

УДК 523.43

СТРУКТУРА ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА: ДВА ТИПА

© 2022 г. О. Л. Вайсберг^а, *, С. Д. Шувалов^а, **

^аИнститут космических исследований РАН, Москва, Россия

*e-mail: olegv@iki.rssi.ru

**e-mail: shuvalovsergei@gmail.com

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 25.03.2022 г.

Принята к публикации 13.04.2022 г.

Набор научных приборов с измерениями высокого временного разрешения на космическом аппарате Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN) позволил изучить структуру и свойства дневной магнитосферы Марса. Плазменная оболочка Марса на дневной стороне планеты была обнаружена по наблюдениям на первых орбитальных аппаратах Марса (Vaisberg и др., 1976; Gringauz и др., 1976). Высокое временное и массовое разрешение приборов на MAVEN позволило исследовать структуру и процессы в плазме дневной магнитосферы, плазменный слой, который существует между солнечным ветром, разогретым на ударной волне, и ионосферой (Вайсберг и др., 2017). Показано, что при различных внешних условиях между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне образуются два различных типа плазменных слоев: (1) смесь нагретых ионосферных ионов и захваченных экзосферных ионов и (2) слой ускоренных электрическим полем солнечного ветра ионов ионосферы, в англоязычной литературе называемый “plume” (плюм, Dong и др., 2015). Первый тип дневной магнитосферы Марса образуется в результате взаимодействия захваченных и ускоренных солнечным ветром ионов кислорода экзосферного происхождения с верхней частью ионосферы Марса (Vaisberg, Shuvalov, 2021). Второй тип дневной магнитосферы Марса формируется при ускорении пучка ионов из внешней ионосферы, который потом переходит в более энергичный пучок плюма в магнитослое. В этой статье рассмотрены типичные плазменные популяции, их свойства и условия, которые приводят к формированию дневной магнитосферы из материала внешнего слоя ионосферы.

Ключевые слова: Марс, магнитосфера, солнечный ветер, плюм, пикап, MAVEN

DOI: 10.31857/S0320930X22050061

Первый близкий пролет Mariner-4 вблизи Марса 14–15 июля 1964 г. на минимальном расстоянии 13 300 км показал, что Марс не обладает сильным магнитным полем, и солнечный ветер может напрямую взаимодействовать с его атмосферой (Dryer, Neckman, 1967).

Первые пересечения магнитосферы Марса были выполнены космическими аппаратами Марс-2, Марс-3 и Марс-5 в 1970 гг. и обнаружили увеличение магнитного поля до ~30 нТл (Долгинов и др., 1976) и появление ионов с меньшей энергией, чем в магнитосфере, как на дневной стороне, так и значительно ниже по течению (Bogdanov, Vaisberg, 1975). В отличие от Земли, на Марсе отсутствует глобальное собственное магнитное поле, что делает плазменную среду Марса намного меньше. В первые годы освоения космоса считалось, что препятствие солнечному ветру образуется магнитным полем от ионосферных токов, индуцируемых движением электрического поля солнечного ветра (например, Dessler, 1968).

Термин “магнитосфера Марса” был впервые введен в начале исследования Марса (Van Allen и др., 1965) и использовался для описания марсианского магнитосферного хвоста, в то время как дневная магнитосфера долгое время оставалась неисследованной. Область между магнитосферой и ионосферой интерпретировалась в терминах существования пограничного слоя на дневной стороне Марса (Szego и др., 1998). Космический аппарат Mars Express (MEX) измерил ионный состав плазмы в этой области (Dubinin и др., 2008a; 2008b). Было обнаружено магнитное сжатие (pile-up) с разрывом (называемое границей магнитного сжатия), хотя в некоторых случаях оно отсутствовало. Также наблюдалась “граница” ионосферных фотоэлектронов, часто сопровождающаяся резким увеличением (до $\sim 10^3 \text{ см}^{-3}$) численной плотности ионосферной плазмы.

Только в сентябре 2014 г. космический аппарат Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN), несущий комплекс плазменной аппаратуры, прибыл на марсианскую орбиту и предоставил воз-

возможность детально изучить область между обтекающим потоком и ионосферой Марса. Существует несколько работ, в которых обсуждается структура границы и процессы внутри нее (Holmberg и др., 2019; Espley, 2018; Halekas и др., 2015; 2018). Согласно Halekas и др., 2017 “магнитосфера Марса формируется в результате прямого и косвенного взаимодействия солнечного ветра с марсианской ионосферой посредством сочетания эффектов индукции и массовой нагрузки”. Однако знаний о магнитоплазменной оболочке дневной стороны Марса было недостаточно для понимания ее структуры и процессов взаимодействия между прошедшим через ударную волну солнечным ветром и ионосферой. Существует множество обозначений границ и оболочек в этой части магнитоплазменной оболочки Марса, не говоря уже о процессах, происходящих в этой части магнитосферы Марса.

В данной работе рассматриваются два различных типа структуры магнитосферы между разогретым на головной ударной волне потоком солнечного ветра и ионосферой. Первый характеризуется наличием плазмы, представляющей собой смесь захваченных экзосферных ионов и нагретых и ускоренных ионосферных ионов (Vaisberg, Shuvalov, 2021). Второй тип характеризуется наличием слоя с низкотемпературными ионосферными ионами, ускоренными электрическим полем солнечного ветра и называемого “ионным плюмом” (Kallio, Koskinen, 1999; Kallio и др., 2006; 2008, Voesswetter и др., 2007; Dubinin и др., 2006; 2011; Liemohn и др., 2014; Dong и др., 2015). Низкоэнергетическая часть плюма расположена ниже границы марсианской магнитосферы. В этой статье мы анализируем и сравниваем структуру обоих различных типов структуры магнитосферы.

ПРИБОРЫ

Космический корабль MAVEN прибыл к Марсу в сентябре 2014 г. для изучения процессов в верхних слоях атмосферы, ионосферы и их взаимодействия с солнечным ветром, а также оценки атмосферных потерь (Jakosky и др., 2015). MAVEN был выведен на эллиптическую орбиту с перигеем примерно 150 км, апоцентром 6200 км и периодом ~4.5 ч.

Данные измерений с приборами MAVEN открыты для доступа. Специалисты проекта охотно отвечают на вопросы. В этой статье мы обсуждаем наблюдения, в основном выполненные с прибором Supra-Thermal And Thermal Ion Composition (STATIC) с июля по октябрь 2019 г., во время солнечного минимума. Прибор STATIC, установленный на платформе полезной нагрузки с приводом Actuated Payload Platform (APP), используется для изучения характеристик ионов различных видов при взаимодействии солнечного ветра с Марсом.

Прибор состоит из тороидального электростатического спектрометра с цилиндром с электро-

статическим дефлектором на входе, обеспечивающего поле зрения $360^\circ \times 90^\circ$ в сочетании с время-пролетным анализатором, разделяющим основные виды ионов (H^+ , He^{++} , He^+ , O^+ , O_2^+ , CO_2^+). Он измеряет энергетические спектры ионов с различными (m/q) в диапазоне 0.1 эВ–30 кэВ с минимальной частотой 4 с (McFadden и др., 2015). Данные характеристики позволяют проводить измерения функции распределения частиц в пространстве скоростей и в дальнейшем вычислять ее моменты (концентрацию частиц, среднюю скорость по ансамблю и температуру). Данные прибора STATIC уровня level 2 d1 используются для исследования функции распределения ионов различных масс. Этот набор содержит данные о дифференциальных потоках энергии для ионов на 32 энергетических ступенях, 4 полярных и 16 азимутальных углах для восьми различных значений масс. Частота измерений для временных интервалов, представленных в статье, составляет 4 с. При высоких скоростях счета в некоторых случаях протоны могут быть ошибочно зарегистрированы как ионы больших масс из-за неправильной идентификации сигналов запуска/остановки схемы времени полета. Чтобы уменьшить этот эффект, была применена специальная процедура для данных об O^+ и O_2^+ , в которой 8% дифференциального потока энергии протонов вычитались из данных для ионов кислорода для тех же энергетических и угловых ячеек.

Наряду с измерениями с STATIC, в работе использованы данные, полученные с помощью Solar Wind Ion Analyzer (анализатор ионов солнечного ветра, SWIA, Halekas и др., 2015), ионного анализатора с полем зрения $360^\circ \times 90^\circ$, установленного на панели солнечных батарей, электронного анализатора солнечного ветра (SWEA, Mitchell и др., 2016) и измерения магнитного поля с частотой 32 Гц (MAG, Connerney и др., 2015). Для измерений с SWIA и SWEA также использовались данные уровня level 2 с временным разрешением, составляющим 4 и 2 с, соответственно.

НАБЛЮДЕНИЯ

Анализ данных, полученных на MAVEN, основан на наблюдениях, сделанных на дневной стороне Марса. Использованные данные были отобраны по следующим критериям: (1) во время солнечного минимума (с большим количеством невозмущенных случаев для анализа), (2) пересечения границ дневной магнитосферы, (3) вдали от областей остаточной намагниченности марсианской коры (имеющие меньше дополнительных влияний), подразумевающих пересечения в северном полушарии. Всего было рассмотрено 115 пересечений области над границей магнитосферы в интервале времени с 27.07.2019 по 31.10.2019 для солнечно-зенитных углов (СЗУ) от $\sim 60^\circ$ до $\sim 95^\circ$ (рис. 1). Распределение СЗУ наблю-

даемых пересечений приведено на рис. 1. Этот “ландшафт” пересечений был классифицирован как: (а) 65 орбит с наблюдениями области между обтекающим разогретым потоком солнечного ветра и верхней ионосферой, которую мы классифицируем как дневную магнитосферу и (б) 50 орбит с наблюдаемым ионным пучком, возникающим в области ионопаузы, продолжающимся в магнитослой с возрастанием энергии пучка, и в дальнейшем выходящим в обтекающий поток.

Мы приводим описание двух типов формирований, разделяющих на дневной стороне Марса поток разогретого солнечного ветра от внешней ионосферы. Что касается двух типов слоев, разделяющих области потока магнитослоя и ионосферы на дневной стороне Марса, их физические причины существенно различаются. В данной работе мы в основном концентрируем внимание на дневной магнитосфере первого типа, которая существенно опирается на динамику ионных пучков.

МАГНИТОСФЕРА ДНЕВНОЙ СТОРОНЫ – 1-й ТИП

В данном разделе рассматриваются по два образца из 57% образований в выборке 115 рассмотренных в данной статье орбит.

На рис. 2 показаны данные, полученные 29 июля 2019 г. (03:10.21–03:32.09 UT). MAVEN переместился из магнитослоя в ионосферу при СЗУ $\sim 69.5^\circ$ при пересечении верхней границы магнитосферы. В отождествлении границы магнитосферы мы использовали следующие признаки.

1а – Уменьшение потока ионов магнитослоя. Здесь мы имеем два отчетливых изменения в спектрах протонов: в $\sim 03:17:30$ и в $\sim 03:20$ UT. Особенность, наблюдаемая в $\sim 03:17:30$ UT, обусловлена вращением платформы со спектрометром STATIC. В $\sim 03:20$ UT мы наблюдаем расщепление спектров протонов на две составляющие: низкоэнергетический (100–200 эВ) компонент и высокоэнергетический компонент. Протоны с более высокой энергией, происходящие из солнечного ветра, и захваченные магнитным полем протоны, происходящие из расширенной водородной атмосферы, могут проникать глубже в магнитосферу из-за их больших ларморовских радиусов. Происхождение низкоэнергетической составляющей не столь ясно. Она может состоять из протонов оболочки, которые постепенно теряют свой импульс, и протонов атмосферного происхождения, которые получают импульс от солнечного ветра.

1в – Положение границы в $\sim 03:20$ UT подтверждается измерениями с прибором SWIA, который не меняет направление обзора. Границу индуцированной магнитосферы можно легко определить по резкому изменению ионного состава, как это видно на рис. 1 на спектрах ионов, и по соотно-

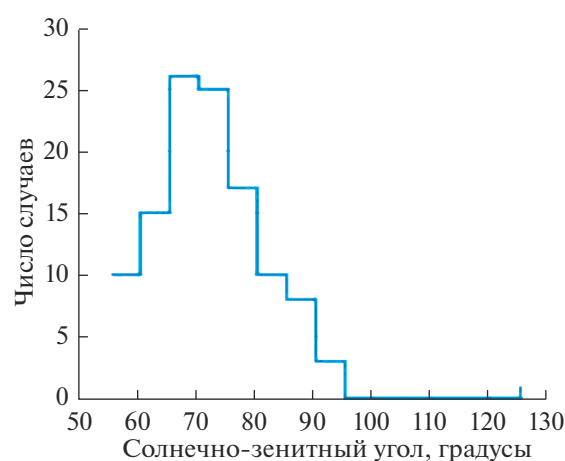


Рис. 1. Распределение местоположений магнитосферы по солнечно-зенитным углам наблюдаемых случаев. Солнечно-зенитный угол для каждого пересечения рассчитывался в момент пересечения магнитопаузы, определяемый как $n_p/(n_p + n_h) \approx 0.5$ на основе измерений с STATIC.

шению $n_p/(n_p + n_h) \approx 0.5$, где n_p – концентрация протонов, а n_h – сумма концентраций ионов O^+ и O_2^+ .

1с – Снижение уровня флуктуаций магнитного поля, наблюдаемое в $\sim 03:20$ по всемирному времени, согласуется с нашей идентификацией границы.

Третья и четвертая панели на рис. 2 показывают поведение ионов кислорода. Мы наблюдаем потоки ионов O^+ с энергиями около 100–5000 эВ в магнитослой. Эти ионы образуются в кислородной короне и ускоряются электрическим полем солнечного ветра. Они также видны в магнитосфере, где определенная их часть обладает более высокой энергией. Ионы O^+ с энергией ниже 100 эВ и ионы O_2^+ с энергиями ~ 5 –330 эВ преимущественно ускоряются на более низких высотах и не могут получить более высокую энергию.

Две границы в пределах перехода от магнитослоя к ионосфере могут быть идентифицированы с использованием плазменных и магнитных параметров на рис. 2. Внешняя граница довольно резкая и определяется рядом физических параметров (идущих от магнитослоя к магнитосфере): падение потока энергии протонов, резкое появление pick-up ионов O^+ и O_2^+ с энергиями 3–300 эВ, падение энергии электронов, резкое падение температуры электронов, падение отношения $n_p/(n_p + n_h)$. Концентрация магнитослоя падает на порядок на двух границах, что определяет магнитопаузу. Некоторые из этих границ обсуждались рядом авторов. Сравнения различных критериев, используемых для идентификации границы магнитосферы (Espley, 2018; Halekas и др., 2018; Holmberg и др., 2019), показывают, что резкое падение давления протонов солнечного ветра на по-

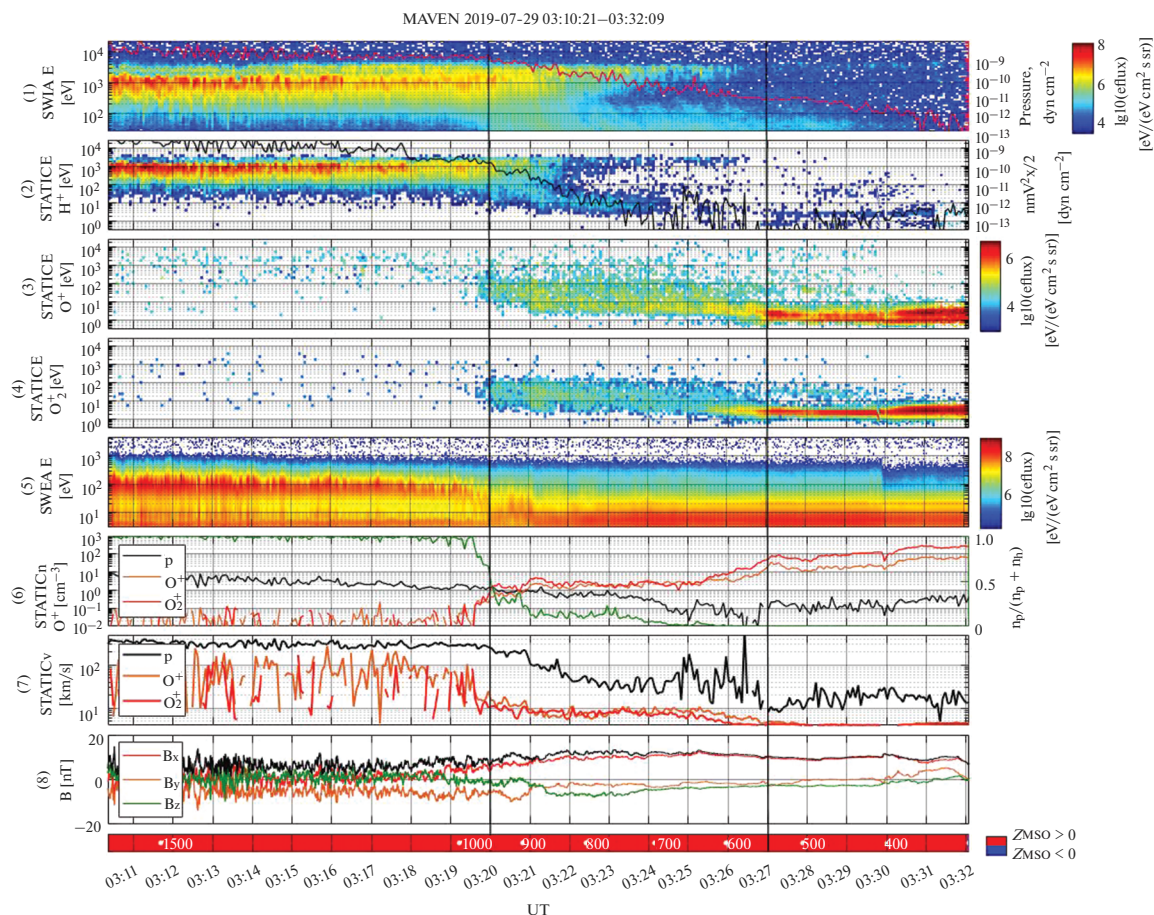


Рис. 2. Сверху вниз: (1) спектрограмма время–энергия, суммированная по всем видам ионов; красная линия показывает динамическое давление ионов $n \cdot m \cdot V^2/2$ в предположении, что все измеренные ионы являются протонами, (2–4) спектрограммы энергия–время для протонов, ионов O^+ и O_2^+ , (5) спектрограмма энергия–время для электронов, (6) концентрация протонов, ионов O^+ , O_2^+ и отношение концентрации протонов к сумме концентраций протонов и тяжелых ионов n_h ($O^+ + O_2^+$), (7) скорости различных ионов, (8) три компонента и величина магнитного поля в системе координат Mars-Sun-Orbit (MSO). Падение в ~03:18 UT на второй панели связано с изменением направления визирования прибора STATIC. Отсутствие ионов с энергиями выше ~500 эВ после ~03:29.30 UT (обратите внимание на сбой в диаграммах O^+ и O_2^+ в это время) связано с изменением режима измерения. Данные на панелях 2, 3, 4, 6, 7 взяты из данных, полученных с STATIC, 1 – с SWIA, 5 – с SWEA, 8 – с MAG. Из 112 выбранных пересечений границ магнитосферы в 2019 г. этот тип плазменной оболочки наблюдался примерно в 60% случаев. Две черные вертикальные линии указывают местоположение магнитосферы.

рядок представляется лучшим параметром для отождествления границы магнитосферы и часто совпадает с резким изменением состава ионов.

Переход от дневной магнитосферы к ионосфере происходит довольно плавно и требует дополнительного анализа. При большом интервале концентрации в ~2 порядков различную роль играют, в частности, процессы рекомбинации и ионизации и ряд других процессов, анализ которых выходит из рассмотрения в данной работе. Следующие изменения численной плотности ионов O_2^+ и O^+ и их соотношение показаны на рис. 2 при переходе от магнитопаузы к ионосфе-

ре: (1) численные плотности этих ионов изменяются от фона до ~1–2 cm^{-3} в 03:20:00 и продолжают до ~03:25:30 с небольшими изменениями, (2) в течение временного интервала ~03:25:30–~03:27:20 численные плотности O_2^+ увеличиваются быстрее, чем увеличение численной плотности O^+ и (3) численные плотности двух ионов показывают небольшое увеличение с соотношением $O_2^+/O^+ \sim 5$. Космический аппарат вошел в ионосферу примерно в ~03:27:00 по восточному времени, где преобладает популяция холодных ионов. Изменение соотношения O_2^+ в магнитосфере бу-

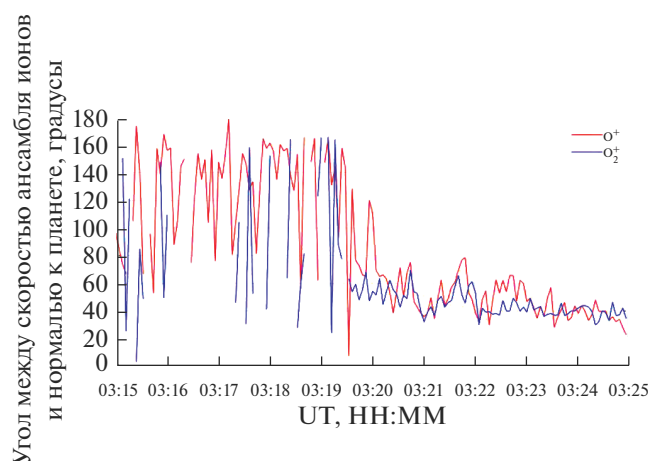


Рис. 3. Угол между объемной скоростью ионов и нормалью к поверхности планеты для ионов O^+ и O_2^+ для пересечения, представленного на рис. 2.

дет обсуждаться позже, поскольку оно предоставляет инструмент для анализа дневной магнитосферы.

На рис. 3 показан угол между скоростью ионов и внешней нормалью к поверхности планеты для ионов O^+ и O_2^+ . Видно, что ионы в магнитослое (до $\sim 03:19:30$ UT) в основном движутся к планете, так как вышеупомянутый угол составляет $>90^\circ$. Это происходит потому, что скорость дрейфа частиц ионов, захваченных в кислородной короне, приблизительно совпадает со скоростью солнечного ветра. Направления объемных скоростей обоих компонентов ионов ниже магнитопаузы остаются стабильными при $\sim 60^\circ$ – 40° относительно нормали к поверхности, указывая на то, что они удаляются от планеты. Приблизительно в 03:27:00 угол приближается к 80° , но в расчет этого угла входят, помимо точности вычисленного угла, скорость спутника и неточность расчета скорости плазмы.

На рис. 4 показаны выбор двумерных распределений скоростей ионов O^+ в координатах Mars-

Sun-Electric field (MSE), в которых ось X указывает на Солнце, ось Y проходит вдоль поперечной составляющей межпланетного магнитного поля в солнечном ветре, а ось Z проходит вдоль движущегося электрического поля $E = -(1/c)vB$, примерно за тот же интервал времени, что и на рис. 2. Размер кругов показывает плотность фазового пространства ионов в пространстве скоростей. Наблюдается, что с увеличением расстояния от ионосферы Z -составляющая скоростей увеличивается, указывая на ускорение ионов внешним электрическим полем.

Временной интервал $\sim 03:25$ – $\sim 03:27$ приблизительно соответствует переходу из нижней части ионосферы, где соотношение O_2^+/O^+ составляет ~ 2 , в верхнюю ионосферу с $n(O_2^+)/n(O^+) \sim 1$ (см. рис. 2). На больших высотах мы наблюдаем расширение распределения ионов в направлении движущегося электрического поля (03:24:27) и дальнейшее постепенное ускорение ионов (03:21:41–03:20:57 UT).

Значительный нагрев ионов кислорода во внешней части плазменной оболочки хорошо виден на рис. 5, на котором показаны энергетические спектры протонов, ионов O^+ и O_2^+ . Видно, что с приближением к ионосфере спектры ионов становятся менее энергичными. В ионосфере ($\sim 03:27:20$) температура ионов кислорода уменьшается.

На рис. 6 показан еще один пример дневной магнитосферы в 2019-07-31. Магнитослой показан слева на расстоянии ~ 800 км. Критерии расположения границ были представлены при обсуждении предыдущего случая на рис. 1. В случае, показанном на рис. 6, магнитопауза была пересечена в 06:32:00 UT на высоте ~ 620 км, на что указывает соотношение $n_p/(n_p + n_h) \approx 0.5$, резкое падение энергии ионов (панель 1) и энергии протонов (панель 2), а также увеличение концентрации и температуры потоков ионов O^+ и O_2^+ (панели 3 и 4). Ионопауза определяется на высоте ~ 440 км в $\sim 06:35:40$ по восточному времени по падению температуры горячих ионов.

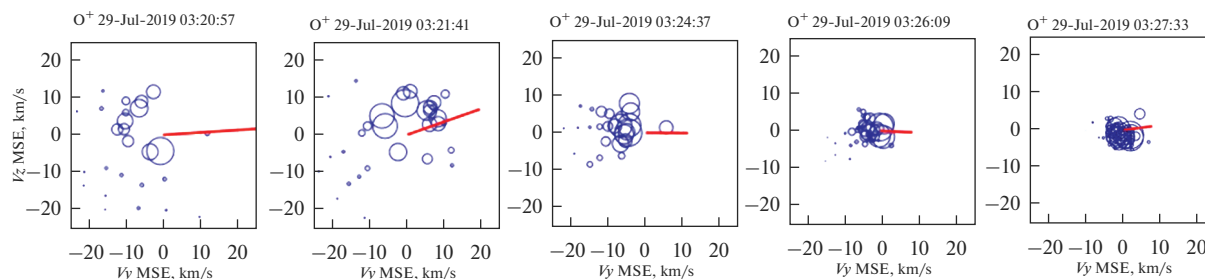


Рис. 4. Примеры функций распределения ионов кислорода в пространстве скоростей (V_x – V_y). Размер окружности пропорционален плотности ионов в фазовом пространстве. Красные линии показывают проекцию магнитного поля на плоскость VZ -MSE.

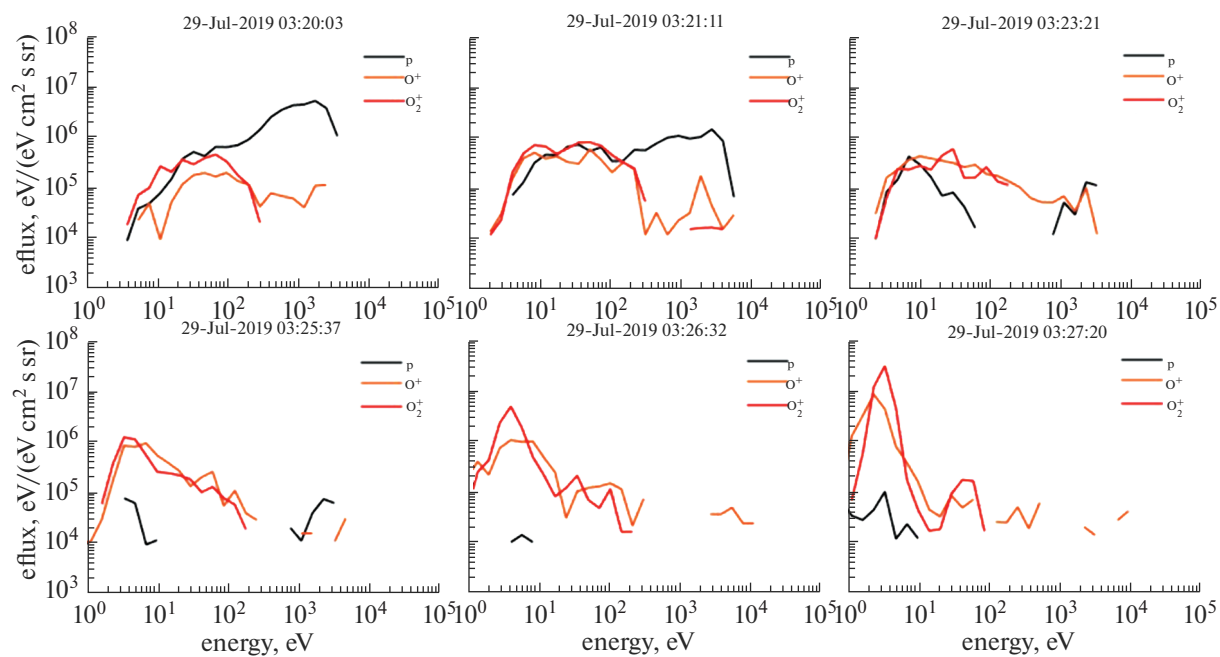


Рис. 5. Энергетические спектры ионов H^+ , O^+ и O_2^+ в плазменной оболочке, прилегающей к ионосфере.

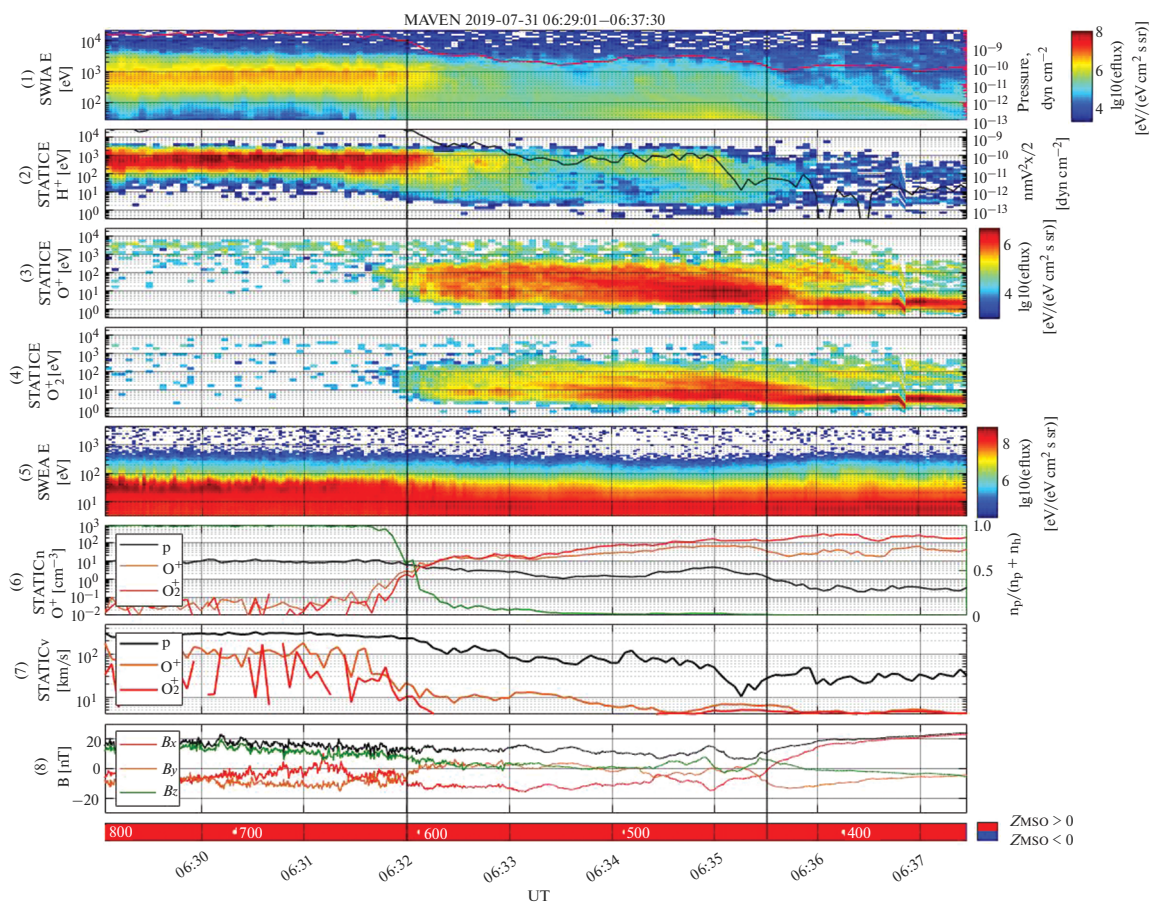


Рис. 6. См. подпись к рис. 2.

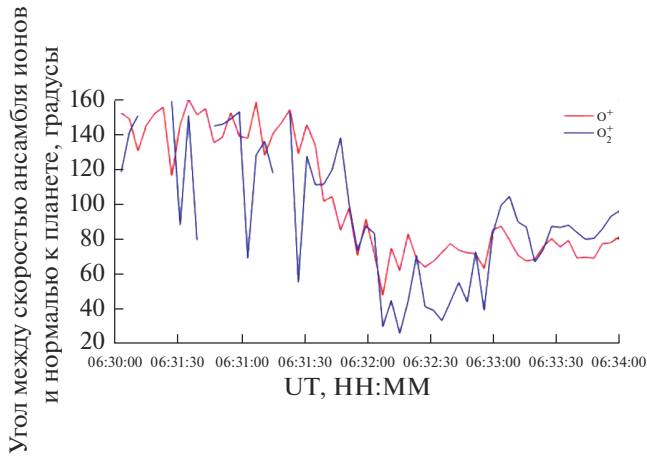


Рис. 7. Угол между полной скоростью и нормалью к поверхности меньше 90° , показывая движение плазмы от планеты.

Так же, как было отмечено при обсуждении предыдущего примера (рис. 2), изменение численного отношения ионов O_2^+/O^+ при переходе от

магнитосферы к ионосфере происходит с 1–2 (панель 6) до 06:35:40 UT до ~ 5 –10. Таким образом, в обоих случаях изменение соотношения $n(O_2^+)/n(O^+)$ составляет примерно 5.

На рис. 7 показаны направления движения ионов от участка в магнитослое до ионосферы в проекции к нормали к магнитопаузе. Видно, что ионы в магнитослое (до $\sim 06:31:45$) преимущественно движутся к планете, так как угол между скоростью частиц и внешней нормалью к планете составляет $>90^\circ$.

МАГНИТОСФЕРА ДНЕВНОЙ СТОРОНЫ С ПЛЮМОМ

Когда плюм присутствует в магнитослое дневной стороны, плазма в магнитосфере также содержит популяции ускоренных ионосферных ионов и pick-up ионов. Характеристики ионосферных и pick-up ионов весьма схожи с характеристиками, наблюдаемыми в дневной магнитосфере в случаях отсутствия плюма. На рис. 8

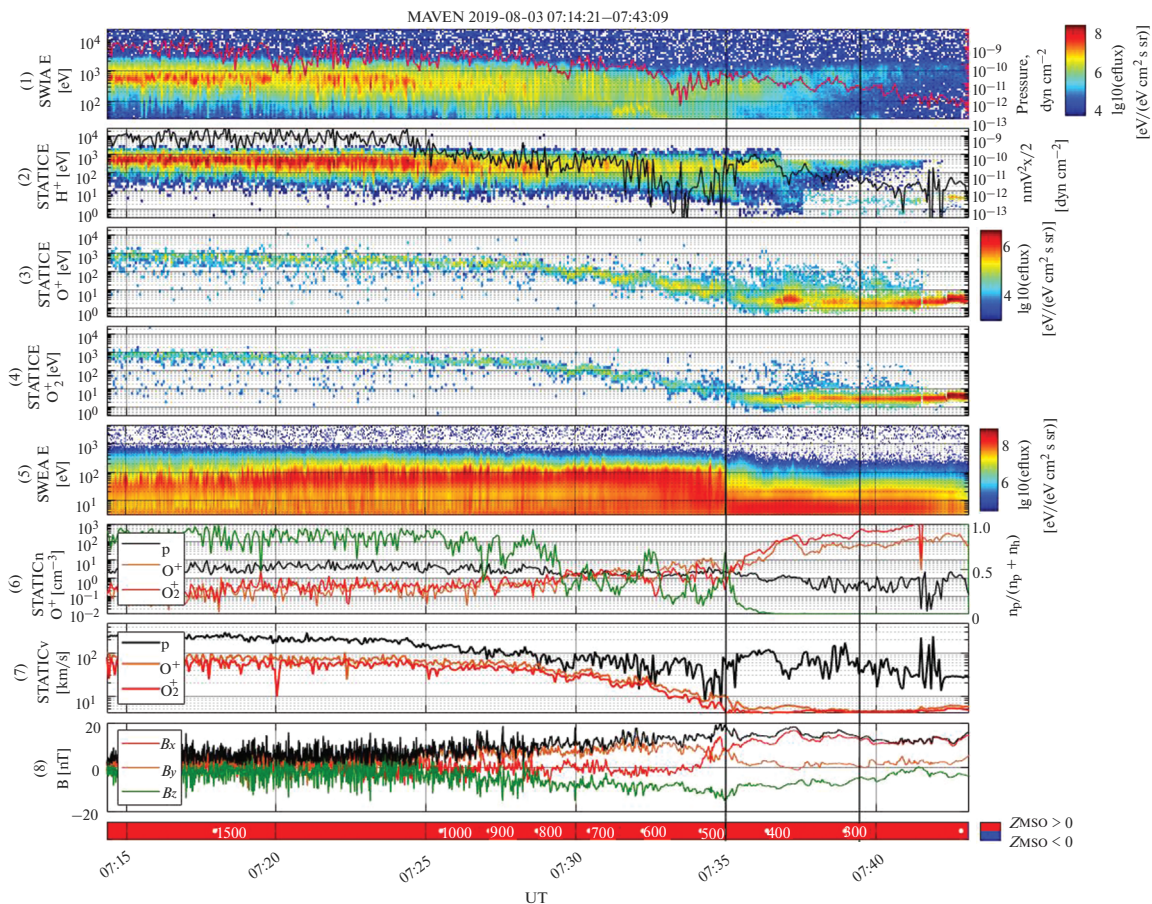


Рис. 8. Те же параметры, что и на рис. 2, показаны здесь для орбиты 3 августа 2019 г. Ионный плюм характеризуется узким энергетическим распространением тяжелых ионов с монотонным увеличением энергии из ионосферы через магнитослой.

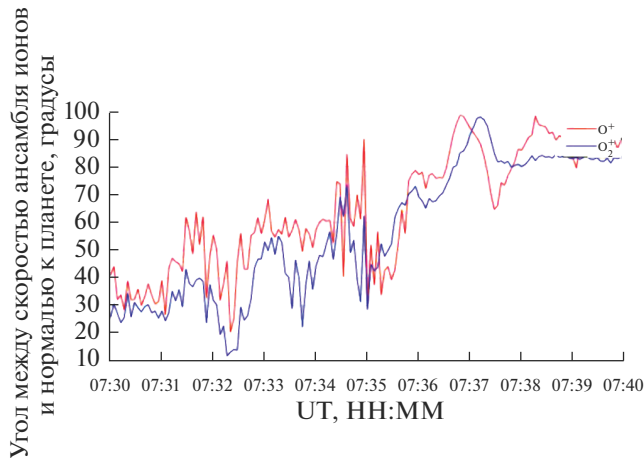


Рис. 9. Угол между объемной скоростью ионов и нормалью к поверхности планеты для ионов O^+ и O_2^+ для пересечения, представленный на рис. 8.

показан типичный пример такой структуры магнитосферы.

Плюм наблюдается в 2019-08-03 UTC в 07:14:21–07:43:09 UTC (рис. 8). Он включает в себя значительную часть магнитослоя (~07:14 UT–~07:32:30 UT) с падением ионного динамического давления с 1×10^{-9} дин/см² в 10 раз, которое мы определяем как границу. Дальнейшее резкое уве-

личение концентрации числа тяжелых ионов и отношения $n_p/(n_p + n_h)$ (6-я панель), увеличение величины магнитного поля B и уменьшение флуктуаций магнитного поля (8-я панель) подтверждают нашу идентификацию этой границы. СЗУ при пересечении магнитопаузы составлял $\sim 75^\circ$.

Панели 3 и 4 показывают, что магнитослой заполнен ионами плюма. Эта плазменная структура, характеризующаяся узкими энергетическими спектрами тяжелых ионов с монотонным увеличением энергии, образована ионами, возникшими в расширенной экзосфере и верхней ионосфере под действием электрического поля солнечного ветра.

Угол между объемной скоростью тяжелых ионов и нормалью к поверхности планеты, представленный на рис. 9, показывает, что эти ионы удаляются от планеты. Этот угол уменьшается по мере ускорения ионов в движущемся электрическом поле. Заметной особенностью является то, что угол отличается на $\sim 10^\circ$ для обоих видов ионов. Это может быть связано с различными гирорадиусами этих ионов.

На рис. 10 показаны энергетические распределения ионов O^+ и O_2^+ в моменты регистрации ионов плюма. Эти распределения энергии очень сильно отличаются от распределений захваченных ионов (рис. 5).

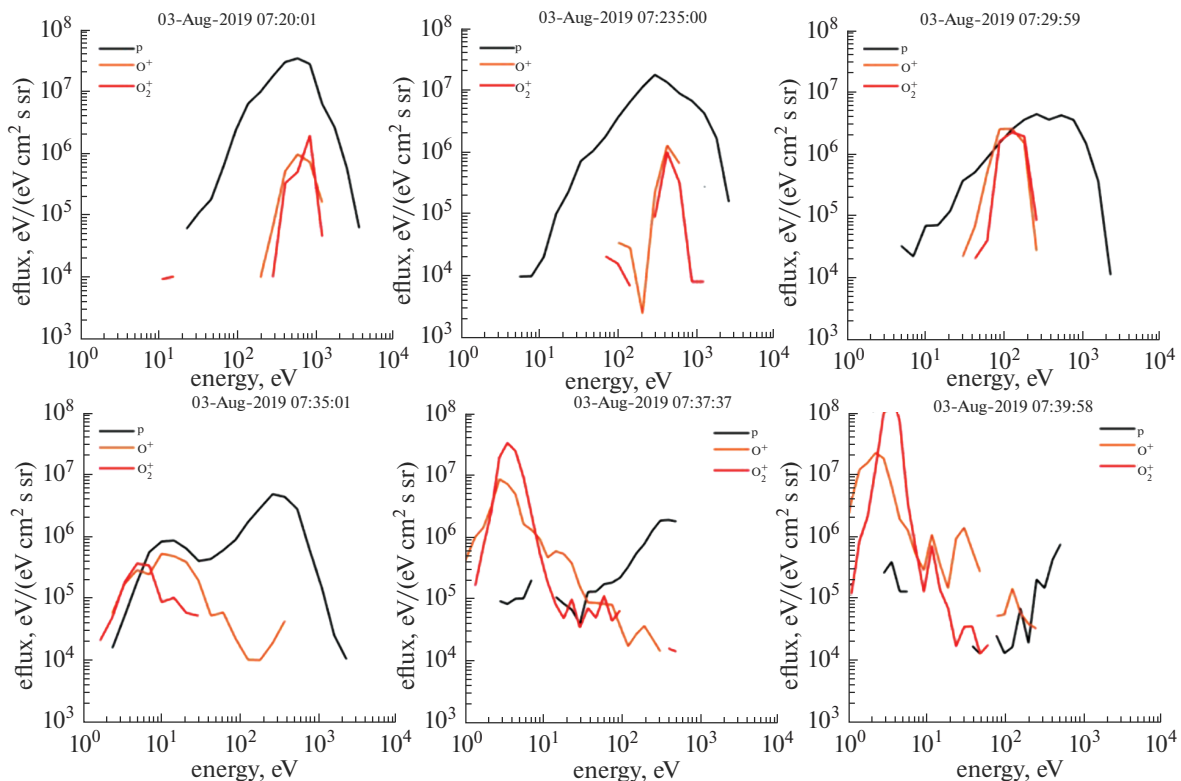


Рис. 10. Энергетические спектры протонов и тяжелых ионов в разных областях. Пики в низкоэнергичной части спектров O^+ и O_2^+ относятся к ионному плюму.

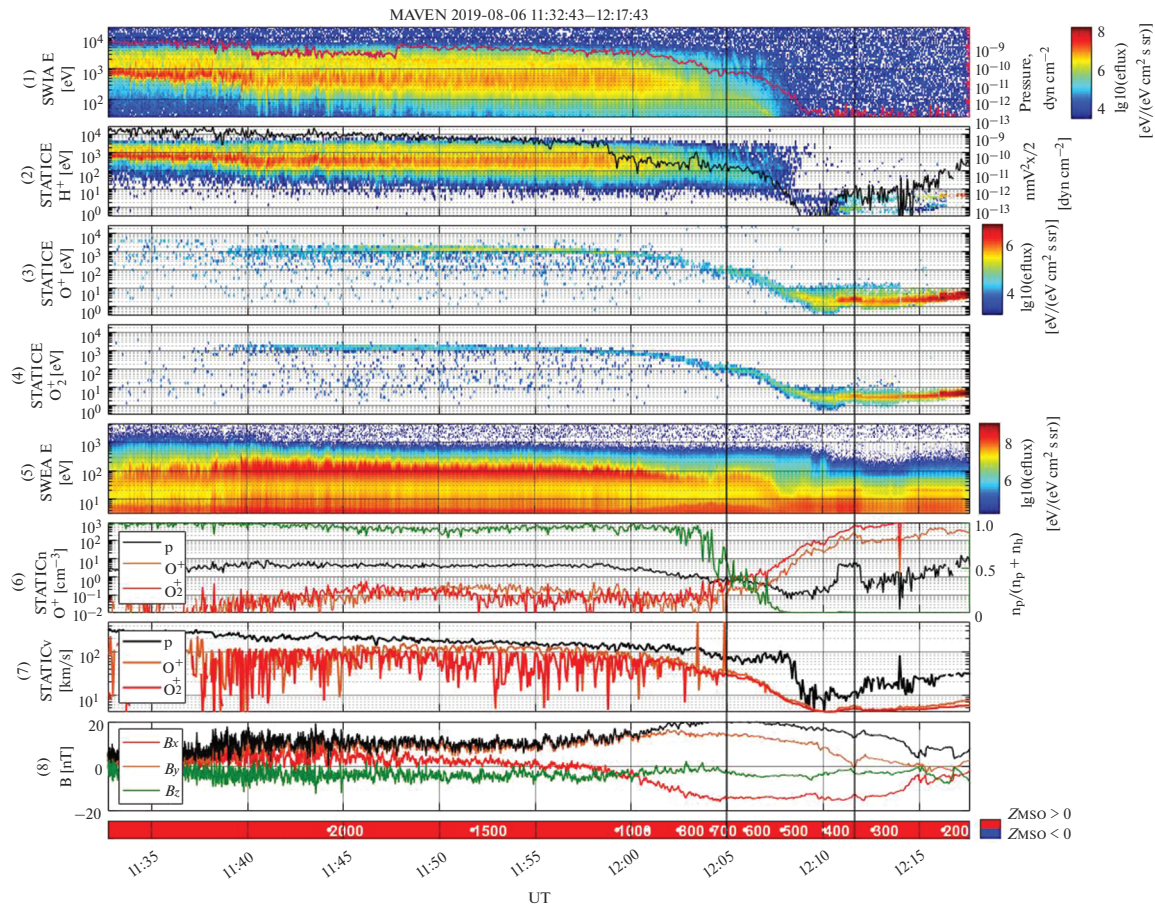


Рис. 11. Еще один пример дневной магнитосферы в случае плюма. См. подпись к рис. 2.

Мы также наблюдаем потоки захваченных солнечным ветром ионов O^+ и O_2^+ с энергиями $10 \text{ эВ} - 10^3 \text{ эВ}$ в магнитослое. Их концентрации в магнитослое довольно малы ($\sim 0.1 \text{ см}^3$), однако они монотонно возрастают по мере продвижения

космического аппарата к ионосфере и достигают $\sim 20 \text{ см}^{-3}$ в ее верхней части.

Аналогично, этот ионный компонент постепенно затухает при переходе от нагретой верхней ионосферы к обычной ионосфере в $\sim 07:42 \text{ UT}$,

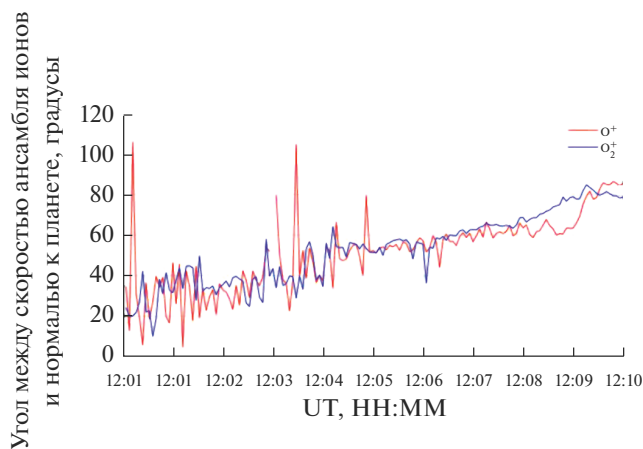


Рис. 12. Угол между объемной скоростью ионов и нормалью к поверхности планеты для ионов O^+ и O_2^+ для пересечения, представленный на рис. 11.

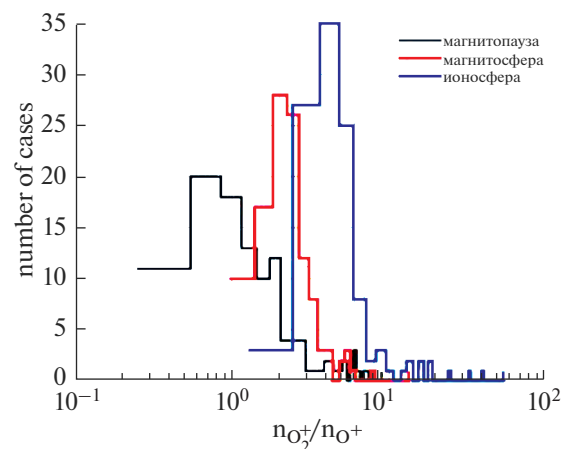


Рис. 13. Распределения $n(O_2^+)/n(O^+)$ в наблюдаемых пересечениях в магнитопаузе, магнитосфере и верхней ионосфере.

Таблица 1. Отношение концентраций ионов O_2^+ и O^+ в разных областях

Статистический параметр\область пространства	$n(O_2^+)/n(O^+)$ в магнитопаузе	$n(O_2^+)/n(O^+)$ в магнитосфере	$n(O_2^+)/n(O^+)$ в ионосфере
Среднее значение	1.8	2.4	5.8
Стандартное отклонение	1.7	1.5	7.0

что указывает на то, что плюм исходит из ионосферы.

Другой пример магнитосферы, когда наблюдается плюм, показан на рис. 11.

Используя соотношение $n_p/(n_p + n_h) \approx 0.5$, мы устанавливаем границу в 12:05:00 UT. Это время согласуется с падением общего динамического давления ионов магнитосферы в 10 раз.

Соотношение концентраций ионов O_2^+/O^+ от меньшего значения ~ 3 в магнитосфере увеличивается до ~ 8 в ионосфере. Похоже, что соотношение O_2^+/O^+ в верхней ионосфере определяется ионизацией ультрафиолетовым излучением и атмосферными процессами, такое же значение соотношения в магнитосфере определяется главным образом ионизацией ультрафиолетовым излучением.

Как и в предыдущем случае пересечения магнитосферы с особенностью плюма, объемные скорости ускоренных ионов направлены в сторону от планеты (см. рис. 12), и угол между этим направлением и нормалью к поверхности планеты уменьшается по мере ускорения частиц.

На рис. 13 и в табл. 1 показаны средние соотношения $n(O_2^+)/n(O^+)$ для трех наблюдаемых набо-

ров пересечений магнитосфер, рассмотренных в этой статье. Разброс чисел значителен, средние значения различны.

Известно, что ионы плюма исходят из ионосферы и ускоряются электрическим полем плазмы солнечного ветра (Dubinin и др., 2006 и ссылки в нем), образуя важный канал атмосферных потерь (Dong и др., 2015). Чтобы сделать приблизительную оценку высоты, с которой электрическое поле начинает ускорять ионы плюма до наблюдаемых значений энергии, мы сравнили измеренные энергии ионов в плюме с падением потенциала электрического поля между положением космического аппарата и высотой 420 км над поверхностью Марса в направлении $+Z_{MSE}$, дающим прогнозируемый прирост энергии наблюдаемых частиц в предположении ускорения частиц однородным электрическим полем, (рис. 14) для пересечения, представленного на рис. 8. Эта высота в 420 км была выбрана для наилучшего соответствия между двумя кривыми на рис. 8 и также близка к верхней границе ионосферы. Синяя линия показывает значение энергии с наибольшим измеренным дифференциальным потоком энергии в определенный момент времени. Электрическое поле было рассчитано на основе измерений плазмы солнечного ветра перед головной ударной волной Марса как $E = -(1/c)[V_{sw}B]$, где V_{sw} — измеренная с прибором STATIC скорость солнечного ветра, усредненная за интервал времени с 7:00 до 7:10 UT, а B — вектор магнитного поля, измеренный с прибором MAG и усредненный за тот же интервал времени.

В целом, кривые хорошо согласуются друг с другом. Расхождение между кривыми, наблюдаемыми при энергиях выше 100 эВ, вероятно, вызвано циклоидальным движением ионов плюма, в результате чего ионы обнаруживаются дальше от космического аппарата, чем предсказывает наша простая модель, и, соответственно, покрывают более длинный путь, получая дополнительную энергию. Видно, что ионы в модели недостаточно ускорены в левой части рисунка по сравнению с измеренной энергией ионов. По-видимому, это может быть связано с электрическим полем в магнитослое, которое не было принято во внимание и которое сильнее, чем электрическое поле невозмущенного солнечного ветра. Предложенная модель также может быть использована для оцен-

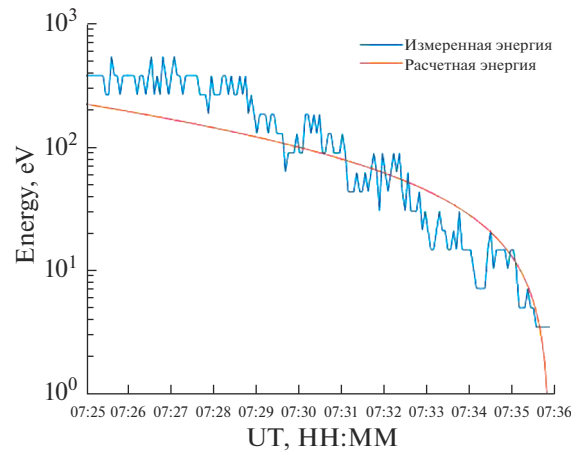


Рис. 14. Сравнение энергии в плюме (синий) и прогнозируемой энергии в предположении, что ионы плюма ускоряются индуцированным электрическим полем солнечного ветра с высоты 420 км с нулевой начальной энергией (красный).

ки высоты, с которой электрическое поле начинает ускорять ионосферные ионы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Этот анализ плазмы и магнитного поля основан на данных, полученных на MAVEN. Были проанализированы измерения плазмы и магнитного поля на 115 проходах на высоте более ~300 км в северном полушарии при солнечно-зенитных углах ~70° в течение временного интервала 27.07.2019–31.10.2019. Предыдущий анализ других наборов областей дневной стороны между магнитослоем дневной стороны и ионосферой не включал случаи с плюмом. В текущую подборку проходов дневной магнитосферы мы включили случаи плюма, и было обнаружено, что соотношение случаев без плюма (случай А) к случаям с плюмом (случай В) составило приблизительно 50%.

Предыдущий анализ (Vaisberg, Shuvalov, 2021) не выявил случаев прямого взаимодействия обтекающего потока солнечного ветра на дневной стороне планеты с ионосферой. Слой между обтекающим потоком и ионосферой был заполнен смесью нагретых ионосферных ионов O^+ и O_2^+ и захваченными и ускоренными солнечным ветром экзосферных ионов и был назван дневной магнитосферой Марса.

Более детальный анализ магнитосферной плазмы показал довольно регулярные профили (А) количественных концентраций O^+ и O_2^+ и соотношения этих ионов (см. рис. 2 и рис. 6): (1) начальное резкое увеличение в магнитопаузе с $O_2^+/O^+ \sim 1$, (2) плавное или двухступенчатое увеличение в 1.5–3 раза с изменениями $O_2^+/O^+ \sim (1-2)$ и (3) короткое увеличение O^+ , особенно O_2^+ , значительное увеличение соотношения O_2^+/O^+ , (4) равномерное или медленное повышение O_2^+ и O^+ со значениями, характерными для верхней ионосферы.

В случаях В (плюм, рис. 8 и 11) можно увидеть слой нагретого слоя ионосферы над холодной ионосферой: среднее увеличение энергии ионов до ~10 эВ на рис. 8 и до ~10² эВ на рис. 11. Эти границы соответствуют расположению препятствий, которые соответствуют падениям потока энергии магнитосферы для обоих случаев. Рис. 9 и 12 подтверждают расположение границ между потоками магнитосферы и препятствиями.

Вкратце, плюм, начинающийся на дневной стороне Марса, участвует в формировании области, которая играет ту же роль, что и дневная магнитосфера, являясь препятствием между магнитосферой и ионосферой.

О. Вайсберг выражает благодарность команде MAVEN и, особенно, руководителю проекта MAVEN профессору Брюсу Якоски за удовольствие от работы с данными MAVEN.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда 21-42-04404. Данные MAVEN общедоступны по ссылке <https://pds.nasa.gov>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Böswetter A., Simon S., Bagdonat T., Motschmann U., Fränz M., Roussos E., Krupp N., Woch J., Schüle J., Barabash S., Lundin R. Comparison of plasma data from ASPERA-3/ Mars-Express with a 3-D hybrid simulation // *Ann. Geophys.* 2007. V. 25. P. 1851–1864.
- Bogdanov A.V., Vaisberg O.L. Structure and variations of solar wind-Mars interaction region // *J. Geophys. Res.* 1975. V. 80. № 4. P. 487–494. <https://doi.org/10.1029/JA080i004p00487>
- Connerney J.E.P., Espley J.R., Lawton P., Murphy S., Odom J., Oliverson R., Sheppard D. The MAVEN magnetic field investigation // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 195. P. 257–291. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0169-4>
- Dessler A.J. Ionizing plasma flux in the Martian upper atmosphere // *Atmospheres of Venus and Mars*. NY: Gordon and Breach, 1968. 241 p.
- Dolginov Sh.Sh. The magnetosphere of Mars // *Physics of the Solar Planetary Environment 2* / Ed. Williams D.J. AGU, Boulder, 1976. p. 872.
- Dong Y., Fang X., Brain D.A., McFadden J.P., Halekas J.S., Connerney J.E., Curry S.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. № 21. P. 8942–8950. <https://doi.org/10.1002/2015GL065346>
- Dryer M., Heckman G.R. Application of the hypersonic analog to the standing shock of Mars // *Sol. Phys.* 1967. № 2. P. 112–124.
- Dubinin E., Lundin R., Fränz M., Woch J., Barabash S., Fedorov A., Winningham D., Krupp N., Sauvaud J.-A., Holmström M., Andersson H., Yamauchi M., Grigoriev A., Thocaven J.-J., Frahm R., and 25 co-authors. Electric fields within the Martian magnetosphere and ion extraction: ASPERA-3 observations // *Icarus*. 2006. V. 182. № 2. P. 337–342. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.05.022>
- Dubinin E., Modolo R., Fraenz M., Woch J., Chanteur G., Duru F., Akalin F., Gurnett D., Lundin R., Barabash S., Winningham J.D., Frahm R., Plaut J.J., Picardi G. Plasma environment of Mars as observed by simultaneous MEX-ASPERA-3 and MEX-MARSIS observations // *J. Geophys. Res.* 2008a. V. 113. № A10. <https://doi.org/10.1029/2008JA013355>
- Dubinin E., Modolo R., Fraenz M., Woch J., Duru F., Akalin F., Gurnett D., Lundin R., Barabash S., Plaut J.J., Picardi G. Structure and dynamics of the solar wind/ionosphere interface on Mars: MEX-ASPERA-3 and MEX-MARSIS observations // *Geophys. Res. Lett.* 2008b. V. 35. № 11. <https://doi.org/10.1029/2008GL033730>
- Dubinin E., Fränz M., Fedorov A., Lundin R., Edberg N., Duru F., Vaisberg O. Ion energization and escape on Mars and Venus // *Space Sci. Rev.* 2011. V. 162. P. 173–

211.
<https://doi.org/10.1007/s11214-011-9831-7>
- Espley J.R.* The Martian magnetosphere: Areas of unsettled terminology // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. V. 123. P. 4521–4525.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025278>
- Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Remizov A.P.* On electron and ion components of plasma in the antisolar part of near-Mars space // *J. Geophys. Res.* 1976. V. 81. P. 3349–3352.
- Halekas J.S., Taylor E.R., Dalton G., Johnson G., Curtis D.W., McFadden J.P., Mitchell D.L., Lin R.P., Jakosky B.M.* The solar wind ion analyzer for MAVEN // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 195. P. 125–151.
<https://doi.org/10.1007/s11214-013-0029-z>
- Halekas J.S., Ruhunusiri S., Harada Y., Collinson G., Mitchell D.L., Mazelle C., McFadden J.P., Connerney J.E.P., Espley J.R., Eparvier F., Luhmann J.G., Jakosky B.M.* Structure, dynamics, and seasonal variability of the Mars-solar wind interaction: MAVEN solar wind ion analyzer in-flight performance and science results // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017. V. 122. № 1. P. 547–578.
<https://doi.org/10.1002/2016JA023167>
- Halekas J.S., McFadden J.P., Brain D.A., Luhmann J.G., DiBarccio G.A., Connerney J.E.P., Mitchell D.L., Jakosky B.M.* Structure and variability of the Martian ion composition boundary layer // *J. Geophys. Res.* 2018. V. 123. № 10. 8439–8458.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025866>
- Holmberg M.K.G., Andre N., Garner P., Modolo R., Andersson L., Halekas J., Mazelle C., Steckiewicz M., Genot V., Fedorov A., Barabash S., Mitchell D.L.* MAVEN and MEX multi-instrument study of the dayside of the Martian induced magnetospheric structure revealed by pressure analyses // *J. Geophys. Res.* 2019. V. 124. № 11. P. 8564–8589.
<https://doi.org/10.1029/2019JA026954>
- Jakosky B.M., Grebowsky J.M., Luhmann J.L., Brain D.A.* Initial results from the MAVEN mission to Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. № 21. P. 8791–8802.
<https://doi.org/10.1002/2015GL065271>
- Kallio E., Koskinen H.* A test particle simulation of the motion of oxygen ions and the solar wind protons // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. № A1. P. 557–559.
<https://doi.org/10.1029/1998JA900043>
- Kallio E., Fedorov A., Budnik E., Säles T., Janhunen P., Schmidt W., Koskinen H., Riihelä P., Barabash S., Lundin R., Holmström M., Gunell H., Brinkfeldt K., Futaana Y., Andersson H., and 32 co-authors.* Ion escape from Mars: Comparison of a 3-D hybrid simulation with Mars Express IMA/ASPERA-3 measurements // *Icarus.* 2006. V. 182. № 2. P. 350–359.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2005.09.018>
- Kallio E., Fedorov A., Budnik E., Barabash S., Jarvinen R., Janhunen P.* On the properties of O^+ and O_2^+ ions in a hybrid model and in Mars Express IMA/ASPERA-3 data: A case study // *Planet. and Space Sci.* 2008. V. 56. № 9. P. 1204–1213.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2008.03.007>
- Liemohn M.W., Johnson B.C., Fraenz 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 Phys.* 2014. V. 119. № 12. P. 9702–9713.
<https://doi.org/10.1002/2014JA019994>
- McFadden J.P., Kortmann O., Curtis D., Dalton G., Johnson G., Abiad R., Sterling R., Hatch K., Berg P., Tiu C., Gordon D., Heavner S., Robinson M., Marckwardt M., Lin R., and 1 co-author.* MAVEN Supra-Thermal and Thermal Ion Composition (STATIC) instrument // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 195. P. 199–256.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0175-6>
- Mitchell D.L., Mazelle C., Sauvaud J.-A., Thocaven J.-J., Rouzaud J., Fedorov A., Rouger P., Toubanc D., Taylor E., Gordon D., Robinson M., Heavner S., Turin P., Diaz-Aguado M., Curtis D.W., and 2 co-authors.* The MAVEN Solar Wind Electron Analyzer (SWEA) // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 200. № 1. P. 495–528.
<https://doi.org/10.1007/s11214-015-0232-1>
- Szego K., Klimov S., Kotova G.A., Livi S., Rosenbauer H., Skalsky A., Verigin M.I.* On the dayside region between the shocked solar wind and the ionosphere of Mars // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. № A5. P. 9101–9111.
<https://doi.org/10.1029/98JA00103>
- Vaisberg O.L., Bogdanov A.V., Smirnov V.N., Romanov S.A.* On the nature of solar-wind-Mars interaction // *Solar wind interaction with planets Mercury, Venus and Mars / Ed. Ness N.F.* 1976. P. 21 NASA SP-397
- 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. № 147. P. 28–37.
- Vaisberg O., Shuvalov S.* Properties and sources of the day-side Martian magnetosphere // *Icarus.* 2021. V. 354.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.114085>
- Van Allen J.A., Frank L.A., Krimigis S.M., Hills H.K.* Absence of Martian radiation belts and implications thereof // *Science.* 1965. V. 149. № 3689. P. 1228–1233.