

УДК 523.43–1/–8

НАБЛЮДЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ МЕЖДУ ИОНОСФЕРОЙ И ОБТЕКАЮЩИМ ПОТОКОМ НА ДНЕВНОЙ СТОРОНЕ МАРСА

© 2021 г. К. И. Ким¹, *, С. Д. Шувалов¹¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

*kimki@iki.rssi.ru

Поступила в редакцию 20.02.2021 г.

После доработки 09.04.2021 г.

Принята к публикации 16.06.2021 г.

Взаимодействие солнечного ветра с плазменной оболочкой планет без собственного глобального магнитного поля имеет иной характер в отличие от аналогичного процесса у Земли за счет более близкого расположения головной ударной волны к поверхности планеты. Схожие процессы и структуры при взаимодействии солнечного ветра с плазменной оболочкой планеты можно обнаружить как у планет с глобальным магнитным полем, так и без. В данной работе проводится анализ наблюдений плазменных структур, обнаруженных в переходной области между ионосферой и обтекающим потоком, более известной как область индуцированной магнитосферы, на дневной стороне Марса по данным измерений комплекса приборов по изучению характеристик частиц и полей космического аппарата *Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN)*. Вычислена скорость наблюдаемых плазменных структур из предположения, что она совпадает со скоростью де Хоффманна–Теллера путем минимизации электрического поля в подвижной системе координат. Проверена гипотеза происхождения данных структур в процессе формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца с помощью анализа направления движения ионов H^+ , O^+ и O_2^+ в разных системах координат. Проведен анализ диаграмм рассеяния проекций скоростей в зависимости от концентрации выбранной ионной компоненты плазмы. Исходя из результатов анализа, показывается, что не все критерии детектирования выполнимы в случае процесса формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца на Марсе.

DOI: 10.31857/S0023420621060030

ВВЕДЕНИЕ

Процесс взаимодействия солнечного ветра с плазменными оболочками планет, как Марс и Венера, отличается от аналогичного процесса у Земли. Земля обладает собственным глобальным магнитным полем, которое создает барьер на пути солнечного ветра — магнитосферу. Так как поток солнечного ветра является сверхзвуковым, то при взаимодействии с магнитосферой формируется головная ударная волна, которая тормозит и нагревает поток солнечного ветра [1]. Замедленный и нагретый солнечный ветер обтекает магнитосферу, формируя обтекающий поток. Также, так как магнитное поле вморожено в солнечный ветер, силовые линии магнитного поля огибают магнитосферу планеты в той же области — обтекающем потоке. В отличие от Земли, Марс не обладает собственным глобальным магнитным полем [2], поэтому солнечный ветер взаимодействует не с магнитосферой, а с атмосферой. Предполагается, что формируется некоторый слой над атмосферой Марса, являющийся барьером на пути распространения солнечного ветра — индуциро-

ванная магнитосфера [3], с формированием головной ударной волны. При этом расстояние, на котором располагается головная ударная волна у Марса [4], значительно меньше, чем у Земли.

Солнечный ветер почти напрямую взаимодействует с ионизованным верхним слоем атмосферы Марса и это приводит к ее потере. Различают разные механизмы и каналы атмосферных потерь [5], одним из таких механизмов является образование плазменных неустойчивостей. Известно, что область обтекающего потока является источником низкочастотных волн, областью формирования плазменных структур и неустойчивостей, например, ионно-циклотронных волн, ультранизкочастотных волн в обтекающем потоке, плазменных облаков [6] и неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [7].

Неустойчивость Кельвина–Гельмгольца является неустойчивостью, формирующейся при взаимодействии двух встречных потоков жидкостей [8]. В плазме данная неустойчивость рассматривается в приближении магнитной гидродинамики, когда отношение теплового давления к маг-

нитному давлению $\beta \ll 1$. В таком случае, плазму можно рассматривать в приближении проводящей жидкости. Отличительным признаком неустойчивости Кельвина–Гельмгольца является формирование вихря, в котором происходит перемешивание двух взаимодействующих жидкостей. У Марса формирование вихря усложняется тем, что взаимодействие происходит между столкновительной ионизованной частью атмосферы – ионосферы – и бесстолкновительной плазмой солнечного ветра. Процессы переноса массы, тепла и энергии в вихрях могут играть существенную роль в атмосферных потерях на Марсе [9], Венере и планетах, у которых отсутствует собственное глобальное магнитное поле.

В данной работе проводится анализ наблюдений плазменных структур, ассоциируемых с вихрями неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, в области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса. Исследование проводится с помощью данных комплекса приборов по изучению характеристик и динамики частиц и полей космического аппарата *MAVEN*. На основе полученных данных проводится проверка ряда критериев формирования вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и оценивается размер структуры вдоль траектории космического аппарата.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ

Космический аппарат *MAVEN* был запущен 18.XI.2013, вышел на орбиту Марса 22.IX.2014. Основные решаемые научные задачи включают в себя: изучение процессов, приводящих к потере Марсом атмосферы и процесса взаимодействия солнечного ветра с плазменной оболочкой Марса. Космический аппарат имеет эллиптическую орбиту с высотой перигентра 150 км и высотой апоцентра 6200 км со средним периодом обращения 4.5 ч. В наших исследованиях мы используем измерения ионного анализатора *STATIC* [10], анализатора электронов солнечного ветра *SWEA* [11] и магнитометра (*MAG*) [12] из комплекса по изучению характеристик и динамики частиц и полей *MAVEN*.

Ионный анализатор *STATIC* является прибором с тороидальным электростатическим анализатором и времяпролетной секцией. Поле зрения прибора *STATIC* составляет 360° по азимутальному и 90° по полярному углу с угловым разрешением 22.5° и 22.5° по азимутальному и полярному углу соответственно. Кроме того, поле зрения прибора при необходимости может быть уменьшено путем подачи дополнительного потенциала на дефлекторы. Диапазон измеряемых энергий ионов составляет от 0.1 эВ до 30 кэВ с энергетическим разрешением 15%, которое охватывает энергии экзосферных и атмосферных ионов. Прибор

STATIC способен измерять массы ионов в диапазоне от 1 до 70 а. е. м. с массовым разрешением, равным 4, в том числе ионы H^+ , He^+ , O^+ , O_2^+ и CO_2^+ .

Анализатор электронов солнечного ветра *SWEA* является прибором с электростатическим анализатором. Прибор также имеет дефлекторы, контролирующие поле зрения. Поле зрения прибора *SWEA* составляет 360° по азимутальному и 120° по полярному углу с угловым разрешением 22.5° и 20° по азимутальному и полярному углу соответственно. Диапазон измеряемых энергий электронов составляет от 5 эВ до 4.6 кэВ с разрешением 17% энергии.

Магнитометр *MAG* это датчик, который измеряет три компоненты магнитного поля с частотой 32 Гц. Измерения охватывают значения магнитного поля в невозмущенном солнечном ветре, области индуцированной магнитосферы и аномалиях магнитного поля в южном полушарии Марса.

В совокупности, одновременное использование данных приборов позволяет изучать энерго-масс-угловые функции распределения ионов солнечного ветра, марсианской экзосферы и атмосферы, энерго-угловые функции распределения электронов солнечного ветра и атмосферы, конфигурацию межпланетного магнитного поля, обтекающего потока, хвоста и магнитных аномалий.

НАБЛЮДЕНИЕ

Выбрано несколько пролетов с пересечениями области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса с большими солнечно-зенитными углами без влияния магнитных аномалий (рис. 1). На рис. 2 показано наиболее интересное пересечение. В промежутке времени между 14.41 и 15.01 UT 5.XI.2017 обнаружена сильно возмущенная область с нагретыми ионами O^+ и O_2^+ , вытянутые из ионосферы в обтекающий поток. Ионосфера, наблюдаемая с 14.41 по 14.45 UT, характеризуется высоким дифференциальным потоком энергии тяжелых ионов O^+ и O_2^+ , относительно спокойным магнитным полем и наличием низкоэнергичных электронов. Наблюдаемая область в интервале времени с 14.59 до 15.01 UT является обтекающим потоком и характеризуется наличием сильно осциллирующего магнитного поля, высоким дифференциальным потоком энергии и широким энергетическим спектром легких ионов H^+ . Траектория космического аппарата показывает, что начало наблюдений соответствует ионосфере, продолжается в возмущенной области и заканчивается в области обтекающего потока. Видно, что в интервале времени от 14.45 до 14.59 UT в области между ионосферой и обтекающим потоком наблюдаются периодические плазменные структуры, состоящие преимущественно из тяжелых ионов O^+ и O_2^+ . Диапазон

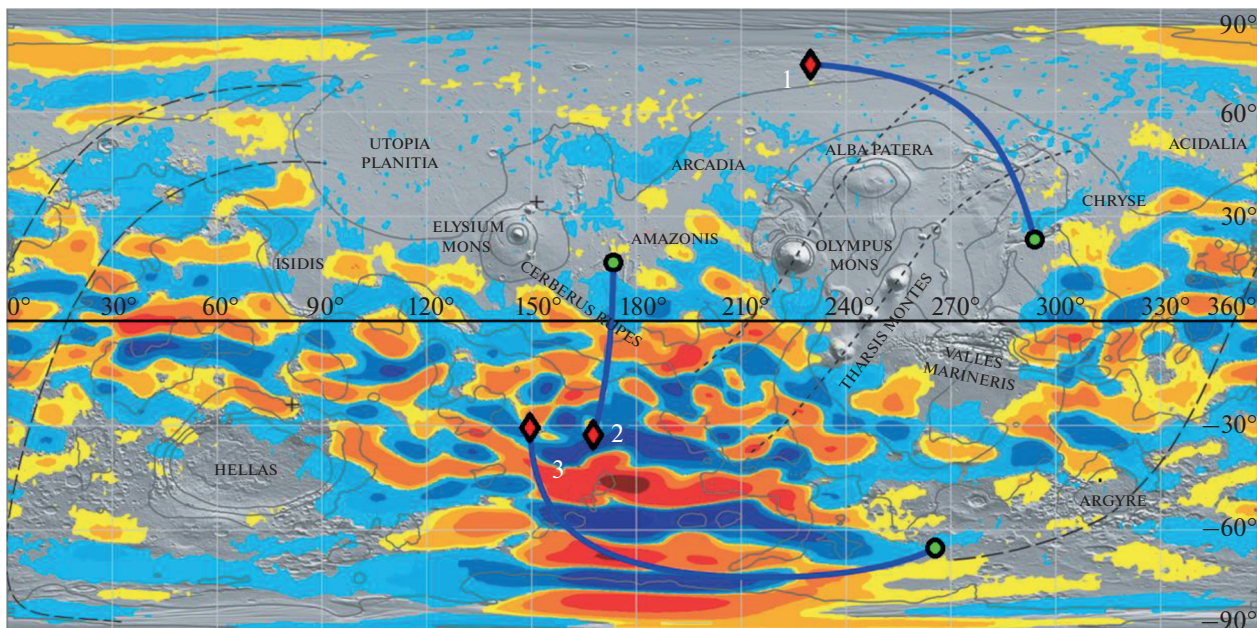


Рис. 1. Проекция траекторий космического аппарата *MAVEN* на поверхность Марса, в которых наблюдались похожие плазменные структуры. Круг означает начало измерений, ромб – конец. Цифрами указаны: 1) наблюдение, анализируемое с текущей работе, 2) наблюдение вихрей неустойчивости Кельвина–Гельмгольца [7], 3) наблюдение плазменных облаков [6]. Видно, что область наблюдений текущей работы находится вне зоны магнитных аномалий на южном полушарии Марса.

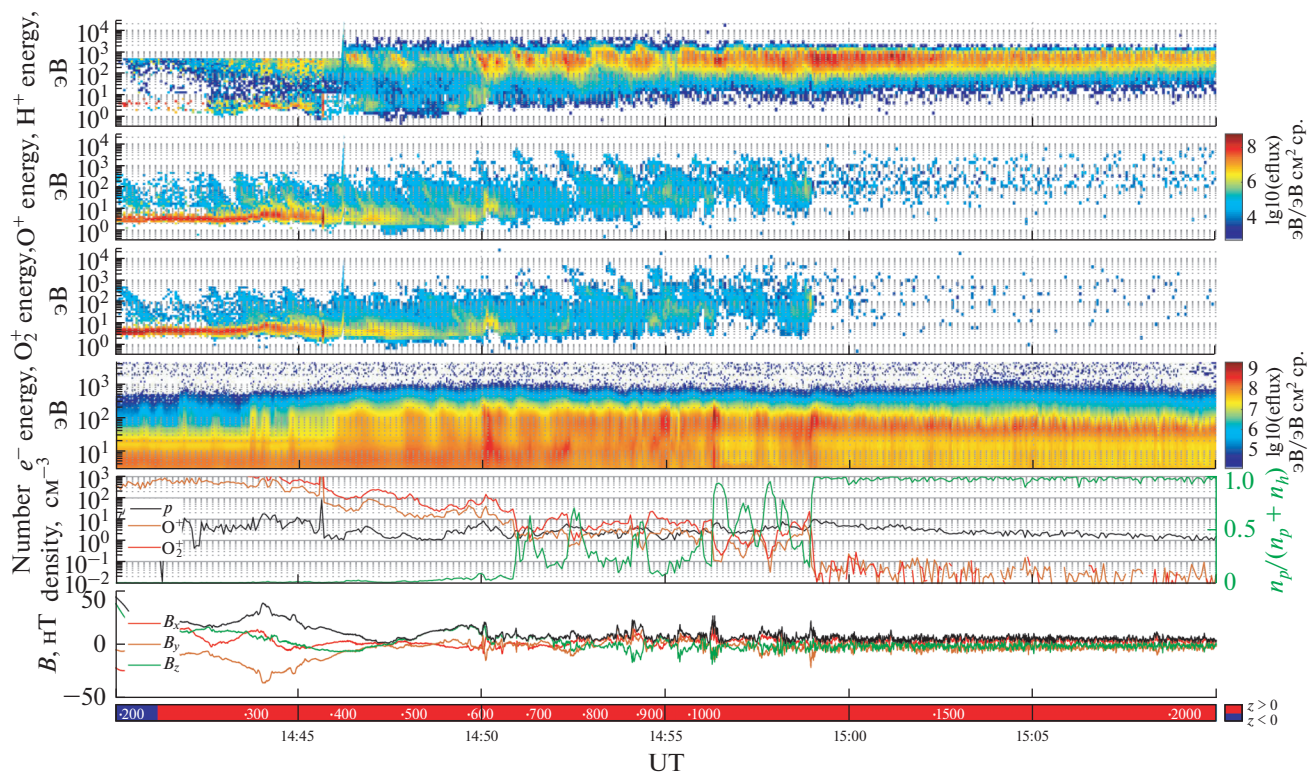


Рис. 2. Наблюдение плазменных структур 5.XI.2017 в интервале времени от 14.40 до 15.10 UT. Сверху вниз: диаграмма энергия–время для ионов H^+ , O^+ , O_2^+ и e^- , на шкале справа выделен дифференциальный поток энергии [$\text{эВ эВ}^{-1} \text{с}^{-1} \text{рад}^{-1} \text{см}^{-2}$]; концентрация [см^{-3}] ионов H^+ , O^+ и O_2^+ ; три компоненты магнитного поля [нТ] в MSO.

энергий тяжелых ионов в данных структурах варьируется от нескольких эВ до кэВ на временном масштабе одной минуты. Наблюдаемые колебания отношения концентрации легких ионов к суммарной концентрации тяжелых ионов $n_{H^+}/(n_{O^+} + n_{O_2^+})$ наиболее ярко выражены в промежутке времен с 14.51 до 14.59 UT. Также наблюдаются периодические вариации энергетического спектра легких ионов H^+ с примерно тем же периодом, что и масштаб вариаций энергетического спектра тяжелых ионов.

Чтобы сопоставить наблюдение с некоторым физическим процессом в наблюдаемой области, необходимо ответить на следующие вопросы:

– какие физические условия и процессы приводят к формированию данных плазменных структур?

– каков источник тяжелых ионов O^+ и O_2^+ ?

– каков механизм ускорения тяжелых ионов O^+ и O_2^+ до скоростей, сопоставимых со скоростями обтекающего потока?

– каковы пространственные масштабы структуры?

АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЯ

Похожие плазменные структуры уже наблюдались в других работах, посвященных изучению плазменных структур и неустойчивостей в плазменной оболочке Марса [6, 7], однако эти измерения были проведены в областях с магнитными аномалиями. Области магнитных аномалий, находящиеся в южном полушарии Марса, создают локальную магнитосферу, которая влияет на динамику окружающей плазмы [13]. К тому же известно, что плазма в обтекающем потоке на больших солнечно-зенитных углах неустойчива [14], что приводит к формированию различных структур, в том числе вихрей неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Плазма обтекающего потока, состоящая из ионов солнечного ветра (95% H^+ и 5% He^+), проникает внутрь ионосферы, взаимодействуя с ионосферными ионами O^+ и O_2^+ . Ускоренные ионосферные ионы O^+ и O_2^+ под действием центробежной силы вытягиваются из ионосферы в обтекающий поток, формируя вихрь. Возможными критериями детектирования развитых вихрей Кельвина–Гельмгольца на Марсе являются [6]:

– ионы обтекающего потока, относящиеся к верхней части вихря, имеют скорость выше средней скорости ионов обтекающего потока и двигаются по направлению от Солнца;

– ионы обтекающего потока, относящиеся к нижней части вихря, имеют скорость ниже сред-

ней скорости ионов обтекающего потока и двигаются по направлению к Солнцу;

– ионы ионосферы имеют скорость выше тепловой скорости ионов в ионосфере и двигаются по направлению от Солнца со скоростью выше начальной.

Данные критерии согласуются с процессом формирования вихря неустойчивости Кельвина–Гельмгольца в магнитогидродинамическом приближении, когда два потока плазмы за счет разницы скоростей и вязкости начинают вращаться вокруг общего центра масс под действием центробежных сил. В работе предполагается, что наблюдаемые плазменные структуры есть вихри неустойчивости Кельвина–Гельмгольца и дальнейшие процедуры будут направлены на проверку данного утверждения.

В первую очередь нас интересует скорость центра масс наблюдаемых плазменных структур. Существует несколько подходов к определению данного параметра: через вычисление среднего значения между скоростью ионов обтекающего потока и ионосферных ионов [15] и через вычисление скорости системы координат де Хоффманна–Теллера [16]. В данной работе используется второй подход, который позволяет переводить динамические структуры в статические структуры. В системе координат де Хоффманна–Теллера по определению электрическое поле минимально, соответственно, чтобы найти скорость данной системы координат необходимо найти минимум следующего функционала (1):

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{v}^{(i)} - \mathbf{V}) \times \mathbf{B}^{(i)} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $\mathbf{v}^{(i)}, \mathbf{B}^{(i)}$ – измеренные в системе координат MSO три компоненты скорости ионов H^+ обтекающего потока [км/с] и три компоненты магнитного поля [нТ] в i -й момент времени. Выбор ионов H^+ в качестве основных носителей электрического поля связан с вопросом роли электрического поля солнечного ветра с ускорением тяжелых ионосферных ионов. Минимум значения функционала (1) по определению дает значение скорости $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{dHT}$ системы координат де Хоффманна–Теллера, и для упомянутых наблюдений эта скорость составляет около 120 км/с в приближении равномерного движения. На рис. 3 представлено сравнение значений электрического поля, определенного как $-\mathbf{V}_{dHT} \times \mathbf{B}$, и электрического поля в солнечном ветре. Коэффициенты корреляции для каждой проекции электрического поля составляет $c_{x, \text{const}} = 0.68$, $c_{y, \text{const}} = 0.91$, $c_{z, \text{const}} = 0.77$. Таким образом можно сделать вывод, что скорость центра масс, с которой наблюдаемые плазменные структуры пролетают мимо космического аппарата, составляет 120 км/с. Вы-

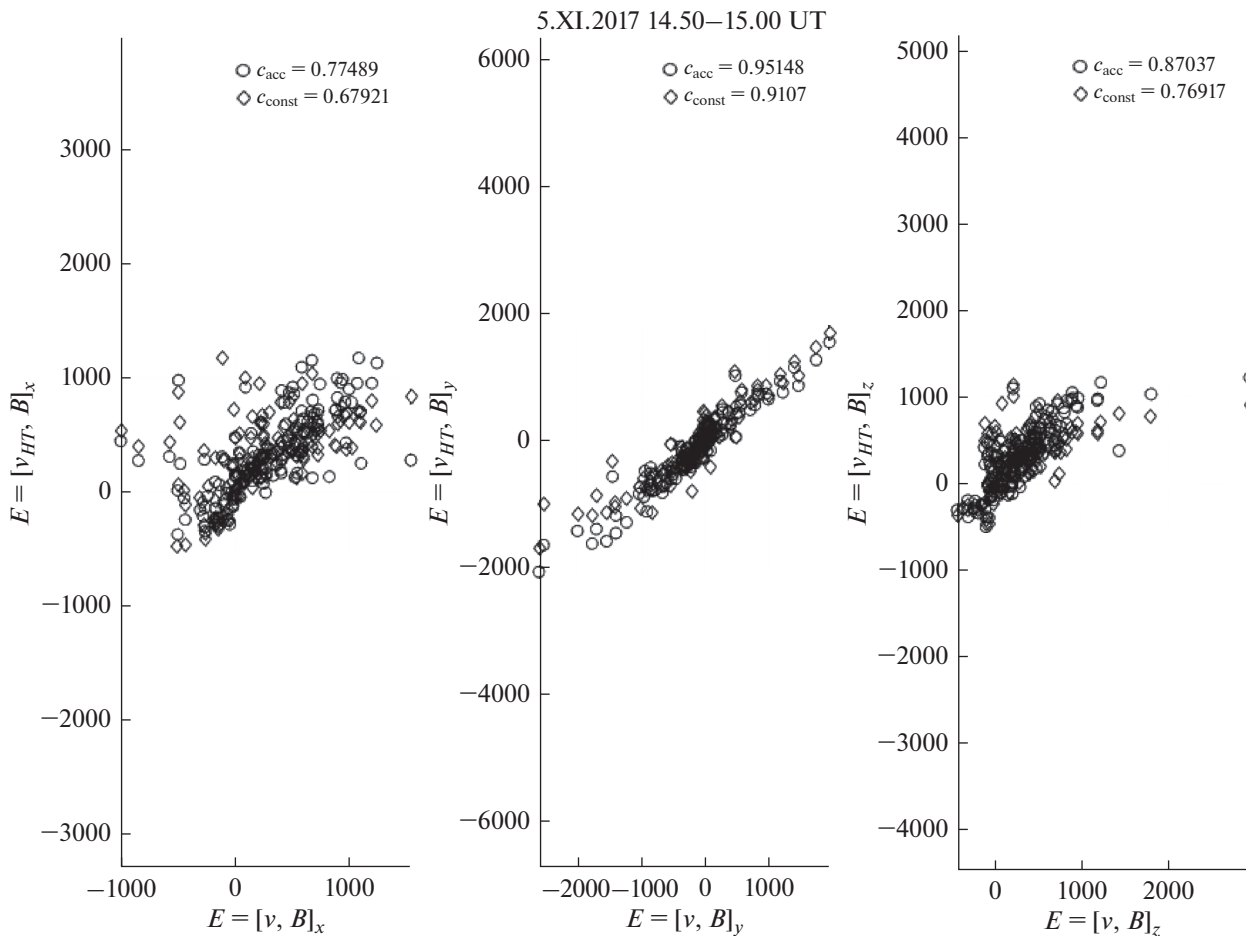


Рис. 3. Диаграмма рассеяния электрического поля, вычисленного через скорость де Хоффманна–Теллера, относительно вычисленного в солнечном ветре электрического поля. Ромбом выделены точки для модели равномерного движения структуры, кругом – для модели ускоренного движения структуры.

численная скорость превышает тепловую скорость ионосферных ионов O^+ и O_2^+ , составляющую при одинаковой температуре ~ 2 и 4 км/с соответственно, и скорость космического аппарата, которая составляет для выбранного интервала времени около 5 км/с, но меньше скорости обтекающего потока (~ 200 км/с), что согласуется с первым подходом. Зная скорость и время наблюдения плазменных структур, возможна оценка размера структуры вдоль направления регистрации. Так как период регистрации плазменных структур составляет 1 мин, то оцениваемый размер структуры вдоль направления регистрации составляет около 7200 км или $2.1 R_M$ (радиус Марса $R_M = 3390$ км). Полученный результат не соответствует физическим представлениям о развитии плазменных неустойчивостей и структур. Соответственно, можно сделать вывод, что время вариации скорости наблюдаемых структур намного меньше масштаба времени измерений. Это означает, что наблюдаемая структура движется с ускорением. Вычисление минимума функционала (1) с помощью двухпараметрической модели (2) позволяет учесть эффект ускоренного движения структуры:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0 + \mathbf{a}_0 t, \quad (2)$$

где \mathbf{V}_0 – начальная скорость [км/с], \mathbf{a}_0 – начальное ускорение [км/с²]. Значения начальной скорости и начального ускорения, соответствующих минимуму функционала (1), равны $\mathbf{V}_0 = (-35.73, -36.61, 28.94)$ и $\mathbf{a}_0 = (-0.16, 0.13, 0.20)$ соответственно. Коэффициенты корреляции для каждой проекции скорости составляет $c_{x,acc} = 0.78$, $c_{y,acc} = 0.95$, $c_{z,acc} = 0.87$, что очевидно лучше, чем для приближения равномерной скорости движения структуры. При этом вычисленные размеры структуры составляют 3763 км или $1.1 R_M$.

Направление скоростей ионов обтекающего потока и ионосферы играет одну из ключевых ролей в идентификации того, что мы действительно наблюдаем вихри неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. На рис. 4 изображены проекции скоростей ионов H^+ , O^+ и O_2^+ в системе координат

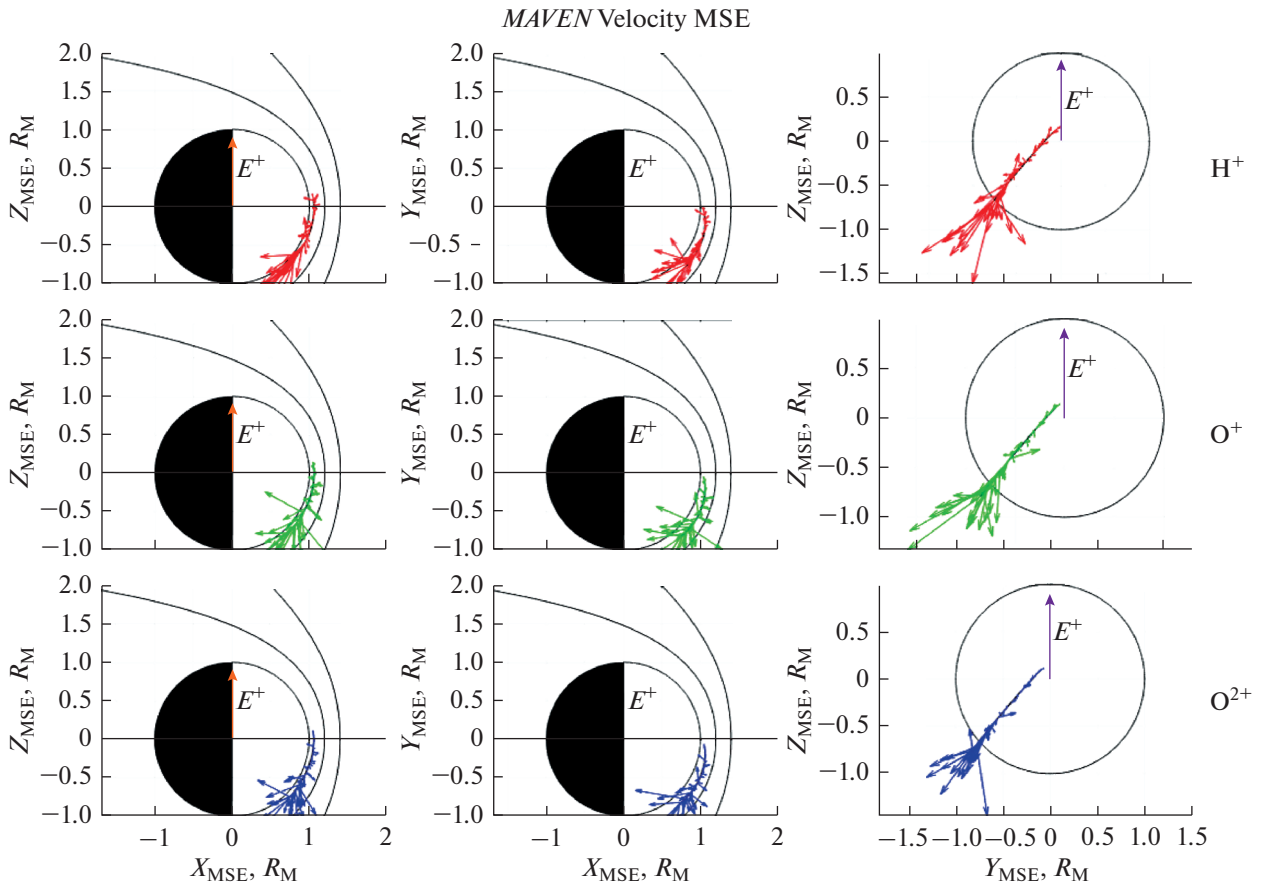


Рис. 4. Проекция скоростей ионов в системе координат MSE. Сверху вниз изображены ионы H^+ , O^+ и O_2^+ .

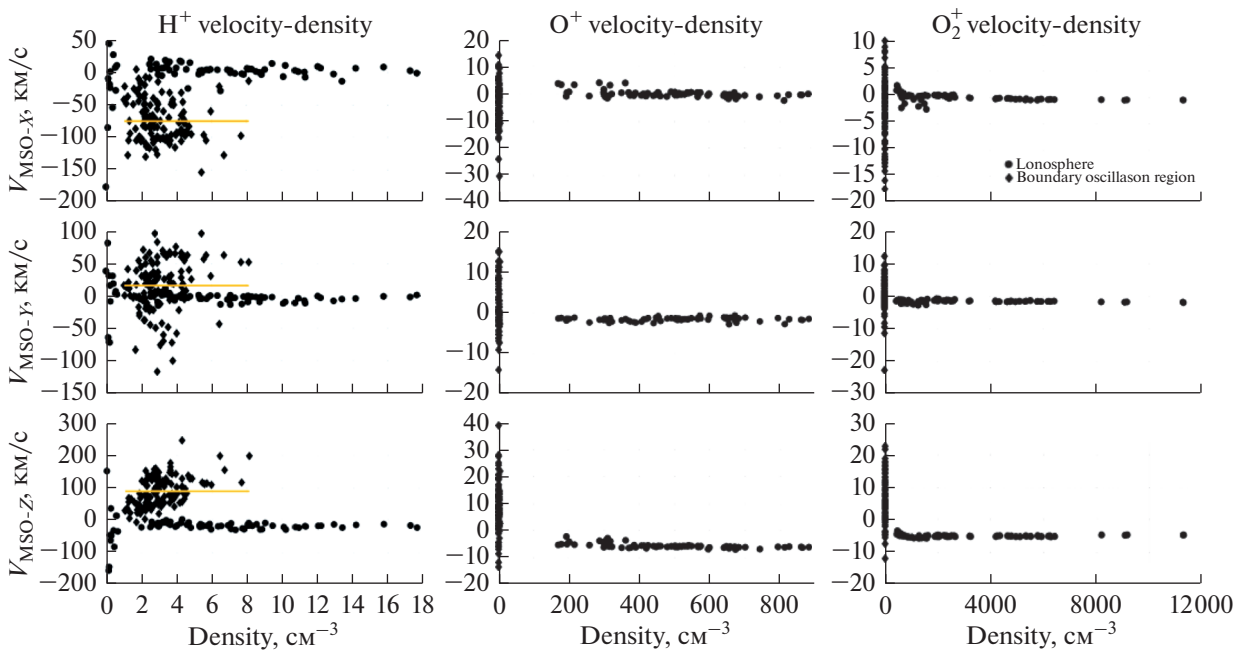


Рис. 5. Диаграмма рассеяния проекции скорости ионов H^+ , O^+ и O_2^+ относительно концентрации для наблюдения от 5.XI.2017 14.40–15.10 UT.

Марс—Солнце—Электрическое поле (MSE) для выбранного момента времени. Система координат MSE построена таким образом, что ось Ox направлена на Солнце, ось Oz направлена вдоль направления электрического поля в солнечном ветре, а ось Oy дополняет базис до правой тройки. В выбранный интервал времени траектория космического аппарата такова, что он не регистрирует солнечный ветер, однако направление электрического поля в солнечном ветре можно с некоторой точностью вычислить в обтекающем потоке [17]. В такой системе координат величина скоростей ионов не изменится, однако направление скоростей будет указывать на его связь с направлением электрического поля. Отсюда можно сделать вывод о том, насколько электрическое поле связано с ускорением тяжелых ионов до скоростей сопоставимых со скоростями ионов обтекающего потока. Из орбиты видно, что источником тяжелых ионов O^+ и O_2^+ в возмущенной области является ионосфера. Также видно, что направления скоростей ионов H^+ , O^+ и O_2^+ в редких случаях имеют положительную z -компоненту. Это означает, что электрическое поле солнечного ветра в процессе ускорения тяжелых ионов играет минимальную роль и за ускорение тяжелых ионов ответственен другой механизм. Также стоит отметить наличие тяжелых ионов с направлениями скоростей по направлению к Солнцу, что можно интерпретировать как нижнюю часть вихря, относящуюся к ионосферным ионам. В направлении движения легких ионов преобладает направление против Солнца.

Еще одним способом доказать, что наблюдаемая плазменная структура есть вихрь неустойчивости Кельвина—Гельмгольца, является диаграмма рассеяния проекции скорости—концентрация [18]. В оригинальной статье интервал наблюдений разбивается на область магнитосферы и обтекающего потока, однако у Марса отсутствует магнитосфера, поэтому интервал наблюдений разбивается на область наблюдений ионосферы и возмущенной области. В каждой области для каждой ионной компоненты рассматриваемой структуры строится диаграмма рассеяния проекции скорости относительно концентрации выбранной компоненты. Затем вычисляется средняя скорость в каждой проекции скорости, относительно которой сравнивается распределение ионов в каждой области. В то время как в ионосфере средняя скорость равняется нулю с ненулевыми отклонениями, связанной с тепловым движением ионов, в обтекающем потоке средняя величина проекции скорости отлична от нуля. Ожидается, что распределение относительно среднего значения будет симметричным в силу равномерности распределения по скоростям, однако в случае вихря неустойчивости Кельвина—

Гельмгольца наблюдается перевес в сторону увеличения скорости, который связан с формированием вихря. Как видно из рис. 4 распределение симметричное, что говорит не в пользу гипотезы детектирования вихря неустойчивости Кельвина—Гельмгольца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе наблюдаемые в переходной области между ионосферой и обтекающим потоком на дневной стороне Марса плазменные структуры ассоциируются с вихрями неустойчивости Кельвина—Гельмгольца. Основные критерии связанные с направлением движения ионов H^+ , O^+ и O_2^+ частично соответствуют наблюдениям.

Промежуточный анализ показал, что наблюдаемые плазменные структуры в выбранный момент времени двигаются с ускорением от 60 до 220 км/с. С учетом того, что период наблюдений составляет 1 мин, то оцениваемые размеры наблюдаемых плазменных структур соответствуют $1.1 R_M$.

Также в данных плазменных структурах наблюдается часть тяжелых ионов, ускоренных до скоростей обтекающего потока. Механизм ускорения на данный момент не известен, однако выяснено, что электрическое поле солнечного ветра в процессе ускорения на временном масштабе 1 мин играет минимальную роль. Возможным объяснением наличия в наблюдаемой области ионов O^+ и O_2^+ со скоростями, эквивалентными скоростям обтекающего потока, является процесс захвата ионами H^+ обтекающего потока ионосферных ионов, вытесненных из ионосферы в процессе формирования вихря Кельвина—Гельмгольца.

Неполное удовлетворение критериям можно объяснить особенностью траектории спутника, который движется не по касательной к предполагаемой области формирования вихрей и особенностью поля зрения ионного спектрометра STATIC. В добавок траектория спутника в конкретном наблюдении не позволяет оценить характеристики солнечного ветра. В дальнейшем исследовании возможно использовать данные космического аппарата *Mars Express (MEX)*, имеющего ионный спектрометр плазменного комплекса ASPERA-3, который в некоторые интересующие нас моменты времени может находиться в солнечном ветре. Таким образом возможно вычислить моменты функции распределения ионов солнечного ветра, например, скорость, температуру и концентрацию. Однако, к сожалению, у *MEX* отсутствует магнитометр, что делает затрудненным изучение распространяющихся в межпланетном пространстве возмущений и магнитных структур, которые потенциально могут быть источниками плазменных структур в наблюдаемой области у Марса.

Авторы статьи выражают благодарность Российскому научному фонду (РНФ). Работа выполнена в рамках гранта РНФ 21-42-04404 “Венера и Марс в потоке солнечного ветра. Сравнительное исследование.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wolfe J.H., Intriligator D.S.* The solar wind interaction with the geomagnetic field // *Space Science Review*. 1970. V. 10. P. 511–596.
2. *Acuna M.H.* The magnetic field of Mars // *Leading edge*. 2003. V. 22. P. 769–771.
3. *Halekas J.S., Brain D.A., Luhmann et al.* Flows, fields, and forces in the Mars-solar wind interaction // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. № 11. P. 320–341. <https://doi.org/10.1002/2017JA024772>
4. *Trotignon J.G., Mazelle C., Bertucci C., Acuña M.H.* Martian shock and magnetic pile-up boundary positions and shapes determined from the *Phobos 2* and *Mars Global Surveyor* data sets // *Planetary and Space Science*. 2006. V. 54. № 4. P. 357–369. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.01.003>
5. *Ramstad R., Barabash S., Futaana Y. et al.* Ion escape from Mars through time: An extrapolation of atmospheric loss based on 10 years of Mars Express measurements // *J. Geophys. Res. Planets*. 2018. V. 123. P. 3051–3060. <https://doi.org/10.1029/2018JE005727>
6. *Halekas J.S., Brain D.A., Ruhunusiri et al.* Plasma clouds and snowplows: Bulk plasma escape from Mars observed by *MAVEN* // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 1426–1434. <https://doi.org/10.1002/2016GL067752>
7. *Ruhunusiri S. et al.* MAVEN observations of partially developed Kelvin-Helmholtz vortices at Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 4763–4773. <https://doi.org/10.1002/2016GL068926>
8. *Chandrasekhar S.* Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. N.Y.: Oxford Univ. Press, 1961.
9. *Johnson J.R., Wing S., Delamere P.A.* Kelvin Helmholtz Instability in Planetary Magnetospheres // *Space Science Review*. 2014. V. 184. P. 1–31. <https://doi.org/10.1007/s11214-014-0085-z>
10. *McFadden J.P., Kortmann O., Curtis D. et al.* MAVEN SupraThermal and Thermal Ion Composition (STATIC) Instrument // *Space Science Review*. 2015. V. 195. P. 199–256. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0175-6>
11. *Mitchell D.L., Mazelle C., Sauvaud J.A. et al.* The MAVEN Solar Wind Electron Analyzer // *Space Science Review*. 2016. V. 200. P. 495–528. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0232-1>
12. *Connerney J.E.P., Espley J., Lawton P. et al.* The MAVEN Magnetic Field Investigation // *Space Science Review*. 2015. V. 195. P. 257–291. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0169-4>
13. *Fang X. et al.* The Mars crustal magnetic field control of plasma boundary locations and atmospheric loss: MHD prediction and comparison with MAVEN // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122. P. 4117–4137. <https://doi.org/10.1002/2016JA023509>
14. *Penz T., Erkaev N.V., Biernat H.K. et al.* Ion loss on Mars caused by the Kelvin-Helmholtz instability // *Planetary and Space Science*. 2004. V. 52. № 13. P. 1157–1167. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2004.06.001>
15. *Hasegawa H. et al.* Kelvin-Helmholtz waves at the Earth’s magnetopause: Multiscale development and associated reconnection // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. A12207. <https://doi.org/10.1029/2009JA014042>
16. *Khrabrov A.V., Sonnerup B.U.Ö.* DeHoffmann-Teller analysis, in *Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data*. N.Y.: Springer, 1998.
17. *Hurley D.M., Dong Y., Fang X. et al.* A proxy for the upstream IMF clock angle using MAVEN magnetic field data // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2018. V. 123. P. 9612–9618. <https://doi.org/10.1029/2018JA025578>
18. *Hasegawa H., Fujimoto M., Takagi K. et al.* Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A09203. <https://doi.org/10.1029/2006JA011728>