

УДК 523.4

## КИНЕТИЧЕСКАЯ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛЬ ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ И АТОМОВ ВОДОРОДА С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГИЯМИ В АТМОСФЕРУ МАРСА С УЧЕТОМ ИЗМЕРЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

© 2019 г. В. И. Шематович<sup>1\*</sup>, Д. В. Бисикало<sup>1</sup>, Ж.-К. Жерар<sup>2</sup>, Б. Хубер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт астрономии РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт астрофизики и геофизики, Льежский университет, Льеж, Бельгия

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.; после доработки 31.05.2019 г.; принята к публикации 31.05.2019 г.

Представлены результаты модельных расчетов взаимодействия с марсианской атмосферой высыпающихся протонов и атомов водорода ( $H/H^+$ ) с высокими энергиями. Использована модификация кинетической модели Монте-Карло, разработанной ранее для анализа данных измерений инструментов MEX/ASPERA-3 на борту космического аппарата (КА) Mars Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN. В представленной модификации модели впервые учтена произвольная (трехмерная) структура магнитного поля Марса. При наличии локальных измерений всех трех компонент магнитного поля теперь можно описать не только поток протонов, проникающих в атмосферу, но и деградацию потока частиц  $H/H^+$  вдоль орбиты КА, а также образование рассеянных атмосферой восходящих потоков протонов и атомов водорода. Сравнение результатов моделирования и измерений потоков протонов на малых высотах позволяет сделать вывод об эффективности процессов перезарядки между солнечным ветром и протяженной водородной короной Марса. Также обнаружено, что индуцированное магнитное поле играет важную роль в формировании обратного (рассеянного атмосферой) потока протонов и фактически контролирует его величину.

**DOI:** 10.1134/S0004629919100050

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитосфера Марса не похожа ни на одну другую магнитосферу объектов Солнечной системы, хотя и имеет общие черты с магнитосферами некоторых объектов Солнечной системы. У Марса отсутствует сильное собственное магнитное поле, что позволяет солнечному ветру напрямую взаимодействовать с его экзосферой и верхней атмосферой. Тем не менее Марс обладает остаточными магнитными полями планетной коры и индуцированными полями, достаточно сильными, чтобы влиять на процесс взаимодействия солнечного ветра с атмосферой. Кроме того, относительно слабая гравитация Марса позволяет сформировать протяженную водородную экзосферу, которая взаимодействует с невозмущенным солнечным ветром перед планетой, искажая параметры ветра. Конечным результатом является сложная и сильно изменяющаяся магнитосфера со смесью индуцированных и внутренних магнитных полей. Наблюдения с помощью прибора “Спектроскопия

для исследования характеристик атмосферы Марса” (SPICAM) на борту космического аппарата Mars Express (MEX) [1–3] и ультрафиолетового спектрографа для визуализации (IUVS) на борту космического аппарата “Марсианская атмосфера и эволюция летучих компонентов” (MAVEN) [4, 5] зафиксировали широкий круг авроральных явлений, включающий три типа полярных сияний на Марсе, причем два из них (диффузное электронное и протонное сияния) сильно отличаются от сопоставимых типов на Земле и других планетах.

Природа зарегистрированных на ночной стороне Марса двух типов ультрафиолетовых авроральных свечений, возбуждаемых энергичными электронами, имеет явно выраженные особенности. Первый тип, так называемое дискретное сияние, обусловлен наличием остаточного магнитного поля в южном полушарии [1, 2]. Основные характеристики дискретных сияний были выявлены из наблюдений, выполненных с помощью прибора SPICAM на борту КА Mars Express [6]. Второй тип марсианского полярного сияния, так называемое диффузное сияние, наблюдался несколько раз при

\*E-mail: shematov@inasan.ru

помощи спектрографа MAVEN/IUVS в диапазоне длин волн от 110 до 340 нм [4]. Его яркость достигает пика на высоте около 65 км, что значительно ниже высоты пика (~140 км) для дискретного сияния [7]. По-видимому, возникновение этого диффузного сияния напрямую связано с усилением солнечной активности в дальнем ультрафиолете и высыпанием электронов с высокими энергиями (до 200 кэВ) в верхнюю атмосферу Марса [8]. Диффузные полярные сияния охватывают большую часть планеты по сравнению с очень локализованным дискретным сиянием, и их длительность также намного больше. Это имеет существенное значение для энергетического баланса верхней и средней атмосферы Марса [9].

В наблюдениях с помощью инструмента MEX/SPICAM [3] и спектрографа MAVEN/IUVS [5] был открыт третий тип, так называемые протонные сияния. В отличие от электронных полярных сияний, протонные сияния наблюдаются исключительно на дневной стороне Марса и характеризуются повышенной яркостью излучения водорода в линии Ly- $\alpha$  (121.6 нм) в диапазоне высот 120–150 км при наблюдениях в лимбе [5]. В пике свечения наблюдается повышение яркости на 50% (по сравнению с оптически толстым фоном дневных свечений в течение дня) с максимальной продолжительностью до нескольких часов. Эти события сильно коррелируют с активностью солнечного ветра и популяцией проникающих в термосферу протонов солнечного ветра, ранее идентифицированных инструментом MAVEN/SWIA — анализатором ионов солнечного ветра (SWIA) на борту КА MAVEN [10].

Имеющиеся наблюдения трех типов сияний на Марсе развеивают распространенное заблуждение о том, что полярное сияние возникает только вблизи магнитных полюсов. Это, несомненно, верно для полярных сияний на Земле и дискретных сияний на Марсе, однако это не так в случае диффузных и протонных сияний на Марсе. В этом смысле Марс может служить очень хорошей лабораторией для изучения процессов высыпания частиц с высокими энергиями и вызванных ими авроральных свечений на планетах без глобального магнитного поля в нашей Солнечной системе и за ее пределами.

Экзосфера (или корона) Марса в основном населена атомарным и молекулярным водородом и простирается на несколько марсианских радиусов [11]. Соответственно протоны солнечного ветра сталкиваются с нейтральным водородом в протяженной короне и после перезарядки образуют поток быстрых атомов водорода с распределением по энергии, аналогичным исходному спектру кинетических энергий солнечного ветра. Величина потока

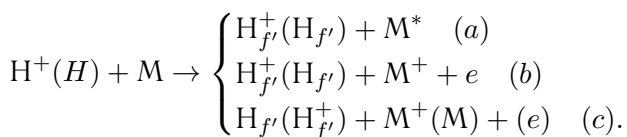
атомов водорода составляет порядка 1–3% от исходного потока протонов солнечного ветра [12–17]. Энергичные атомы водорода поступают в термосферу Марса, где они неоднократно возбуждаются через упругие столкновения, отрыв электрона и реакции обмена зарядами, испуская фотоны Ly- $\alpha$ , когда эти частицы являются нейтральными. Таким образом, в отличие от большинства авроральных свечений, эти фотоны Ly- $\alpha$  излучаются самими высыпавшимися частицами. Хотя точного земного аналога данного марсианского феномена нет, он имеет сходство с протонным сиянием в области полярного каспа, через которую солнечный ветер проникает локально в термосферу Земли [18, 19], и с дневным экваториальным высыпанием энергичных нейтральных атомов (ЭНА), возникающих в кольцевом токе [20]. Нужно отметить, что протоны солнечного ветра, как правило, отклоняются от баллистических траекторий проникновения в атмосферу Марса препятствием — индуцированной магнитосферой Марса. В то же время высокоэнергетические атомы водорода, образующиеся в столкновениях перезарядки, не подвергаются воздействию электромагнитных полей и, следовательно, могут проникать глубоко в атмосферу, где они сталкиваются с атмосферными газами. Эти процессы приводят к угловому рассеянию, поглощению энергии и обратному рассеянию доли высыпавшегося потока Н ЭНА [21–23]. Эти водородные ЭНА вместе с атомами Н, образующимися в солнечном ветре и магнитослое [24], и за счет отражения от атмосферы [16, 17, 25, 26], были обнаружены в околomarсианской среде в наблюдениях инструмента — анализатора космической плазмы и энергетических атомов (ASPERA-3) на борту КА Mars Express. Согласно работе [10], наибольшая плотность проникающих протонов со скоростью, близкой к скорости солнечного ветра, наблюдалась КА MAVEN в периапсисе (~160 км) в дневной термосфере, данная область также соответствует самой высокой плотности основного атмосферного компонента CO<sub>2</sub> вдоль орбиты. Это согласуется с процессами перезарядки и отрыва электрона у проникающих в атмосферу Марса нейтральных частиц Н с высокими энергиями [21, 22].

В этой работе рассматриваются процессы воздействия на атмосферный газ потоков протонов и атомов водорода, высыпавшихся в атмосферу Марса. Для этой цели использована Монте-Карло кинетическая модель, включающая все основные физические процессы в сочетании с представленными в работе [10] *in situ* измерениями нисходящих потоков протонов из магнитослоя (magnetosheath, область между головной ударной волной и границей индуцированной магнитосферы Марса) на верхней границе моделируемой атмосферы. В предыдущих версиях [22, 23] кинетическая модель

тической Монте-Карло модели процессов высыпания учитывалась лишь горизонтальная составляющая индуцированного магнитного поля Марса. Так как благодаря измерениям магнитометра MAVEN/MAG [27] появилась детальная информация о трехмерной структуре индуцированного магнитного поля Марса, в данной работе выполнено расширение кинетической модели с целью учета произвольной структуры магнитного поля Марса. В качестве граничных данных о потоке высыпающихся в атмосферу Марса частиц  $H/H^+$  использованы измерения, выполненные инструментом MAVEN/SWIA [28]. Этот прибор был разработан для измерения ионов с энергиями от 30 эВ до 25 кэВ как в невозмущенном воздействии на атмосферу солнечном ветре, так и в марсианской индуцированной магнитосфере. В проведенных пробных расчетах выполнена проверка усовершенствованной модели путем сравнения результатов расчетов деградации высыпающегося потока частиц  $H/H^+$  с данными *in situ* измерений в зависимости от высоты. Это позволило сделать некоторые выводы об эффективности процессов перезарядки между солнечным ветром и протяженной водородной короной Марса, а также о роли индуцированного магнитного поля в формировании рассеянного (отраженного атмосферой) компонента высыпающегося потока частиц  $H/H^+$ .

## 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИ

Проникающие в атмосферу атомы водорода и протоны с высокими энергиями теряют кинетическую энергию в следующих столкновениях с нейтральным атмосферным газом:



Здесь  $M$  обозначает основные атмосферные компоненты —  $CO_2$ ,  $N_2$  и  $O$ , — включенные в модель. Различные каналы соответствуют (a) передаче импульса и энергии при упругих и неупругих столкновениях, (b) ионизации молекул/атомов атмосферы и (c) столкновениях с переносом заряда и захватом электронов. Вторичные быстрые атомы  $H_{f'}$  и протоны  $H_{f'}^+$  несут достаточную кинетическую энергию для повторного участия в перечисленных выше каналах столкновений. Многократное повторение взаимодействий со сверхтепловыми частицами приводит к растущему набору поступательно и внутренне возбужденных атмосферных атомов и/или молекул  $M^*$ .

Чтобы изучить высыпание потока частиц  $H/H^+$  с высокими энергиями в атмосферу, необходимо решать кинетические уравнения Больцмана [22] с учетом столкновительных членов и источников частиц на верхней границе исследуемой области атмосферы

$$\begin{aligned} & \mathbf{v} \cdot \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} f_{H/H^+} + \\ & + \left( \mathbf{g} + \frac{e}{m_{H^+}} \mathbf{v} \times \mathbf{B} \right) \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} f_{H/H^+} = Q_{H/H^+}(\mathbf{v}) + \\ & + \sum_{M=O, N_2, CO_2} J_{mt}(f_{H/H^+}, f_M). \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение (1) записывается в стандартном виде для функций распределения по скоростям  $f_{H/H^+}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  для атомов водорода и протонов и  $f_M(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  для атмосферного газа [23, 29]. Источник  $Q_{H/H^+}$  описывает скорость образования вторичных частиц  $H/H^+$ , а упругие и неупругие столкновительные члены  $J_{mt}$  для  $H/H^+$  описывают передачу энергии и импульса атмосферному газу [30], который характеризуется локальной максвелловской функцией распределения по скорости. Данная модель Монте-Карло [22, 39, 30, 31] используется для решения кинетического уравнения (1). В модели использованы 1D подход для конфигурационного пространства и 3D-подход для пространства скоростей. Подробности реализации и описание точности модели (ниже 10%) можно найти в [32]. Следует отметить, что ключевым аспектом модели является вероятностная обработка распределения углов рассеяния, которое влияет как на скорость потери энергии потоком, так и на угловое перераспределение высыпающихся протонов [9, 23].

Исследуемая область атмосферы ограничена нижней границей, расположенной на высоте 80 км, где частицы  $H/H^+$  эффективно термализуются. Верхняя граница установлена на высоте 500 км, где измерения высыпающихся протонов были выполнены инструментом MAVEN/SWIA [10]. Подробное описание всех численных аспектов модели, использованных в этом исследовании, было дано в недавних работах [9, 23]. Профили температуры и плотности основных компонент  $CO_2$ ,  $CO$  и  $O$  атмосферы взяты из модели [33] для низкого уровня солнечной активности и распределения плотности, показаны на рис. 1. Температура на высоте 300 км составляет 139 К, а изменение высоты однородной атмосферы наблюдается около 120 км, где температура начинает расти с высотой.

В представленных ниже расчетах при помощи кинетической модели Монте-Карло предполагалась произвольная структура индуцированного

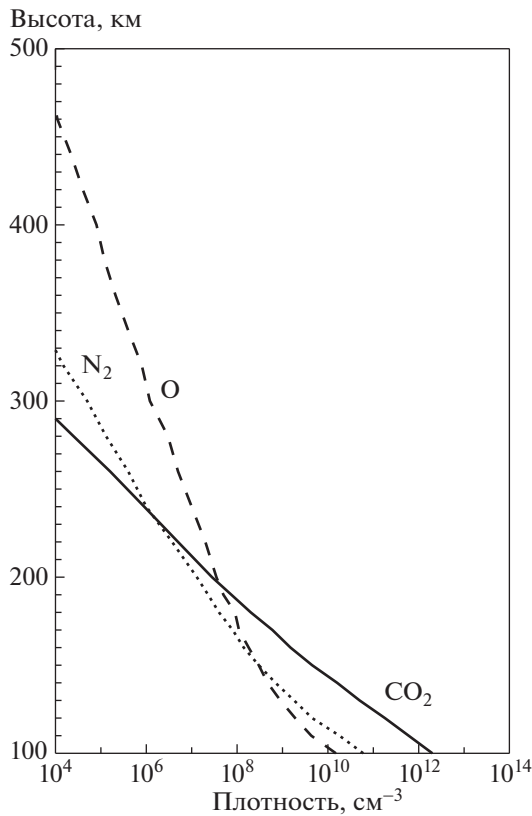


Рис. 1. Высотные профили плотности основных атмосферных компонентов, взятые из аэрономической модели [33].

магнитного поля Марса, т.е. в уравнении (1) учитывались все три компоненты напряженности магнитного поля  $\mathbf{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ . В пробных расчетах произвольное направление вектора напряженности магнитного поля задавалось углом отклонения  $\theta$  от горизонтального направления. Характерные значения напряженности поля  $V_0 = 10, 20$  и  $30$  нТл использовались в проведенных расчетах в соответствии с диапазоном значений, измеренных на Марсе с помощью КА Mars Global Surveyor (MGS) [34], КА Mars Express [35] и КА MAVEN [27].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОБНЫХ РАСЧЕТОВ

Так как периапсис КА MAVEN достигается на относительно низких высотах, то в настоящее время появилась возможность изучить явления, вызванные проникающими глубоко в атмосферу Марса атомами водорода Н ЭНА с высокими энергиями. В этом разделе представлены результаты расчетов высыпания как протонов, так и атомов водорода, используя *in situ* измерения высыпавшихся потоков протонов в верхних слоях атмосферы Марса в качестве входных параметров модели (рис. 2).

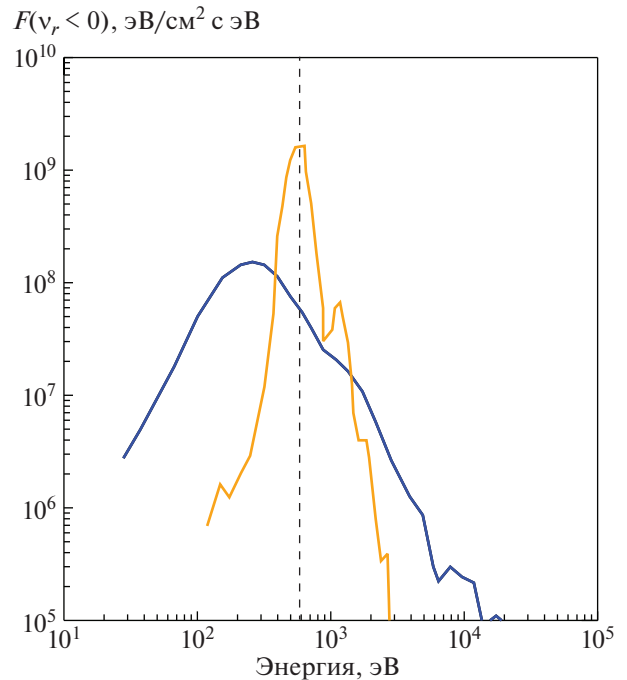


Рис. 2. Исходные данные для кинетической модели Монте-Карло: интегрированные по углу энергетические спектры дифференциальных потоков протонов из солнечного ветра (оранжевая линия) и из магнитослоя (синяя линия) были взяты из работы [10]. Вертикальная пунктирная линия соответствует пику невозмущенных протонов солнечного ветра при 600 эВ.

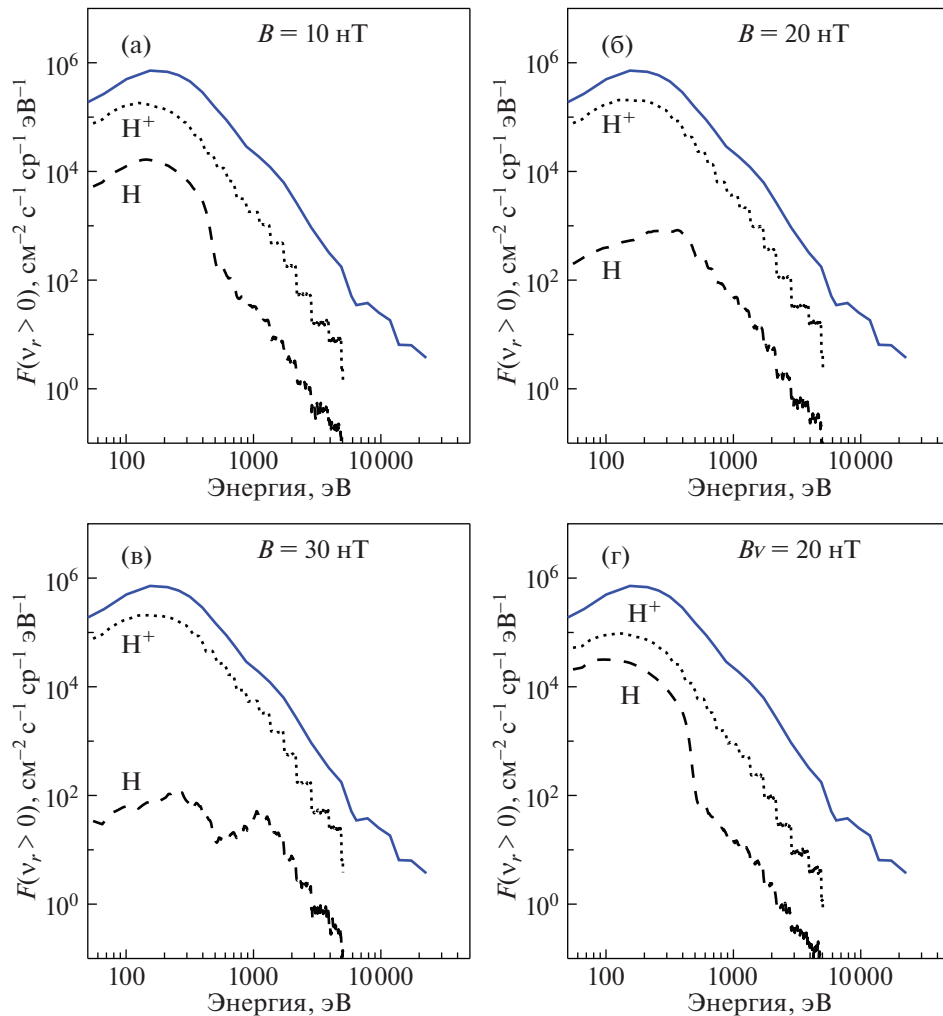
#### 3.1. Высыпание протонов из магнитослоя Марса

Для проверки усовершенствованной кинетической модели высыпания протонов проведены следующие пробные расчеты:

— угол наклона вектора напряженности индуцированного магнитного поля задавался следующими значениями  $\theta = 1^\circ$  (близкое к горизонтальному направлению) и  $\theta = 63^\circ$  (большое отклонение от горизонтали). Принимались следующие значения напряженности поля:  $V_0 = 10, 20$  и  $30$  нТл, — и полагалось, что их значения не изменяются с высотой и во времени;

— в дополнительном расчете принималось, что значение напряженности уменьшается с высотой следующим образом  $V(h) = V_0 h/h_0$ , где  $h_0 = 500$  км — верхняя граница расчетной области атмосферы.

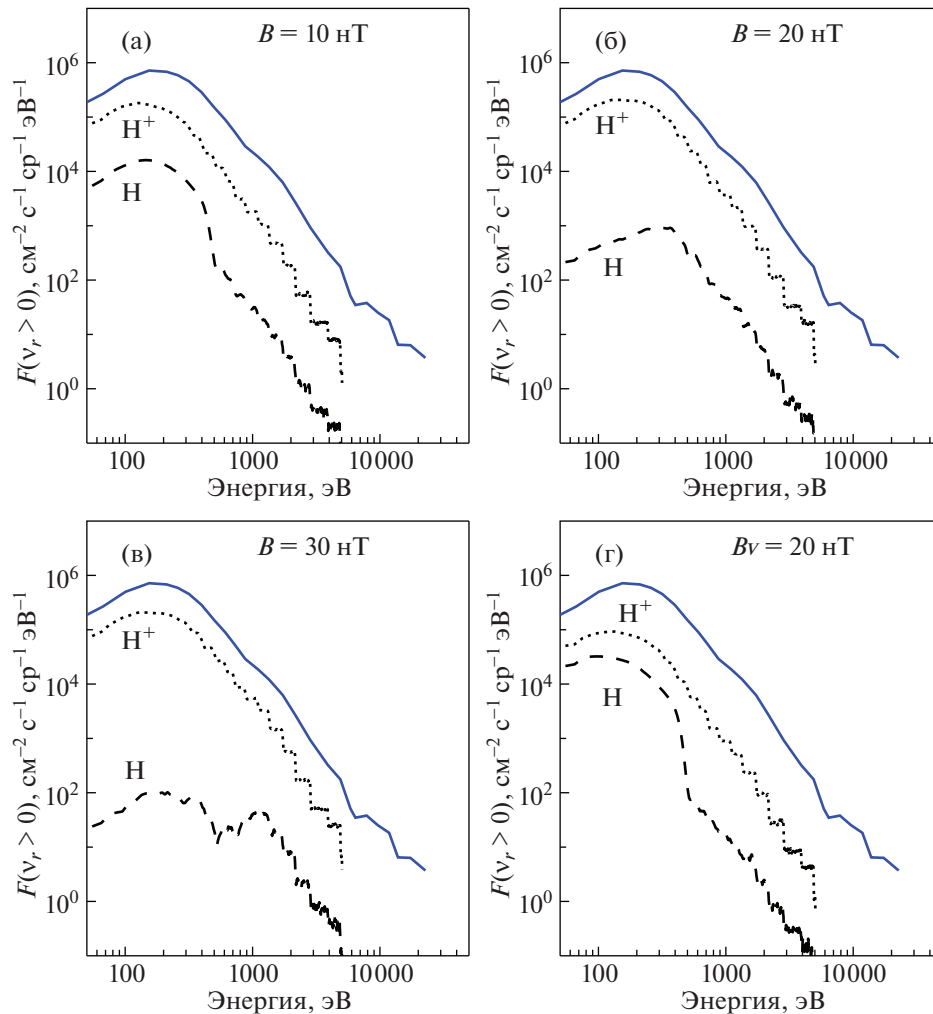
В качестве граничного условия на высоте 500 км принимался энергетический спектр протонов, высыпавшихся из магнитослоя Марса, и измеренный инструментом MAVEN/SWIA 27 февраля 2015 г. на орбите КА вблизи терминатора планеты в области с очень слабыми остаточными магнитными полями коры планеты. Данный спектр является типичным для протонов, проникающих в атмосферу из магнитослоя Марса и солнечного ветра.



**Рис. 3.** Восходящие (отраженные атмосферой) потоки атомов водорода Н (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующиеся вследствие высыпания протонов из магнитослоя Марса. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $1^\circ$  от горизонтального направления и величины напряженности магнитного поля  $B = 10$  нТл (а), 20 нТл (б), 30 нТл (в) и изменяющегося с высотой, начиная со значения 20 нТл на верхней границе модели (г). Синей сплошной линией показан энергетический спектр протонов высыпающих из магнитослоя Марса.

Результаты расчетов показаны на рис. 3 и 4 для углов наклона вектора напряженности  $\theta = 1^\circ$  и  $\theta = 63^\circ$  соответственно. Представлены восходящие (отраженные атмосферой) потоки атомов водорода Н (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующиеся вследствие высыпания протонов из магнитослоя Марса. Расчеты выполнены для величины напряженности магнитного поля  $B = 10$  нТл (а), 20 нТл (б), 30 нТл (в) и изменяющегося с высотой, начиная со значения 20 нТл на верхней границе модели (г). Синей сплошной линией показан энергетический спектр протонов, высыпающих из магнитослоя Марса. Как и следовало ожидать из наших предыдущих исследований [22, 23], видно, что наличие индуцированного магнитного поля играет очень важную роль в формировании обратного рассеянного пото-

ка. Суммарные восходящие потоки энергии частиц Н и  $H^+$ , отраженных атмосферой, соответственно изменяются до 0.9% и 13% для  $B = 10$  нТл, 0.2% и 22% для  $B = 20$  нТл и 0.06% и 25% для  $B = 30$  нТл. Эти значения приведены для расчета с углом наклона  $\theta = 1^\circ$  и практически совпадают со значениями, приведенными в работе [23]. Полученное в расчетах увеличение обратного рассеянного потока протонов в 5 раз (потоки энергии частиц Н и  $H^+$  вверх на высоте 500 км равны 1.9% и 4.3% для расчета без учета индуцированного магнитного поля [23]) обусловлено экранирующим эффектом горизонтальной составляющей индуцированного магнитного поля [22]. Гирорадиусы проникающих в атмосферу протонов становятся меньше диапазона высот ( $\sim 300$  км), необходимого для того, чтобы протоны достигли области столкновений с



**Рис. 4.** Восходящие (отраженные атмосферой) потоки атомов водорода Н (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующиеся вследствие высыпания протонов из магнитослоя Марса. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $63^\circ$  от горизонтального направления и величины напряженности магнитного поля  $B = 10$  нТл (а), 20 нТл (б), 30 нТл (в) и изменяющегося с высотой, начиная со значения 20 нТл на верхней границе модели (г). Синей сплошной линией показан энергетический спектр протонов, высыпающих из магнитослоя Марса.

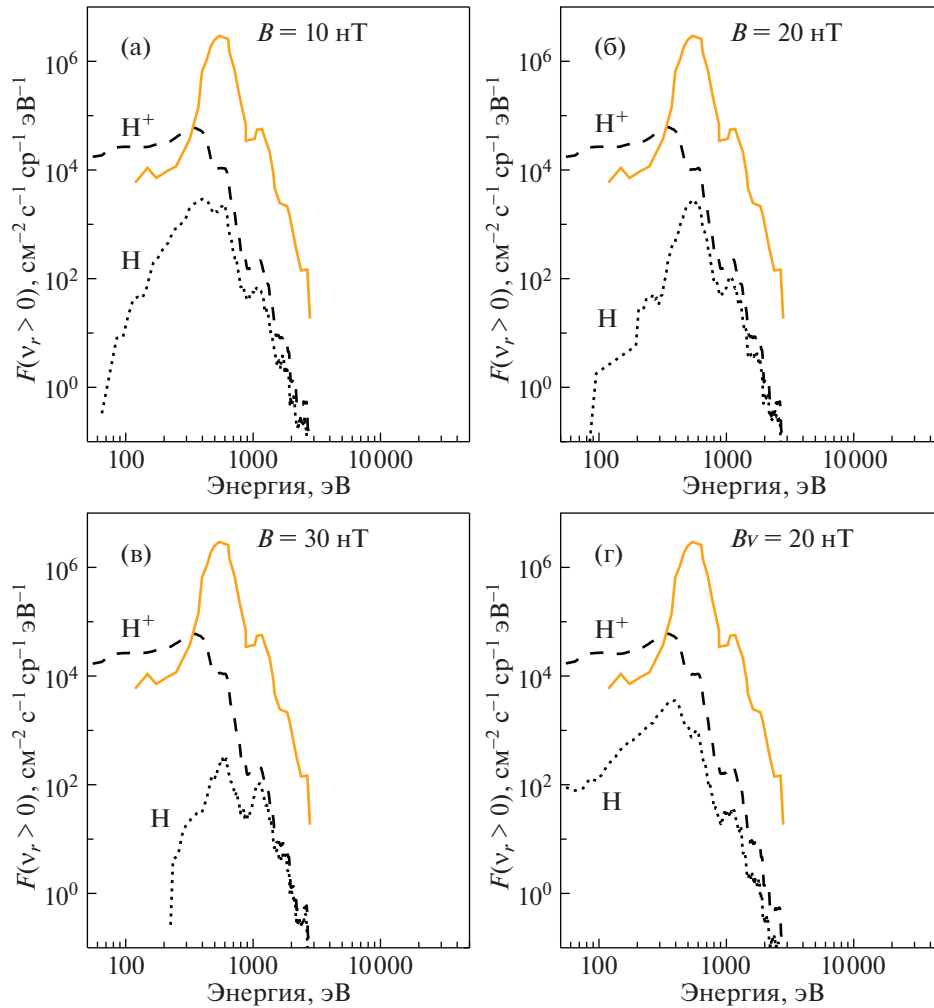
атмосферным газом (ниже 200 км) марсианской атмосферы и сформировали рассеянные атмосферой восходящие потоки. Для расчета с зависящей от высоты напряженностью магнитного поля (рис. 2г) значения потоков отраженных атмосферой атомов водорода и протонов равны соответственно 1.3% и 7%. Из-за ослабления горизонтальной составляющей индуцированного магнитного поля по мере проникновения протонов в атмосферу происходит более эффективная перезарядка и образуется относительно высокий восходящий поток атомов водорода.

Для расчета с углом наклона  $\theta = 63^\circ$  полные восходящие потоки энергии Н и  $H^+$  на верхней границе исследуемой области соответственно изменяются до 0.9% и 13% для  $B = 10$  нТл, 0.2% и 22%

для  $B = 20$  нТл и 0.06% и 25% для  $B = 30$  нТл, т.е. практически тем же значениям, что и для  $\theta = 1^\circ$ . Проведенные расчеты подтверждают заключение работ [22, 23] о доминантной роли горизонтальной составляющей индуцированного магнитного поля в образовании отраженного атмосферой потока протонов и атомов водорода, а изменение с высотой напряженности поля (рис. 3г и рис. 4г) к значительному перераспределению энергии уносимой из атмосферы между восходящими потоками протонов и атомов водорода, аналогичному расчетам без учета индуцированного магнитного поля [23].

### 3.2. Высыпание атомов водорода

При моделировании использован поток протонов от невозмущенного солнечного ветра, измерен-



**Рис. 5.** Восходящие (отраженные атмосферой) потоки атомов водорода Н (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующиеся вследствие выпадения атомов водорода. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $1^\circ$  от горизонтального направления и величины напряженности магнитного поля  $B = 10$  нТл (а), 20 нТл (б), 30 нТл (в) и изменяющегося с высотой, начиная со значения 20 нТл на верхней границе модели (г). Оранжевой сплошной линией показан энергетический спектр атомов водорода, образующихся при перезарядке протонов невозмущенного солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса.

ный на орбите 27 февраля 2015 г. (см. рис. 2, оранжевая сплошная кривая). Согласно оценкам работы [13], спектр выпадающих атомов водорода в модели был взят равным 1% от интегрированного по углам спектра ионов от солнечного ветра.

Расчитанные на верхней границе на высоте 500 км дифференциальные восходящие числовые потоки частиц Н и  $H^+$  для случаев с углами наклона магнитного поля  $\theta = 1^\circ$  и  $\theta = 63^\circ$  и индуцированным магнитным полем  $B_0 = 10, 20$  и 30 нТл представлены на рис. 5 и 6. Для  $B = 10$  нТл обратные потоки энергии составляют 0.1% и 1.4% от падающего потока энергии, для  $B = 20$  нТл — 0.09% и 1.4%, для  $B = 30$  нТл — 0.002% и 1.4% для частиц Н и  $H^+$  соответственно. Для расчета напряженностью магнитного поля, с зависящей от высоты (рис. 5г), значения потоков отраженных

атмосферой атомов водорода и протонов равны соответственно 0.08% и 1.4%. В расчетах с углом наклона магнитного поля  $\theta = 63^\circ$  получены практически те же значения отраженных атмосферой потоков частиц Н и  $H^+$ , что и в расчетах для угла наклона магнитного поля  $\theta = 1^\circ$ .

Проведенные расчеты подтверждают заключение из работ [22, 23] о том, что при выпадении нейтральных атомов водорода с энергетическим спектром протонов из невозмущенного солнечного ветра атомы водорода проникают глубоко в атмосферу, и в относительно плотных слоях термосферы Марса начинает формироваться восходящий поток частиц Н и  $H^+$  за счет рассеяния в столкновениях с окружающим атмосферным газом. Соответственно, роль горизонтальной составляющей индуцированного магнитного поля в образовании

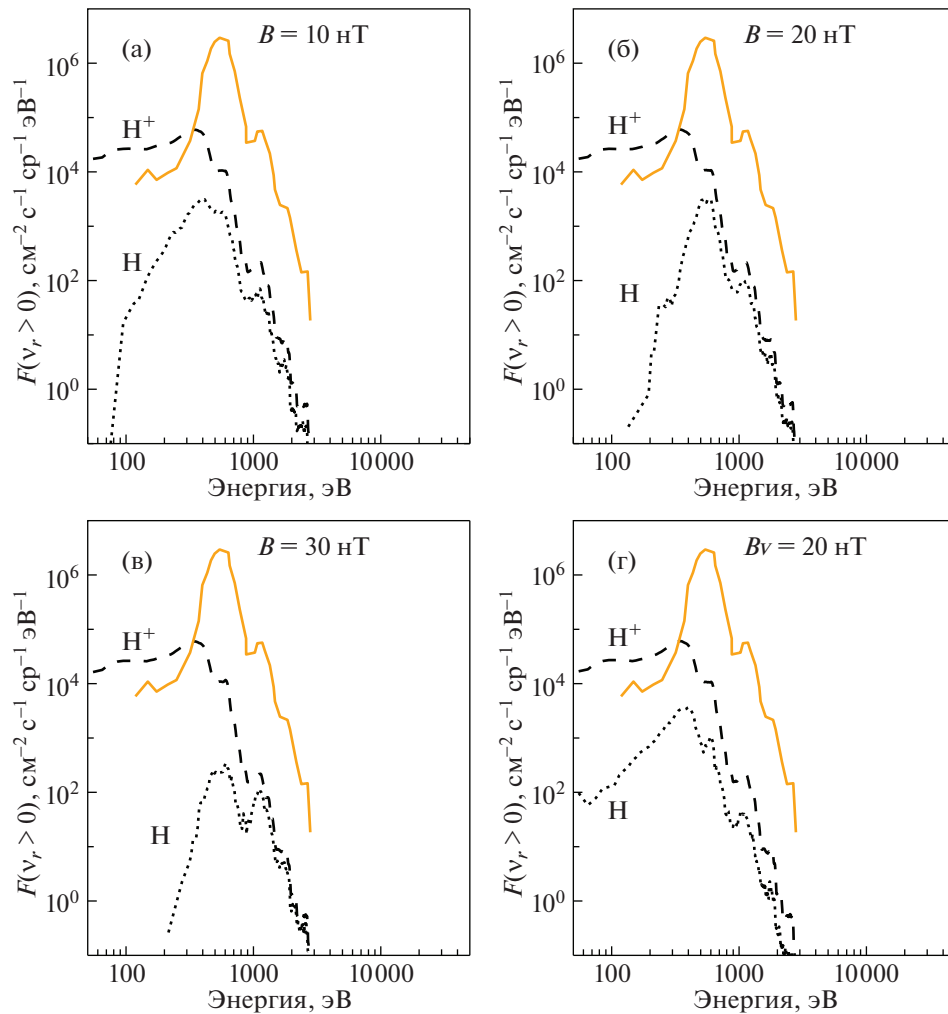


Рис. 6. То же, что и на рис. 5, но расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $63^\circ$  от горизонтального направления.

отраженного атмосферой потока протонов и атомов водорода не столь критична по сравнению с высыпанием заряженных частиц — протонов  $H^+$ .

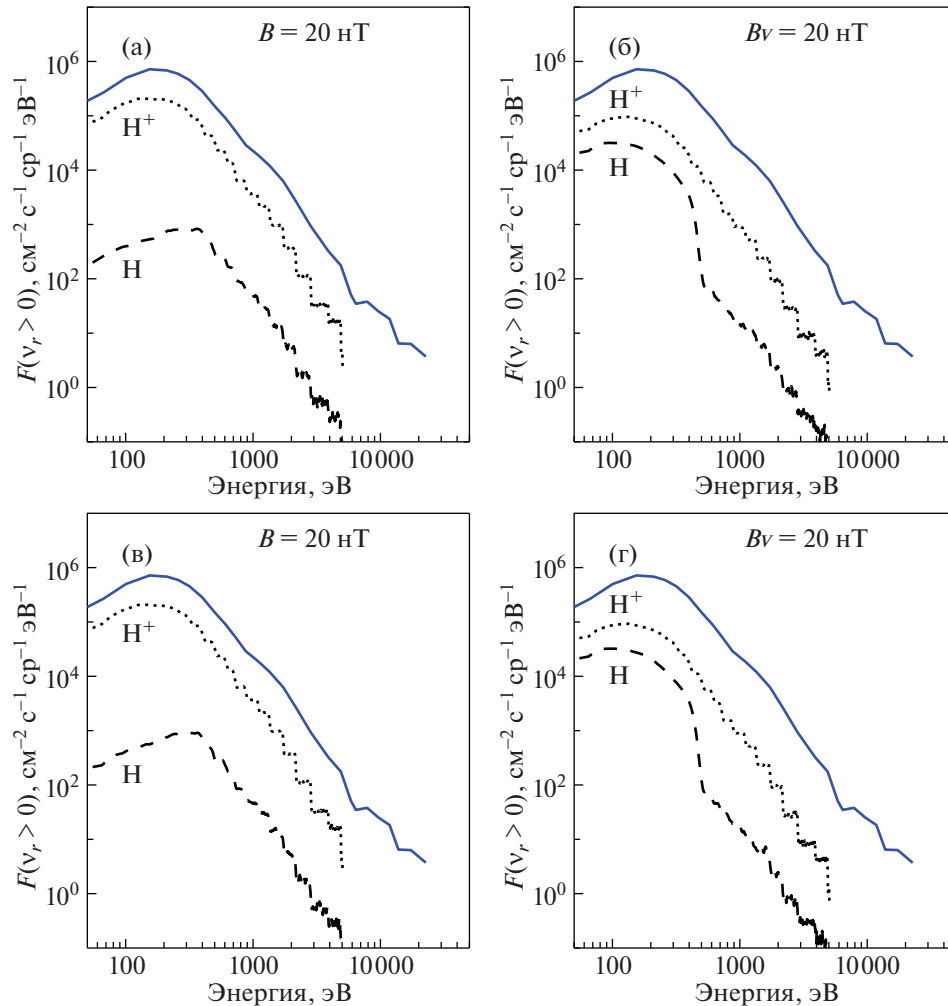
В подтверждение сделанных выводов на рис. 7 и 8 приведены сравнения отраженных атмосферой потоков атомов водорода  $H$  (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующихся вследствие высыпания протонов из магнитослоя Марса. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $1^\circ$  (верхние панели) и  $63^\circ$  (нижние панели) от горизонтального направления. Напряженность магнитного поля задавалась значением  $B = 20$  нТл, не изменяющимся с высотой (левые панели) и изменяющимся с высотой, начиная со значения 20 нТл на верхней границе модели (правые панели). Синей сплошной линией на рис. 7 показан энергетический спектр протонов высыпающих из магнитослоя Марса. Соответственно, на рис. 8, отвечающем высыпанию атомов водорода, оранжевой сплошной

линией показан энергетический спектр атомов водорода, образующихся при перезарядке протонов невозмущенного солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса. Из рис. 7 и 8 видно, что угол наклона вектора напряженности индуцированного магнитного поля не сказывается на спектре и величине восходящих потоков протонов и атомов водорода (рис. 7 и 8, левые панели), а уменьшение значений напряженности с высотой приводит к увеличению восходящего потока атомов водорода (рис. 7 и 8, правые панели).

#### 4. ВЫВОДЫ

Представлены результаты модельных расчетов взаимодействия с марсианской атмосферой высыпающих протонов и атомов водорода ( $H/H^+$ ) с высокими энергиями. Использована модификация кинетической Монте-Карло модели, разработанной ранее для анализа данных измерений инструментов MEX/ASPERA-3 на борту КА Mars



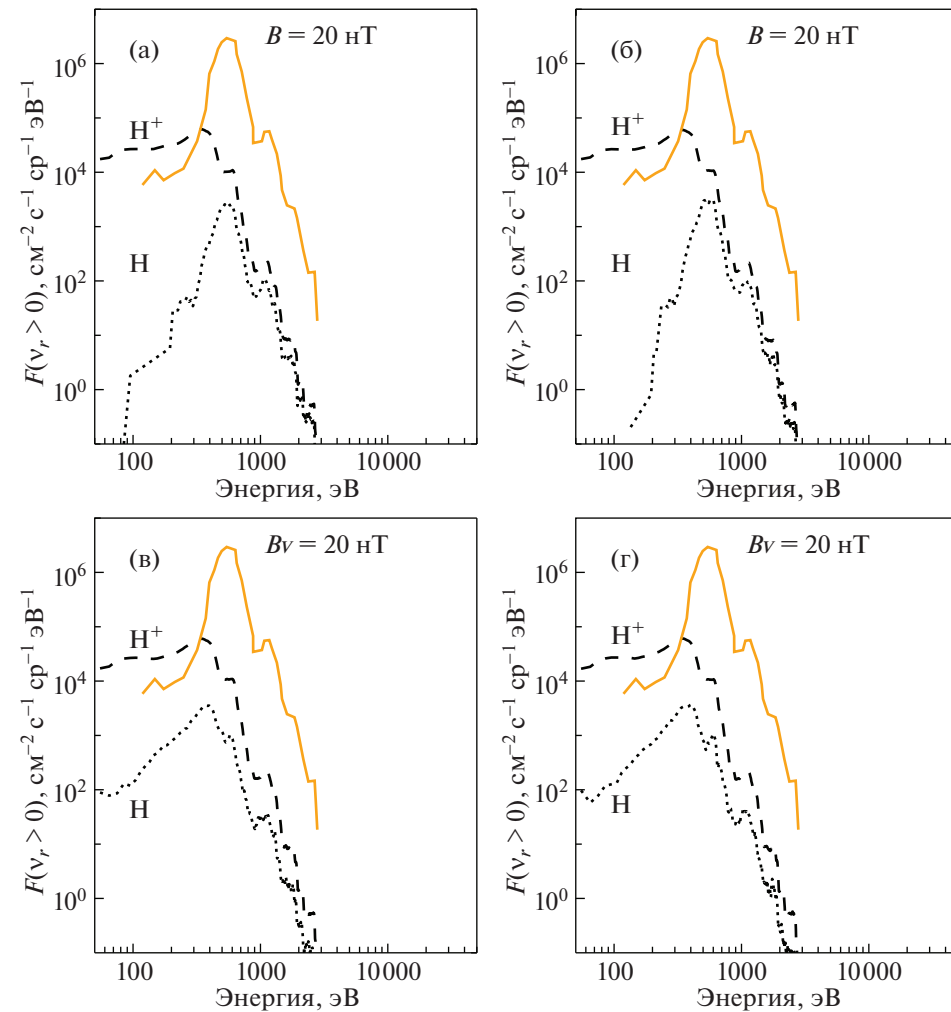


**Рис. 7.** Сравнение отраженных атмосферой потоков атомов водорода H (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующихся вследствие высыпания протонов из магнитослоя Марса. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $1^\circ$  (верхние панели) и  $63^\circ$  (нижние панели) от горизонтального направления. Напряженность магнитного поля задавалась значением  $B = 20$  нТ, не изменяющимся с высотой (левые панели) и изменяющимся с высотой, начиная со значения 20 нТ на верхней границе модели (правые панели). Синей сплошной линией показан энергетический спектр протонов, высыпающих из магнитослоя Марса.

Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN. В представленной модификации модели впервые учтена произвольная (трехмерная) структура индуцированного магнитного поля Марса. При наличии локальных измерений всех трех компонентов индуцированного магнитного поля теперь можно описать не только поток протонов, проникающих в атмосферу, но и деградацию потока частиц  $H/H^+$  вдоль орбиты КА, а также образование рассеянных атмосферой восходящих потоков протонов и атомов водорода. Выполнена проверка модифицированной модели. Проведенные пробные расчеты показали совпадение результатов с оценками восходящих потоков протонов и атомов водорода, полученных в более ранних исследованиях [22, 23]. Сравнение результатов моделирования и измерений потоков протонов на малых высотах позво-

ляют сделать вывод об эффективности перезарядки между солнечным ветром и протяженной водородной короной. Также подтверждено, что при высыпании протонов индуцированное магнитное поле играет очень важную роль в формировании обратного (рассеянного атмосферой) потока протонов и атомов водорода и строго контролирует его величину.

Разработанная кинетическая модель Монте-Карло высыпания протонов и атомов водорода в атмосферу Марса будет использована для расчета характеристик свечения атомарного водорода в линии Ly- $\alpha$  [36] для сравнения с наблюдениями недавно открытого протонного сияния [3, 5] на Марсе. Для таких расчетов будут использованы одновременные измерения напряженности индуцированного магнитного поля при помощи



**Рис. 8.** Сравнение отраженных атмосферой потоков атомов водорода H (штриховая линия) и протонов  $H^+$  (пунктирная линия) на высоте 500 км, образующихся вследствие высыпания атомов водорода. Расчеты выполнены для угла наклона индуцированного магнитного поля в  $1^\circ$  (верхние панели) и  $63^\circ$  (нижние панели) от горизонтального направления. Напряженность магнитного поля задавалась значением  $B = 20$  нТ, не изменяющимся с высотой (левые панели) и изменяющимся с высотой, начиная со значения 20 нТ на верхней границе модели (правые панели). Оранжевой сплошной линией показан энергетический спектр атомов водорода, образующихся при перезарядке протонов невозмущенного солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса.

магнитометра MAVEN/MAG и измерения потоков частиц  $H/H^+$ , высыпающих в атмосферу Марса, выполненные инструментом MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-12-00370).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J.-L. Bertaux, F. Leblanc, O. Witasse, E. Quemerais, J. Lilensten, S. A. Stern, B. Sandel, and O. Korabely, *Nature* **435**, 790 (2005).
2. F. Leblanc, J. Y. Chaufray, O. Witasse, J. Lilensten, and J.-L. Bertaux, *J. Geophys. Res.* **111**, E09S11 (2006).
3. B. Ritter, J.-C. Gérard, B. Hubert, and L. Rodriguez, *Geophys. Res. Lett.* **45**, 231 (2018).
4. N. M. Schneider, J. I. Deighan, S. K. Jain, A. Stiepen, et al., *Science* **350**, id.0313 (2015).
5. J. Deighan, S. K. Jain, M. S. Chaffin, X. Fang, et al., *Nature Astronomy* **2**, 802 (2018).
6. J.-C. Gérard, L. Soret, L. Libert, R. Lundin, A. Stiepen, A. Radioti, and J.-L. Bertaux, *J. Geophys. Res.* **120**, 6749 (2015).
7. L. Soret, J. C. Gérard, L. Libert, V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, A. Stiepen, and J.-L. Bertaux, *Icarus* **264**, 398 (2016).
8. D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, J.-C. Gérard, and B. Hubert, *Icarus* **282**, 127 (2017).
9. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, J.-C. Gérard, and B. Hubert, *Solar System Research* **51**, 362 (2017).
10. J. S. Halekas, R. J. Lillis, D. L. Mitchell, T. E. Cravens, et al., *Geophys. Res. Lett.* **42**, (2015).

11. J. Y. Chaufray, J.-L. Bertaux, F. Leblanc, and E. Quémerais, *Icarus* **195**, 598 (2008).
12. S. Barabash, R. Lundin, R. Zarnowiecki, and S. Grzedzielski, *Adv. Space Res.* **16**, 81 (1995).
13. E. Kallio, J. G. Luhmann, and S. Barabash, *J. Geophys. Res.* **102**, 22183 (1997).
14. M. Holmström, S. Barabash, and E. Kallio, *J. Geophys. Res.* **107**, 1277 (2002).
15. A. Galli, P. Wurz, E. Kallio, A. Ekenbäck, et al., *J. Geophys. Res.* **113**, E12012 (2008).
16. X.-D. Wang, S. Barabash, Y. Futaana, A. Grigoriev, and P. Wurz, *J. Geophys. Res.* **118**, 7635 (2013).
17. X.-D. Wang, S. Barabash, Y. Futaana, A. Grigoriev, and P. Wurz, *J. Geophys. Res.* **119**, 8600 (2014).
18. J.-C. Gérard, B. Hubert, M. Meurant, V. I. Shematovich, et al., *J. Geophys. Res.* **106**, 28939 (2001).
19. H. U. Frey, S. B. Mende, T. J. Immel, S. A. Fuselier, E. S. Claflin, J.-C. Gérard, and B. Hubert, *J. Geophys. Res.* **107** SMP 2-1 (2002).
20. A. W. Stephan, S. Chakrabarti, and D. I. M. Cotton, *Geophys. Res. Lett.* **27**, 2865 (2000).
21. E. Kallio and S. Barabash, *J. Geophys. Res.* **106**, 165 (2001).
22. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, C. Diéval, S. Barabash, G. Stenberg, H. Nilsson, and J.-C. Gérard, *J. Geophys. Res.* **116**, A11320 (2011).
23. D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, J.-C. Gérard, and B. Hubert, *J. Geophys. Res.* **123**, 58 (2018).
24. H. Gunell, K. Brinkfeldt, M. Holmström, P. C. Brandt, et al., *Icarus*, **182**, 431 (2006).
25. Y. Futaana, S. Barabash, A. Grigoriev, M. Holmström, E. Kallio, P. C. Brandt, and C. Dierker, *Icarus* **182**, 424 (2006).
26. A. Mura, S. Orsini, A. Milillo, E. Kallio, et al., *Planetary and Space Science* **56**, 840 (2008).
27. J. E. P. Connerney, J. R. Espley, G. A. DiBraccio, J. R. Gruesbeck, R. J. Oliverson, D. L. Mitchell, and B. M. Jakosky, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 8819 (2015).
28. J. S. Halekas, E. R. Taylor, G. Dalton, G. Johnson, D. W. Curtis, J. P. McFadden, D. L. Mitchell, R. P. Lin, and B. M. Jakosky, *Space Science Reviews* **195**, 125 (2015).
29. J.-C. Gérard, B. Hubert, D. V. Bisikalo, and V. I. Shematovich, *J. Geophys. Res.* **105**, 15, 795 (2000).
30. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J.-C. Gérard, *J. Geophys. Res.* **99**, 23217 (1994).
31. D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, and J.-C. Gérard, *J. Geophys. Res.* **100**, 3715 (1995).
32. V. I. Shematovich, in T. Abe (Ed.) *Rarefied Gas Dynamics*, AIP Conference. Proceedings (Vol.1084, pp. 1047–1054, 2008).
33. J. L. Fox and A. B. Hac, *Icarus*, **204**, 527 (2009).
34. D. A. Brain, F. Bagenal, M. H. Acuna, and J. E. P. Connerney, *J. Geophys. Res.* **108**, 1424 (2003).
35. F. Akalin, D. D. Morgan, D. A. Gurnett, D. L. Kirchner, D. A. Brain, R. Modolo, M. H. Acuna, and J. R. Espley, *Icarus* **206**, 104 (2010).
36. J. C. Gérard, B. Hubert, B. Ritter, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo, *Icarus* **321**, 266 (2019).