация магнитопаузы была темой многих исследований. Espley (2018) рассмотрел разные определения магнитопаузы, основанные на отдельных явлениях. Его вывод состоял в том, что научное сообщество поймет физику явления, если оно усовершенствует нашу терминологию до максимальной точности.

Анализируя пограничный слой, который демонстрирует быстрое движение, Brandt и Briggs (1988) предложили метод решения этой конкретной проблемы нерегулярных данных. Этот метод позволяет определить структуру пограничных явлений без влияния больших флуктуаций данных. Их метод основан на заметной корреляции между плотностью и средней энергией электронов, о которой сообщили Hall и др. (1985) в исследовании с использованием 1-минутных данных с космического аппарата AMPTE-UKS. Эта корреляция позволила Brandt и Briggs в 1988 г. определить “параметр перехода”, который затем был использован для определения местоположения перехода из магнитопаузы. Полученный метод также применялся для измерения электронной плотности, величины и направления магнитного поля, и энергетических спектров ионов (Hapgood, Bryant, 1990).

Brandt и Briggs использовали этот метод для определения границы между флуктуациями солнечного ветра и магнитопаузой. Они заметили, что всегда существуют два различных участка электронов с антикорреляцией между температурой и плотностью, т.е. участок с большой плотностью имеет низкую температуру, и участок с малой плотностью имеет высокую температуру. Простейшая интерпретация этой антикорреляции состоит в том, что в большинстве случаев происходит плавное изменение состояния плазмы между граничащими солнечной и земной плазмой. Альтернативной интерпретацией были

нити плазмы магнитослоя, проникающие в пограничный слой.

Наблюдение области между магнитослоем и магнитосферой в магнитопаузе (Vaisberg и др., 2017) показало, что магнитное поле при переходе от магнитослоя к дневной магнитосфере имеет повторяющуюся магнитную структуру.

Chen и др. (2022) проанализировали границу индуцированной магнитосферы Марса на дневной стороне и выбрали две стороны границы, совпадающие с ранее определенной границей индуцированной магнитосферы (Induced Magnetosphere). Результаты показали, что взаимодействие между Марсом и солнечным ветром могло вызвать сильные токи в ИМВ, которые имеют антипараллельные направления тока и разделены границей раздела, на которой происходит изменение ионного состава.

Ma и др. (2022) исследовали разрывы вращения в магнитопаузе открытой магнитосферы. Они обнаружили, что внутренние магнитные структуры вращательных разрывов тесно связаны с процессами пересоединения.

Два вопроса, которые рассматриваются в данной работе для предлагаемого анализа дневной стороны магнитопаузы Марса, это

- вращение магнитного поля, сохраняющего приблизительно одинаковую величину;
- плавная замена ионных компонентов.

Эти два процесса, которые изменяют критически важные составы и кинетические характеристики, практически совпадают по времени и свидетельствуют о наименее мелкомасштабных явлениях: пересечении границы между горячим солнечным ветром и горячей и/или ускоренной плазменной средой.

В работе рассматриваются два основных типа взаимодействия магнитослоя с дневной магнитосферой Марса, отличающихся направлением электрического поля: в направлении его на дневную магнитосферу (1-й тип) и в направлении от магнитосферы (2-й тип). При этом различные структуры играют одну и ту же роль: формируют магнитопаузу между обтекающим слоем и ионосферой.

ПЕРВЫЙ ТИП ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА

На рис. 1 приведен обзор данных от значительного интервала обтекающего слоя магнитослоя до магнитослоя с временным разрешением данных 4 с. Выбранный временной интервал находился в северном полушарии Марса, чтобы

избежать влияния значительных местных магнитных аномалий. Для анализа показан случай взаимодействия солнечного ветра с дневной стороны с магнитосферой Марса. Выделенный интервал и выбранные данные играют важную роль для первичного анализа исследуемого явления при дальнейшем рассмотрении.

Указанное справа отношение $n_p/(n_p+n_h)$ – приблизительное отношение концентрации протонов к концентрации всех ионов. Красная цветовая полоска внизу показывает, что спутник находится в северном полушарии. Вертикальные черные полосы приближенно показывают существенные

изменения магнитного поля и плазмы магнитосферы и будут рассмотрены позже.

Пересечение магнитопаузы примерно произошло в ~23:36:30 UT по восточному времени. Космический аппарат вошел в магнитосферу в SZA (солнечно-зенитный угол) 68° с часовым углом пояса $\sim 210^\circ$. В рассматриваемом случае с магнитосферой 1-го типа, когда электрическое поле в обтекающем Марс потоке направлено от Солнца, основные ионы O^+ и O_2^+ практически не наблюдаются вне магнитосферы, кроме немногих ионов, видимых в прилегаемом обтекающем потоке.

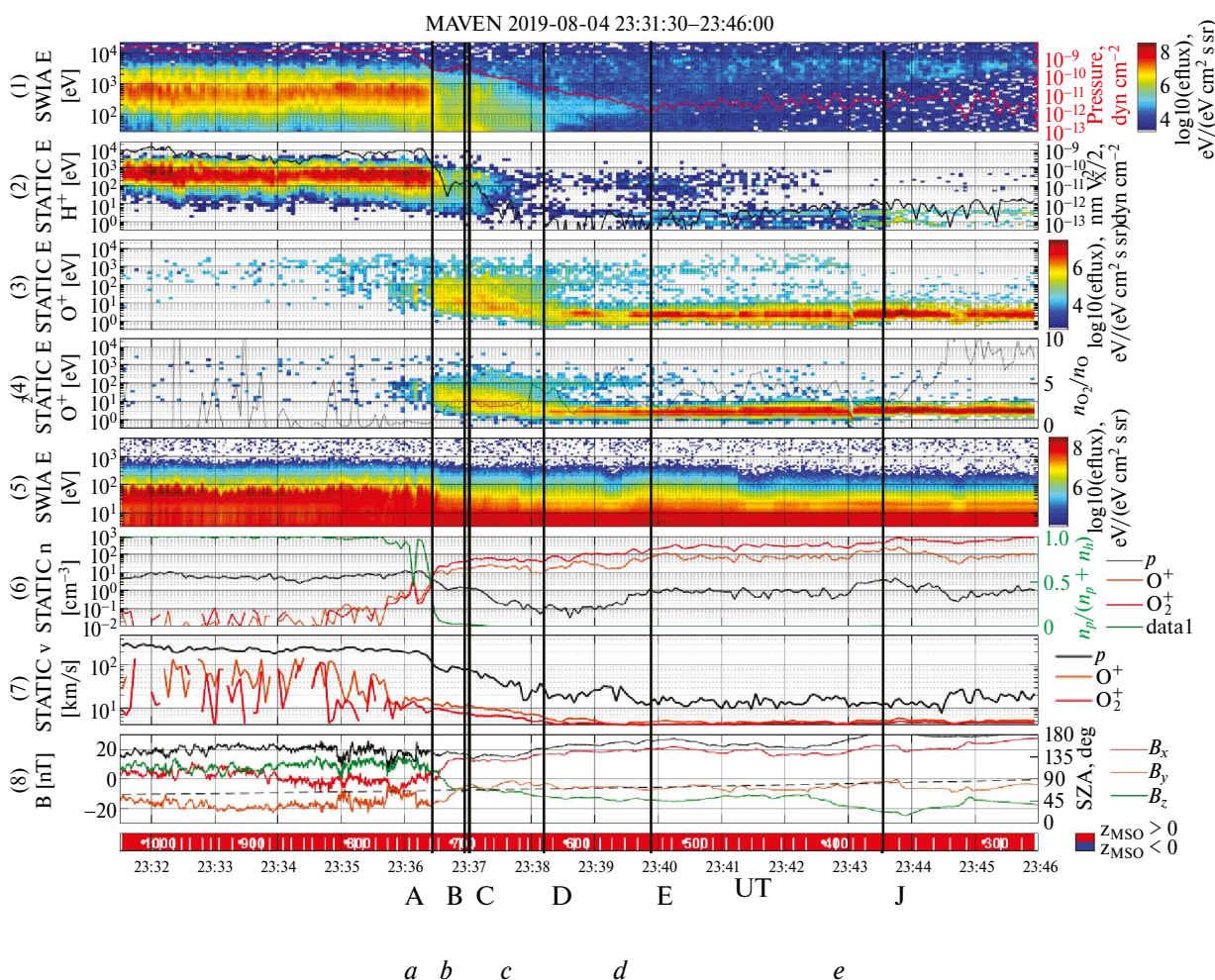


Рис. 1. Приборы MAVEN, данные которых использованы для исследования Марса в данной работе, включают в себя спектроны ионов и электронов и магнетометр. Данные MAVEN включают магнитослой, магнитопаузу, магнитосферу и ионосферу 17 августа 2019 г. в ~23:32 – 23:45 по восточному времени. Панели сверху вниз: 1 – поток всех ионов; 2 – поток протонов H^+ ; 3 – поток кислорода O^+ ; 4 – поток кислорода O_2^+ ; 5 – поток электронов; 6 – цветные линии плотности ионов (пояснение в прямоугольнике справа) и относительная плотность ионов и протонов (линии зеленого цвета); 7 – скорости трех ионов (пояснение в прямоугольнике справа); 8 – компоненты магнитного поля в системе координат Солнечной орбиты, ориентированной на Марс (MSO), пояснения цвета указаны справа, и величина магнитного поля (черная линия).

Основные детали взаимодействия обтекающего потока с препятствием разогретого солнечного ветра указаны слева направо.

В первой панели горячий поток солнечного ветра после его вертикальной черной полосы “a” начинает быстро уменьшаться и исчезает у вертикальной полосы “d”.

Во второй панели основное количество ионов H^+ останавливаются раньше, чем ионы в первой панели.

Начиная с интервала, отмеченного вертикальной полосой “a”, в панелях 3 и 4 преобладают тяжелые ионы O^+ и O_2^+ .

Температура электронов (панель 5) уменьшается примерно на порядок величины.

В интервале 6 и между полосами “a” и “b” происходит уменьшение концентрации ионов водорода и возрастание концентрации тяжелых ионов, что также показано в относительных величинах легких и тяжелых ионов (справа от интервала 6). Между полосами a, b, c и e видно ступенчатое увеличение концентраций ионов O^+ и O_2^+ с переходом на изменение отношения O_2^+/O^+ , указывающего на вход спутника в ионосферу.

В интервале 7 между полосами “a” и “c” происходит уменьшение скорости всех ионов.

Обращает на себя внимание вращение магнитного поля в интервале между полосами “a” и “b”.

На рис. 2 показан результат минимального анализа магнитного поля (Sönnnerup, Scheible, 1998) с целью определения характеристики данного явления, когда оси определяются по трем основным ортогональным осям.

Рассмотрение поведения магнитного поля показывает наличие специфического интервала, в котором происходит быстрое его изменение. Минимальный анализ показал магнитное поле в двух измерениях, L и N:

- происходит вращение магнитного поля;
- величина магнитного поля при вращении изменяется незначительно.

На рис. 2(б) видно, что границы этого участка выделяются сравнительно четко.

На рис. 3 показано быстрое вращение магнитного поля приблизительно вдоль азимутального угла — 90° на полярный угол $\sim 60^\circ$. Эта часть магнитопаузы окружена двумя медленными интервалами магнитных полей: линейным “a” и вращательным “b”.

Время вращения магнитного поля составляет от $\sim 23:36:32$ UT до $\sim 23:36:56$ UT, или ~ 35 с. За этот промежуток времени космический аппарат снизился с 720 до 690 км.

Наличие специфического раздела структуры магнитного поля в области магнитопаузы, характеризующегося поворотом без заметного изменения величины, и сравнительно

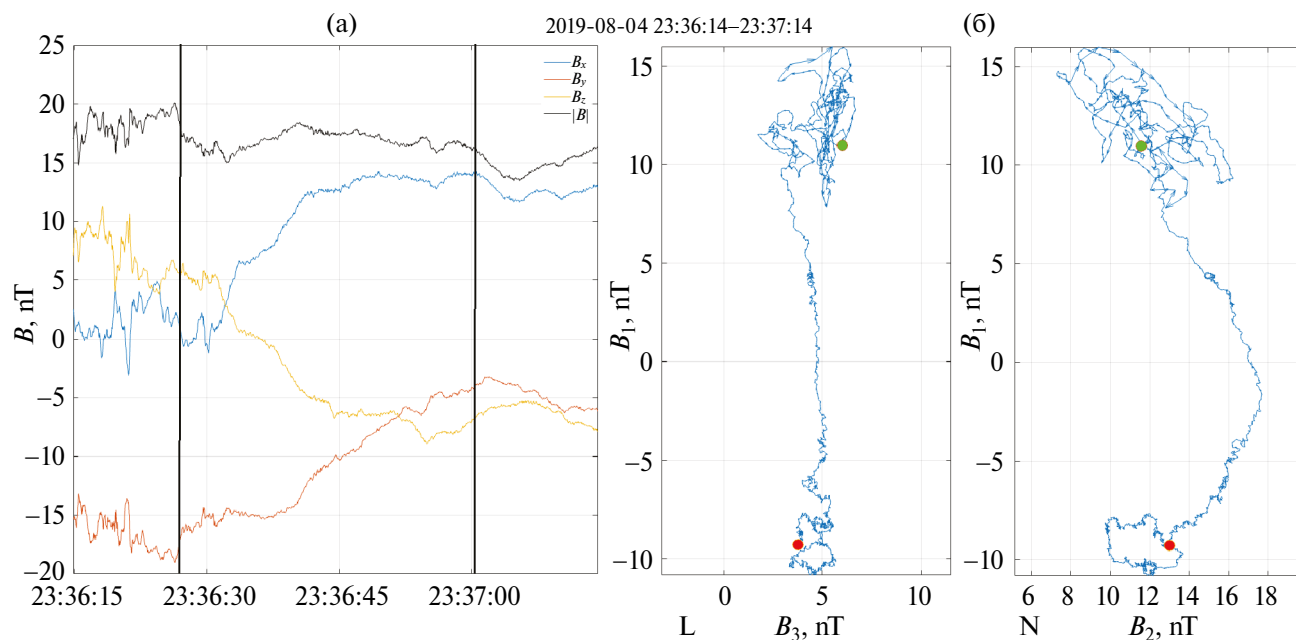


Рис. 2. Результат минимального анализа магнитного поля: (а) — область вращения магнитного поля, вертикальные линии выделяют интервал поворотного магнитного поля. (б) — компоненты собственных значений минимального анализа L и N, где L и N — разные проекции в системе координат магнитного поля (B_1 , B_2 , B_3).

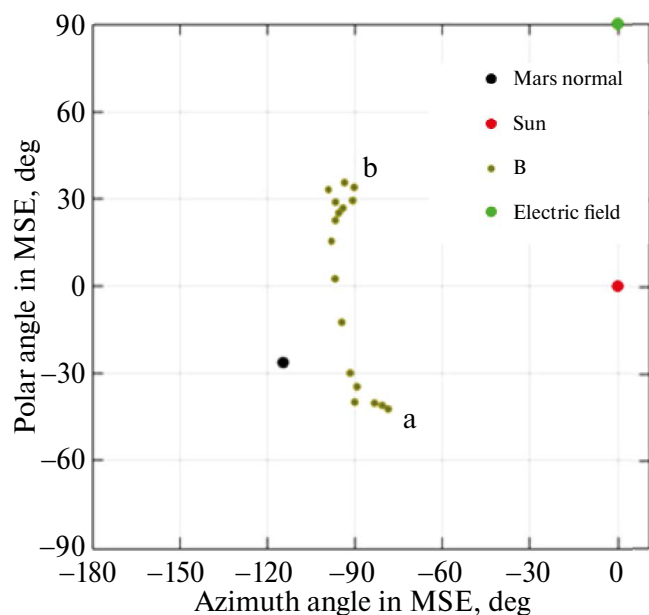


Рис. 3. На Меркаторской карте показаны три интервала: медленное движение в области точки “а”, быстрое вращение между точками “а” и “б”, и медленное перемещение у точки “б”, Общий угол составляет немного более 60° .

большого поворота магнитного поля связано со сменой плазмы одного ионного состава на другой.

На рис. 4 показан дифференциальный поток энергии протонов и O^+ в коротком секторе магнитопаузы. Дифференциальный поток энергии протонов плавно уменьшается, а дифференциальный поток энергии O^+ плавно увеличивается в течение ~ 24 с. Видно плавное уменьшение потока энергии ионов H^+ и плавное увеличение энергии ионов O^+ в течение этого промежутка времени. Поскольку на внешних концах основного отрезка находятся флуктуации направлений магнитного поля, в оценке его длины есть некоторые расхождения оценок длины быстрого поворота магнитного поля на рис. 2 и 3. Небольшое расхождение не играет большой роли.

Наиболее интересными являются практически монотонные изменения концентрации протонов при уменьшении высоты спутника над Марсом и соответственное увеличение количества ионов кислорода.

Рис. 3 и 4 показывают, что на коротком интервале происходят следующие изменения:

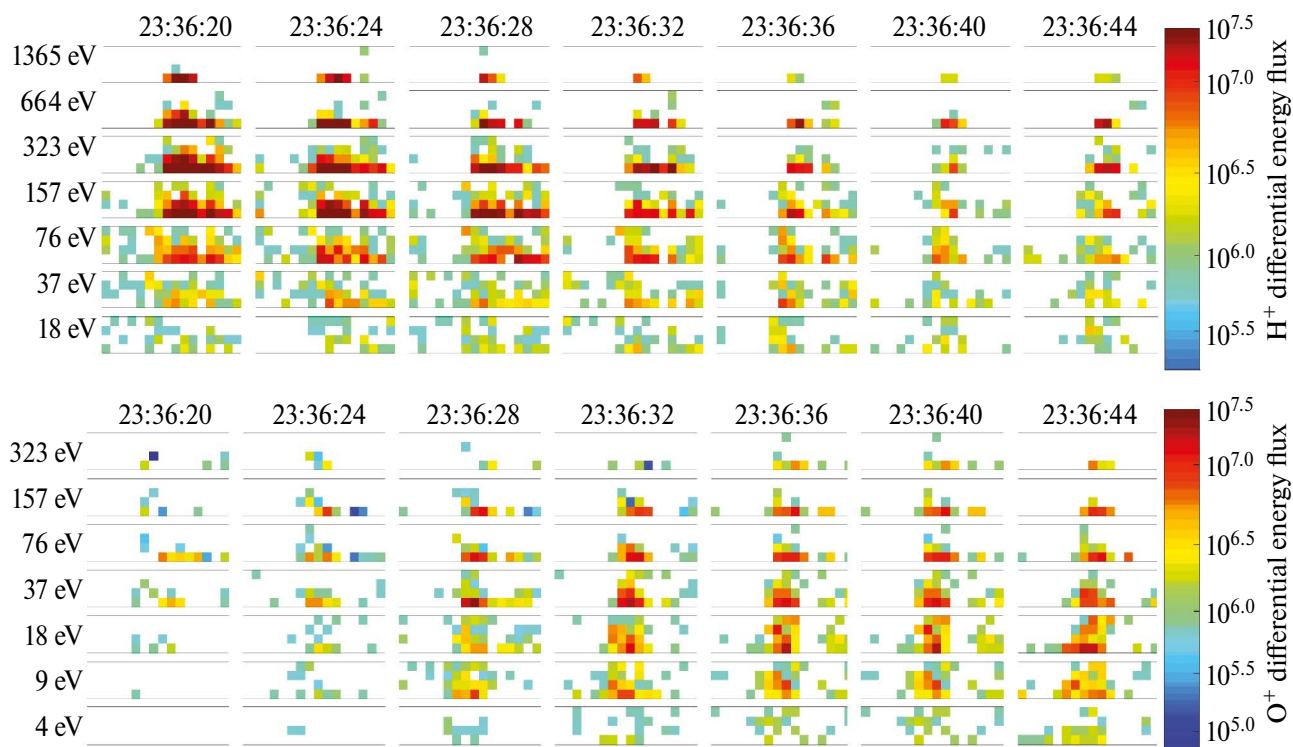


Рис. 4. Верхний участок показывает уменьшение дифференциального потока H^+ , т.е. протонов солнечного ветра, а дифференциальный поток энергии ионов O^+ показывает увеличение потока энергии ионов в том же секторе. Величина интервала от $\sim 23:36:0$ UT до $23:36:44$ UT.

– быстрое изменение ориентации магнита на $\sim 60^\circ$ от направления в магнитослой на направление в магнитосфере;

– сравнительно не большое изменение модуля магнитного поля;

– гладкое уменьшение концентрации p ;

– гладкое увеличение концентрации O^+ .

Другой пример магнитосферы 1-го типа показан на рис. 5. Показан участок магнитослоя и дневной магнитосферы. Панели расположены в той же последовательности, что и на рис. 1.

Космический аппарат находился в MSE (Mars-Solar-Electric) и на SZA 78° с часовым углом $\sim -0.15^\circ$.

Так же, как в случае рис. 1, спутник находится в области, где электрическое поле направлено в сторону Марса. Космический аппарат находился в MSE и на SZA 78° с часовым углом $\sim 180^\circ$.

В данном случае предварительными данными, указывающими местоположение магнитопаузы, являются смена состава плазмы и скачок электронной температуры.

Две вертикальные линии на расстоянии ~ 730 км и 690 км указывают на ту часть магнитного слоя, где он вращается с почти неизменной магнитудой (рис. 6).

В отличие от первого случая, показанного на рис. 1, здесь наблюдаются значительные магнитные флуктуации; однако общая форма рассматриваемого магнитного профиля аналогична первому случаю.

На рис. 7 мы видим магнитную конфигурацию, весьма похожую на ту, что была на рис. 3: быстрое направление вращения магнитного поля является промежуточным звеном от магнитослоя к магнитосфере.

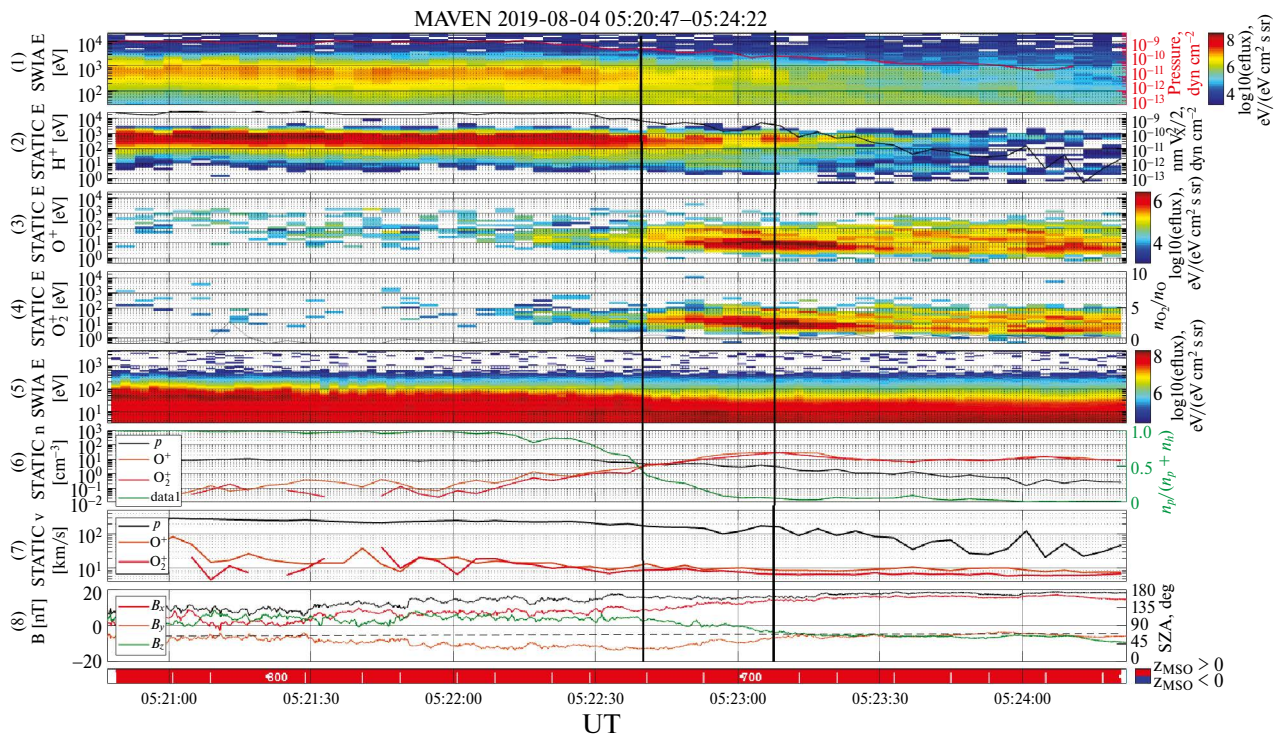


Рис. 5. 4 августа 2019 г., в 05:20:47 – 05:24:22 по восточному времени. Данные MAVEN включают магнитослой, магнитопаузу, магнитосферу и ионосферу. Панели сверху вниз: 1 – дифференциальная энергия-время суммы всех ионов; 2 – дифференциальная энергия-время протонов H^+ ; 3 – дифференциальная энергия-время кислорода O^+ ; 4 – энергия-время кислорода O_2^+ ; 5 – дифференциальная энергия-время энергии электронов; 6 – цветные линии плотности ионов (в прямоугольнике справа) и а относительная плотность ионов и протонов (линии зеленого цвета); 7 – скорости трех ионов (пояснение в прямоугольнике справа); 8 – компоненты магнитного поля в системе координат Солнечной орбиты, ориентированной на Марс (MSO) пояснения цветов указаны справа, и величина магнитного поля (черная линия). Красная цветовая полоска внизу показывает, что спутник находится в северном полушарии. Вертикальные черные полосы приблизительно показывают область магнитопаузы. Сектор между двумя вертикальными линиями указывает место, где происходит вращение магнитного поля.

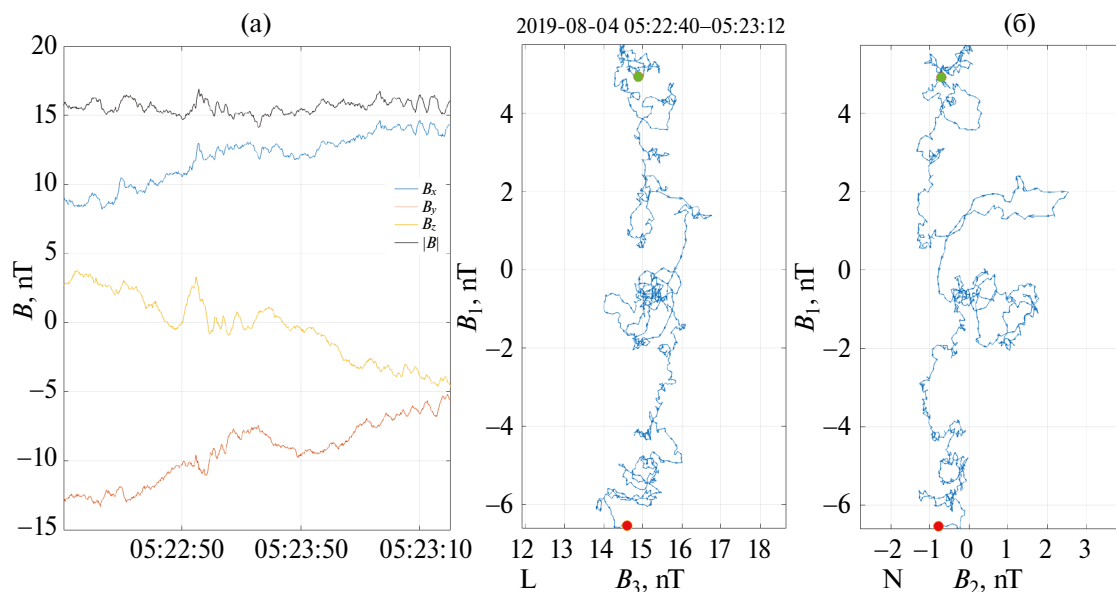


Рис. 6. Результат минимального анализа магнитного поля: (а) — диаграммы составляющих магнитного поля и вид вращения компонентов магнитного поля; (б) — компоненты собственных значений минимального анализа L и N с минимальной дисперсией.

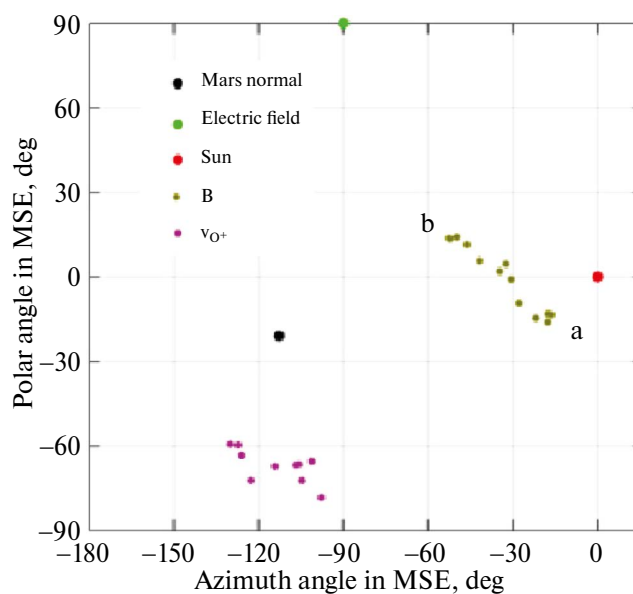


Рис. 7. На части карты Меркатора показаны временные интервалы примерно с 17 августа 2019 г., с 05:22:40 UT по 05:23:20 UT. Зеленые точки показывают траекторию быстрого магнитного поворота.

На рис. 8 показаны угловые распределения дифференциальных потоков H^+ и O^+ во временном промежутке с 05:22:24 UT по 05:23:04 UT в области между магнитослоем и магнитосферой. Верхнее распределение ионов n^+ сравнительно ровно уменьшается слева направо, нижнее распределение ионов O^+ увеличивается

сравнительно ровно от очень малого к значительному распределению. Надо учесть, что ионы O_2^+ не включены в график, и добавляют более чем вдвое массу, чем O^+ . Оценка сравнительного в данном случае вклада массы не проводилась, а базируется на динамическом вкладе компонентов.

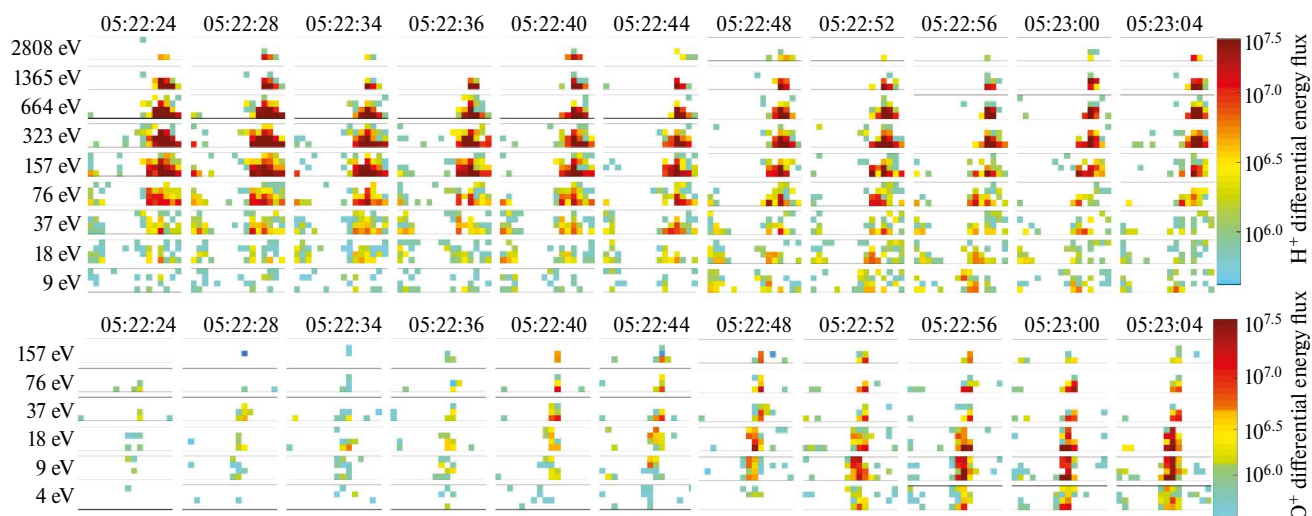


Рис. 8. Распределение плотностей p^+ и O^+ в отрезке времени от 05:22:24 – 05:23:04 UT в пределах сектора магнитопаузы.

Два примера дневной магнитосферы с условием направления электрического поля в сторону Марса показывают, что в этом случае образуется магнитная структура, соответствующая представлениям магнитопаузы, разделяющей магнитослой от магнитосферы.

ВТОРОЙ ТИП ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА

Рассмотрим дневную магнитосферу типа 2 (Вайсберг, Шувалов, 2022), которая представляет собой дневную магнитосферу с плюмом (Liemohn и др., 2014; Dong и др., 2015). Ее отличие связано с условием электрического поля, направленного в сторону от магнитосферы, что позволяет ионам непосредственно выходить из дневной магнитосферы в магнитослой.

Временной интервал охватывает магнитослой, магнитопаузу, магнитосферу и ионосферу. Так же как дневная магнитосфера Марса 1 типа (при электрическом поле, направленном в сторону Марса), магнитосфера 2 типа имеет магнито-плазменную оболочку между магнитослоем и ионосферой. Однако структура дневной магнитосферы существенно другая. Плюм покрывает почти все 3-ю и 4-ю панели, где распределения частиц плюма соединяются с распределением ионов в магнитосфере.

Система координат местоположения магнитопаузы MSE приблизительно соответствует высоте 88° и долготе -35° .

Параметрами, указывающими на дневную магнитопаузу, являются: электронная

температура, магнитное поле и тяжелые ионы. Профиль электронной температуры от $\sim 21:01:00$ UT до $\sim 23:01:00$ UT очень похож на профили в предыдущих случаях на рис. 1 и рис. 5. Вращение магнитного профиля с почти постоянным значением наблюдается между двумя вертикальными линиями на рис. 9 (около $\sim 01:23:00$ UT). Ускорение потоков энергии O^+ и O_2^+ от низкоэнергетических ионов до ~ 10 эВ между упомянутыми двумя вертикальными линиями на рис. 9 (около $\sim 23:01:00$ UT) также подтверждается местоположением магнитопаузы.

На рис. 10 показано вращение магнитного поля с $\sim 01:22:47$ UT до $\sim 01:23:12$ UT.

Масштаб вращения магнитного поля составляет около 25 км.

Наблюдаемая структура и характеристики дневной магнитосферы состоят из ионов O^+ и O_2^+ , которые разделяют магнитосферу от магнитослоя и продолжают формировать шлейф с дальнейшим ускорением в магнитослое.

На рис. 12 представлен компонент O^+ с энергией ~ 4 – 18 эВ. Этот важный компонент охватывает магнитопаузу и демонстрирует плавный переход через нее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены три пересечения магнитопаузой дневной магнитосферы: два пересечения с электрическим полем, направленным в сторону магнитосферы, и одно пересечение с электрическим полем, направленным от магнитосферы.

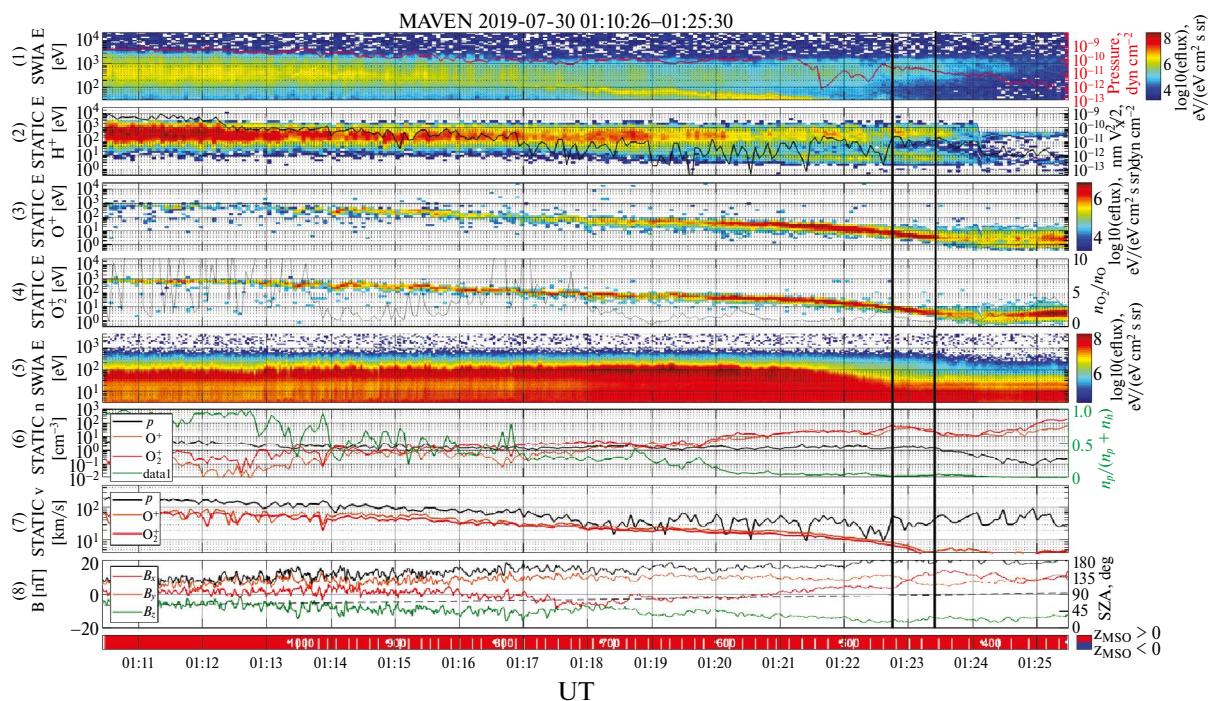


Рис. 9. 30 июля 2019 г., в 01:10:26 – 01:20:30 по восточному времени. Данные MAVEN включают магнитослой, магнитопаузу, магнитосферу и ионосферу. Панели сверху вниз: 1 – дифференциальная энергия-время суммы всех ионов; 2 – дифференциальная энергия-время протонов H^+ ; 3 – дифференциальная энергия-время кислорода O^+ ; 4 – энергия-время кислорода O_2^+ ; 5 – дифференциальная энергия-время энергии электронов; 6 – цветные линии плотности ионов (пояснения в прямоугольнике справа) и относительная плотность ионов и протонов (зеленые линии); 7 – скорости трех ионов (пояснения в прямоугольнике справа); 8 – компоненты магнитного поля в системе координат Солнечной орбиты, ориентированной на Марс (MSO) (пояснения цвета даны справа) и величина магнитного поля (черная линия). Красная цветовая полоска внизу показывает, что спутник находится в северном полушарии. Две вертикальные черные полосы приблизительно показывают область магнитопаузы. Сектор между двумя вертикальными линиями указывает место, где происходит вращение магнитного поля.

Структуры дневной плазмы в этой области отличаются друг от друга как внутри магнитосферы, так и за ее пределами, но имеют ряд общих характеристик.

Есть значительное количество работ, в которых предлагаются различные области и характеристики, которые имеют критерии границ для определения магнитосферы. Наибольшее количество предложений собрано в работе Espley (2018), и предложения продолжают.

Переход от магнитослоя до магнитосферы на дневной стороне достаточно сложный, и к тому же имеет два вида в зависимости от направления электрического поля. Магнитно-плазменная прослойка оказывается:

- либо нагретой, или нагретой и ускоренной в магнитосфере;
- либо редкий вариант – структурой Kelvin-Helmholtz’a;

– либо ускоренной и переходящей в обтекающий солнечный ветер.

Переход от магнитослоя к магнитосфере на Марсе достаточно сложен. Изменяются характеристики магнитного поля, толщины и направления, скорости, составы и характеристики ионных компонентов, взаимное влияние плазмы и магнитного поля.

В данной работе рассмотрен наиболее узкий интервал толщиной 200–350 км внутри образования на дневной стороне Марса между обтеканием магнитосферы потоком горячего водорода и кислородным препятствием. Эта магнитная структура, которая обеспечивает вращение намагниченного слоя без существенного изменения величины магнитного поля. В этом слое происходит смена состава протонов на смесь основных ионов O^+ и O_2^+ .

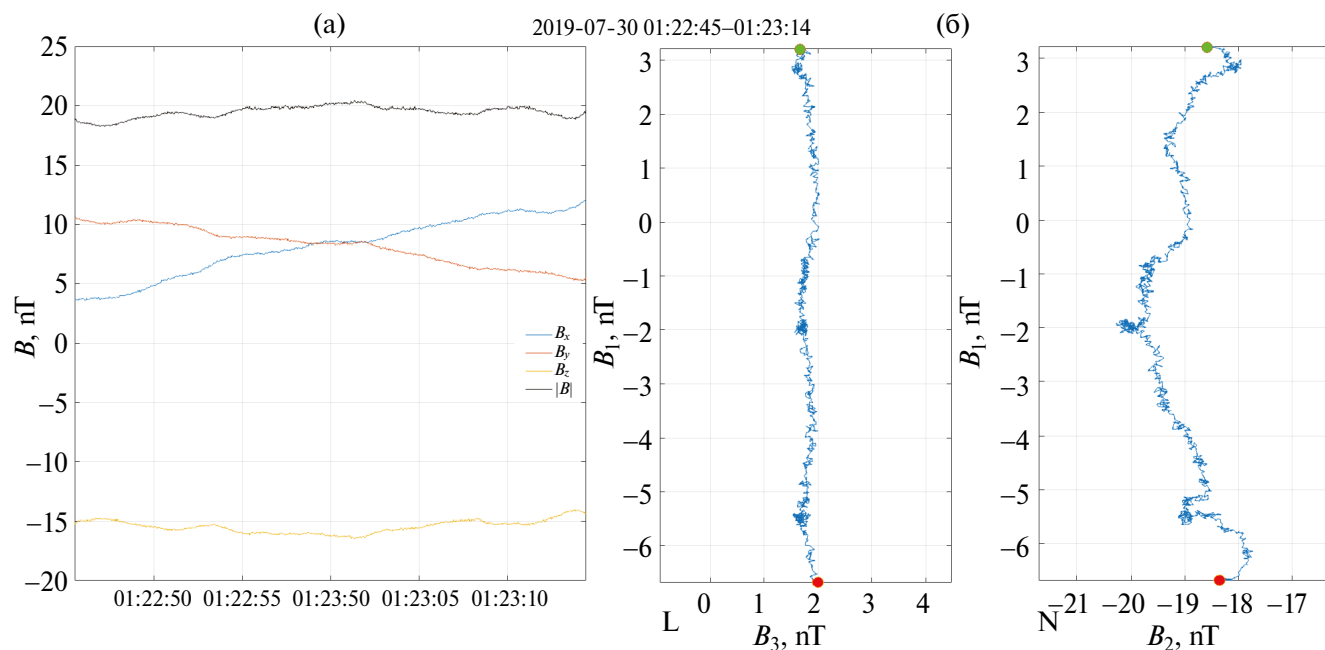


Рис. 10. Результат минимального анализа магнитного поля: (а) — диаграмма магнитного поля минимальной дисперсии; (б) — двумерный вид вращения магнитного поля, где L — довольно длинный и почти прямой участок диаграммы, а N — наиболее изогнутый участок диаграммы.

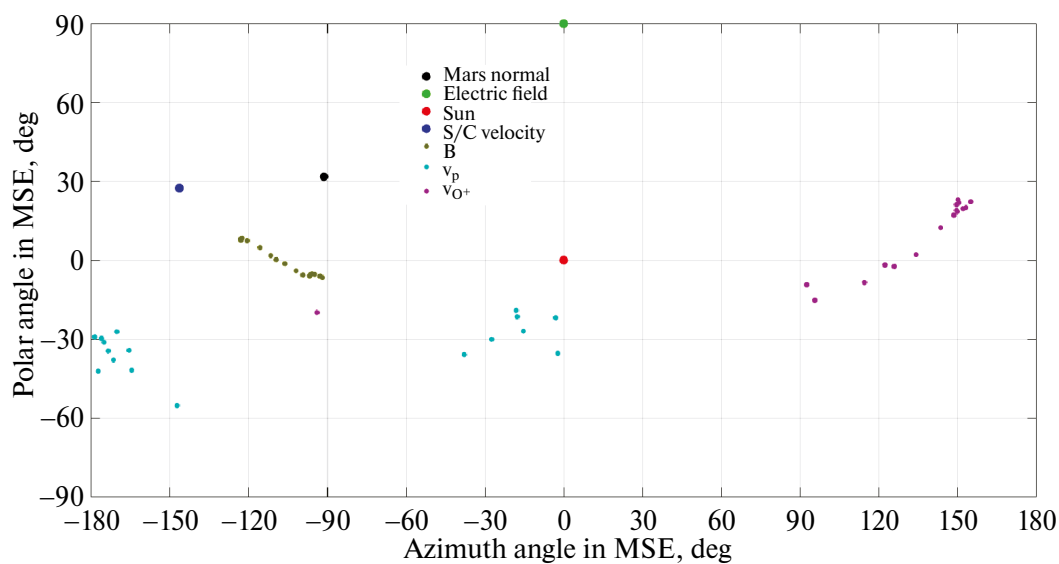


Рис. 11. На части карты Меркатора показаны временные интервалы примерно с 30 июля 2019 г. в $\sim 01^h23^m$ UT. Зеленые точки показывают траекторию быстрого магнитного поворота.

Повторяющееся явление в физических процессах называется аттрактором. Описанное в данной работе явление (аттрактор) может быть названо: гладкая смена состава плазмы без изменения амплитуды магнита.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Института космических исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

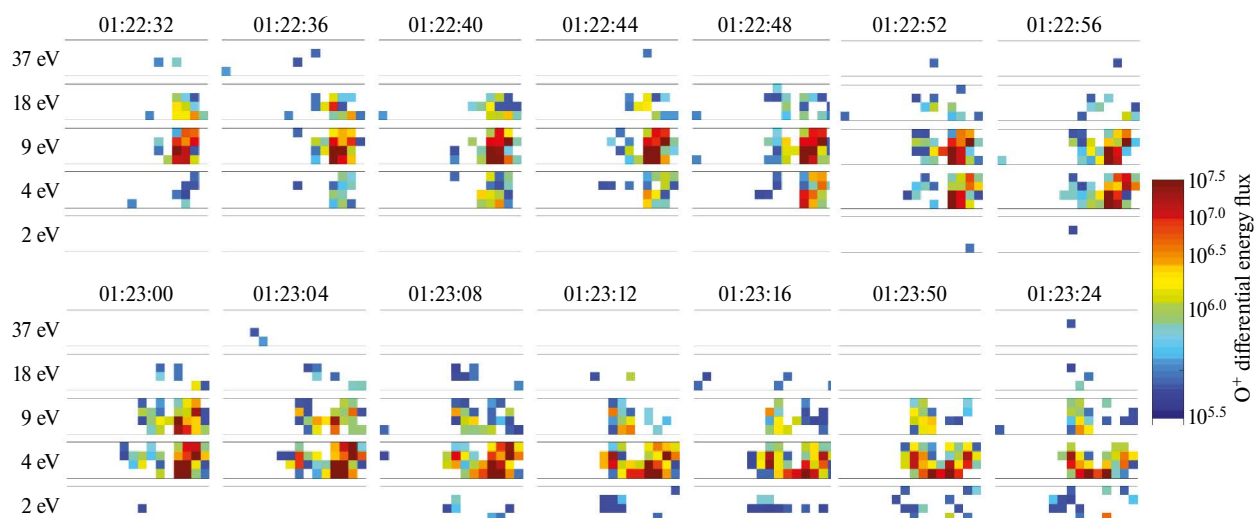


Рис. 12. O^+ , разделяющий обтекающий поток с магнитосферой 01:22:24–01:23:24 UT.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайсберг О.Л., Шувалов С.Д. Структура дневной магнитосферы Марса: два типа // Астрон. вестн. 2022. Т. 56 № 5. С. 1–12. (Vaisberg O.L., Shuvalov S.D. Structure of the Martian dayside magnetosphere: Two types // Sol. Syst. Res. 2022. V. 56. № 5. P. 279–290.)
2. Bryant D.A., Riggs S. At the edge of the Earth's magnetosphere: A survey by AMPTE-UKS // Phil. Transact. Roy. Soc. London. Ser. A. 1988. V. 328. № 1598. P. 43–56.
3. Chen Y.Q., Wu M., Du A.M., Xiao S.D., Wang G.Q., Zhang T.L. A case study of the induced magnetosphere boundary at the Martian subsolar region // Astrophys. J. 2022. V. 927. P. 171.
4. Dong Y., Fang X., Brain D.A., McFadden J.P., Halekas J.S., Connerney J.E., Curry M., Harada Y., Luhmann J.G., Jakosky B.M. Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel // Geophys. Res. Lett. 2015. V. 42. P. 8942–8950.
5. Espley J.R. The Martian magnetosphere: Areas of unsettled terminology // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2018. V. 123. P. 4521–4525.
6. Fedorov A.O., Vaisberg O.L., Intriligator D.S., Sagdeev R.Z., Galeev A.A. A large amplitude rotational wave in the Venusian ionosheath // J. Geophys. Res.: Atmospheres. 1991. V. 96. P. 87–99.
7. Fedorov A.O., Vaisberg O.L., Intriligator D.S. A large-amplitude rotational wave in the ionosheath of Venus // Adv. Space Res. 1992. V. 12. № 8. P. 313–317.
8. Hall D.S., Bryant D.A., Chaloner C.P. Plasma variations at the dayside magnetopause // Proc. 7th ESA Symp. Rockets and Balloons. 1985. P. 299–304.
9. Hapgood M.A., Bryant D.A. Re-ordered electron data in tile low-latitude boundary layer // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. № 11. P. 2043–2046.
10. Jakosky B.M., Lin R.P., Grebowsky J.M., Luhmann J.G., Mitchell D.F., Beutelschies G., Priser T., Acuna M., Andersson L., Baird D., and 64 co-authors. The Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) mission // Space Sci. Rev. 2015. V. 195. P. 3–48.
11. Liemohn M.W., Johnson B.C., Franz M., Barabash S. Mars Express observations of high-altitude planetary ion beams and their relation to the “energetic plume” loss channel // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2014. V. 119. P. 9702–9713.
12. Ma Y., Shu Wang, Chao Shen, Nian Ren, Tao Chen, Peng Shao, Peng E., Bogdanova Y.V., Burch J.L. Rotational discontinuities in the magnetopause of an open magnetosphere // J. Geophys. Res.: Space Physics. 2022. V. 127. № 8.
13. Sonnerup B., Scheible M. Minimum and Maximum. Variance analysis magnetic in reconnection // Analysis Meth. Multi-Spacecraft Data. 1998. P. 185–220.
14. Vaisberg O.L., Bogdanov A.V., Smirnov V.N., Romanov S.A. On the nature of the solar wind-Mars interaction // NASA. Goddard Space Flight Center Solar-Wind Interaction with the Planets Mercury, Venus, and Mars. 1976.
15. Vaisberg O.L., Ermakov V.N., Shuvalov S.D., Zelenyi L.M., Znobishchev A.S., Dubinin E.M. Analysis of dayside magnetosphere of Mars: High mass loading case as observed on MAVEN spacecraft // Planet. and Space Sci. 2017. V. 147. P. 28–37.