

УДК 523.4

УБЕГАНИЕ АТОМОВ КИСЛОРОДА ИЗ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПРОТОННЫХ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЯХ НА МАРСЕ

© 2020 г. В. И. Шематович^{1, *}, Е. С. Калиничева¹

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*e-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 13.01.2020 г.

После доработки 03.03.2020 г.

Принята к публикации 30.03.2020 г.

Представлены результаты модельных расчетов скорости потери атомов кислорода из атмосферы Марса, вызванные высыпанием протонов и атомов водорода (H/H^+) с высокими энергиями из плазмы солнечного ветра. Проникновение протонов и атомов водорода с высокими энергиями из плазмы солнечного ветра в верхнюю атмосферу Марса на высотах 100–250 км сопровождается переносом импульса и энергии в столкновениях с основным компонентом — атомарным кислородом. Данный процесс рассматривается как разбрызгивание атмосферного газа при протонных полярных сияниях и сопровождается образованием убегающих из атмосферы потоков надтепловых атомов водорода и кислорода. В расчетах скорости образования надтепловых атомов кислорода использована модификация кинетической модели Монте-Карло, разработанной ранее для анализа данных измерений приборов MEX/ASPERA-3 на борту космического аппарата (КА) Mars Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN. В работе исследованы процессы кинетики и переноса горячих атомов кислорода в переходной области (от термосферы к экзосфере) верхней атмосферы Марса. Рассчитаны функции распределения надтепловых атомов кислорода по кинетической энергии. Показано, что при протонных полярных сияниях на Марсе экзосфера населяется значительным количеством надтепловых атомов кислорода с кинетическими энергиями вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е. образуются как дополнительная к фотохимическим источникам горячая фракция кислородной короны, так и нетепловой поток убегания атомарного кислорода из атмосферы Марса за счет высыпания протонов и атомов водорода. Протонные полярные сияния являются спорадическими авроральными событиями. Соответственно в условиях экстремальных солнечных событий — солнечных вспышек и корональных выбросов массы — величина потока убегания горячих атомов кислорода, индуцированного процессами высыпания, может становиться преобладающей над фотохимическими источниками, как следует из оценок, полученных на основе недавних наблюдений КА MAVEN.

DOI: 10.31857/S0004629920080083

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что разбрызгивание атмосферного газа при протонных полярных сияниях сопровождается образованием убегающих из атмосферы потоков надтепловых атомов водорода и кислорода [1]. Для оценки скорости образования надтепловых атомов кислорода может быть использована кинетическая Монте-Карло модель [2], описывающая процессы высыпания в планетную атмосферу частиц с высокими энергиями из плазмы солнечного ветра и/или магнитосферы планеты. Такое исследование представляется интересным и важным, так как в условиях экстремальных солнечных событий — солнечных вспышек и корональных выбросов массы, — величина индуцированного процессами высыпания потока убегания горячих атомов кислорода может становиться преобладающей над фотохимическими

источниками, как следует из оценок, полученных на основе недавних наблюдений КА MAVEN [3].

Наблюдения с помощью прибора “Спектроскопия для исследования характеристик атмосферы Марса” (SPICAM) на борту космического аппарата Mars Express — MEX [4, 5] и ультрафиолетового спектрографа для визуализации (IUVS) на борту космического аппарата “Марсианская атмосфера и эволюция летучих компонентов” (MAVEN) на Марсе [6, 7] зафиксировали широкий круг авроральных явлений, включающий дискретные и диффузные электронные и протонные полярные сияния на Марсе. Дискретные и диффузные сияния образуются за счет высыпания электронов с высокими энергиями [4, 6]. В наблюдениях с помощью прибора MEX/SPICAM [5] и спектрографа MAVEN/IUVS [7] был открыт третий тип, так называемые протонные сияния,

вызываемые высыпанием протонов и атомов водорода из солнечного ветра [7]. В отличие от электронных полярных сияний, протонные сияния наблюдаются исключительно на дневной стороне Марса и характеризуются повышенной яркостью излучения водорода в линии Ly α (121.6 нм) в диапазоне высот 120–150 км при наблюдениях на лимбе [7]. Эти протонные авроральные события связаны с возмущениями солнечного ветра и популяцией протонов в солнечном ветре перед планетой, ранее идентифицированных анализатором ионов солнечного ветра (SWIA) на борту КА MAVEN [8]. Следует отметить, что диффузное электронное и протонное сияния, открытые на Марсе, сильно отличаются от сопоставимых типов на Земле и других планетах [6, 7].

Экзосфера (или корона) Марса в основном населена атомарным и молекулярным водородом и простирается на несколько марсианских радиусов [9]. Протоны солнечного ветра, как правило, отклоняются от проникающих в атмосферу Марса баллистических траекторий препятствием – индуцированной магнитосферой Марса. В то же время атомы водорода, образующиеся в столкновениях перезарядки с распределением по энергии, аналогичным исходному спектру кинетических энергий протонов солнечного ветра, не подвергаются воздействию электромагнитных полей и, следовательно, могут проникать глубоко в атмосферу, где они сталкиваются с атмосферными газами, вызывая целый ряд авроральных явлений. В частности, происходит возбуждение свечения атомов водорода в линии Ly α [5, 7] и образование фракции надтепловых атомов кислорода [1] за счет поглощения энергии высыпавшихся частиц – протонов и атомов водорода.

Солнечное воздействие на верхние слои атмосферы Марса осуществляется как за счет поглощения мягкого рентгеновского и жесткого ультрафиолетового солнечного излучения, так и за счет действия плазмы солнечного ветра, и приводит к образованию протяженной нейтральной короны, заселенной надтепловыми (горячими) атомами H, C, N и O (см., например, [10, 11]). Теоретические исследования показывают, что основным источником надтепловых частиц являются фотохимические источники, а именно, экзотермические реакции атмосферной фотохимии и, в особенности, диссоциативная рекомбинация ионов молекулярного кислорода с ионосферными электронами [1, 10, 11]. Одним из первых и важных результатов КА MAVEN было подтверждение в наблюдениях при помощи спектрографа IUVS (Imaging UV Spectrograph) присутствия протяженной короны из атомов водорода, углерода и кислорода [6, 12]. Населенность и размер горячей короны изменяются, в частности, за счет притока плазмы солнечного ветра и локальных потоков захваченных из ионосферы ионов в пла-

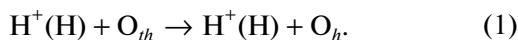
нетную экзосферу. В наблюдениях приборов SWIA (Solar Wind Ion Analyzer) и SEP (Solar Energetic Particles) в атмосфере Марса была открыта популяция протонов с энергиями, близкими к энергии солнечного ветра, но на высотах порядка ~150–250 км [8]. Соответственно возникла необходимость оценить возможный вклад процессов высыпания частиц H/H⁺ в образование фракции надтепловых атомов кислорода на высотах 100–300 км верхней атмосферы Марса.

Таким образом, для исследования распределения тепловой и надтепловой фракций атомарного кислорода в верхней атмосфере планеты земного типа необходима разработка теоретической модели образования кислородной короны с учетом всех потенциально возможных фотохимических и плазменных источников горячих атомов кислорода. В данной работе рассматривается образование фракции надтепловых атомов кислорода в столкновениях атмосферных атомов кислорода с протонами и атомами водорода, высыпавшими с высокими кинетическими энергиями из плазмы солнечного ветра. Для этого в кинетической модели Монте-Карло горячей кислородной короны [13] учтен источник свежих надтепловых атомов кислорода за счет процессов высыпания на основе общей методики стохастического моделирования источников, кинетики и динамики надтепловых частиц в планетных атмосферах [14]. Необходимо отметить, что исследованный в данной работе вклад процессов высыпания ранее был предложен как источник надтепловых и сверхтепловых атомов кислорода для полярной верхней атмосферы Земли [15]. Разработанная модель также была использована для интерпретации наблюдений надтепловых атомов водорода и кислорода, проводящихся в настоящее время при помощи детекторов энергетических нейтральных атомов ASPERA-3 на КА Mars Express [16].

2. ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ ГОРЯЧИХ АТОМОВ КИСЛОРОДА В ПРОЦЕССАХ ВЫСЫПАНИЯ H/H⁺ ЧАСТИЦ С ВЫСОКИМИ ЭНЕРГИЯМИ

Взаимодействие высыпавшихся энергичных протонов солнечного ветра с основными атмосферными компонентами включает перенос импульса и энергии в упругих и неупругих столкновениях, ионизацию атмосферных молекул и атомов, а также столкновения с переносом заряда и захватом электрона. Энергичные атомы водорода, образующиеся в процессах перезарядки протонов с высокими кинетическими энергиями, также в дальнейшем взаимодействуют с основными компонентами атмосферы, что сопровождается переносом импульса и кинетической энергии в упругих и неупругих столкновениях, и процессах ионизации и отрыва электрона (т.е. ионизацией

ударяющего атома водорода). Следовательно, взаимодействие высыпающих потоков протонов с основными нейтральными компонентами атмосферного газа следует рассматривать как каскадный процесс, который сопровождается образованием нарастающего множества поступающих и внутренне возбужденных частиц окружающего атмосферного газа. Для анализа проникновения потока энергичных частиц H^+/H солнечного ветра в верхнюю атмосферу Марса использована модификация кинетической Монте-Карло модели (для дальнейшего удобства обозначенной как КММК-1), разработанной ранее для анализа данных измерений приборов MEX/ASPERA-3 на борту космического аппарата (КА) Mars Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN [2, 17]. В исследуемом случае протонных полярных сияний на Марсе процессы высыпания можно рассматривать как дополнительный источник надтепловых атомов кислорода [15, 16], образующихся в результате атмосферного разбрызгивания частицами H^+/H основного компонента верхней атмосферы – атомарного кислорода. Соответственно одним из последствий проникновения высыпающего потока частиц H^+/H солнечного ветра с высокими энергиями в верхние слои атмосферы является производство надтепловых атомов кислорода O_h при передаче импульса в упругих и неупругих столкновениях с атмосферным кислородом O_{th} :



Свежие надтепловые атомы кислорода теряют избыточную кинетическую энергию при столкновениях с другими частицами атмосферы и распространяются в переходной области между термосферой и экзосферой [15, 16]. Их кинетика и перенос описываются кинетическим уравнением Больцмана:

$$v \frac{\partial}{\partial r} f_{O_h} + s \frac{\partial}{\partial v} f_{O_h} = Q_{O_h}(v) + \sum_{M=O, N_2, O_2} J_{M_i}(f_{O_h}, f_M), \quad (2)$$

где $f_{O_h}(r, v)$, и $f_M(r, v)$ являются функциями распределения по скоростям для горячих атомов кислорода и компонентов окружающего атмосферного газа соответственно. Левая часть кинетического уравнения описывает перенос надтепловых атомов кислорода в планетном гравитационном поле s . В правой части кинетического уравнения источник Q_{O_h} описывает скорость образования надтепловых атомов кислорода в упругих и неупругих столкновениях потока частиц H^+/H с атомами атмосферного кислорода. Интегралы столкновений J_{M_i} для упругого и неупругого рассеяния горячих атомов кислорода в столкновениях с окружающим атмосферным газом запи-

сываются в стандартной форме [15, 16]. Предполагается, что атмосферный газ характеризуется локальной функцией Максвелла распределения по скоростям.

Кинетический метод Монте-Карло (КММК) является эффективным инструментом для изучения сложных кинетических систем в стохастическом приближении [1, 18], где приведены детали алгоритмической реализации численной модели. Суть метода КММК состоит в генерировании множества траекторий для состояния исследуемой физической системы, которые отвечают столкновениям и переносу надтепловых атомов кислорода в переходной области верхней атмосферы Марса в данном случае. Поэтому в численной реализации модели (КММК-1) кинетики и переноса потока высыпающих протонов и атомов водорода из плазмы солнечного ветра накапливается статистика о столкновениях (1), сопровождающихся образованием надтепловых атомов кислорода и на ее основе определяется функция источника Q_{O_h} : $H^+[H](E) + O_{th} \rightarrow H^+[H](E' < E) + O_{sh}(E' = E - E)$, где E и E' – кинетические энергии частиц H^+/H до и после столкновения. Данная функция задает скорость образования надтепловых атомов кислорода при высыпании энергичных частиц H^+/H и используется в качестве входных данных для кинетической модели (2) термализации и переноса горячих атомов кислорода в переходной области (КММК-2). Выходные данные кинетической модели КММК-2 – это функция распределения атомов кислорода по кинетической энергии и энергетический спектр направленного вверх потока горячих атомов кислорода на верхней границе исследуемой переходной области атмосферы Марса.

Вместо прямого решения сложного интегро-дифференциального кинетического уравнения Больцмана используется метод численного стохастического моделирования подобных кинетических систем [14]. Для этого горячие частицы в переходной области верхней атмосферы Марса представляются системой модельных частиц. Так как численная модель отвечает микроскопическому уровню описания состояния газа в планетной короне, за характерные масштабы времени и пространства принимаются локальные средние время и длина свободного пробега горячих частиц у нижней границы переходной области, где окружающий атмосферный газ более плотный. Нас интересовали, прежде всего, расчеты заселения переходной области верхней атмосферы Марса надтепловыми атомами кислорода, поэтому нижняя граница энергии надтепловых атомов в модели задавалась значением 0.08 эВ, что соответствует экзосферной температуре ~180–200 К при низком уровне солнечной активности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

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 прибором MAVEN/SWIA [8]. Профили температуры и плотности основных компонентов CO_2 , CO и O атмосферы взяты из модели [19] для низкого уровня солнечной активности.

В представленных ниже расчетах при помощи кинетической модели Монте-Карло предполагалась произвольная структура индуцированного магнитного поля Марса. Характерные значения напряженности поля $B_0 = 10, 15, 20$ и 30 нТл использовались в проведенных расчетах в интервале высот 80–300 км верхней атмосферы Марса в соответствии с диапазоном значений, измеренных на Марсе с помощью КА Mars Global Surveyor [20], Mars Express [21] и MAVEN [22].

Так как периапсис орбиты КА MAVEN достигается на относительно низких высотах, то в настоящее время появилась возможность изучить явления, вызванные проникающими глубоко в атмосферу Марса атомами водорода H (ЭНА) с высокими энергиями. В работе [2] представлены результаты расчетов высыпания как протонов, так и атомов водорода, полученные на основании *in situ* измерений высыпающихся потоков протонов в верхних слоях атмосферы Марса в качестве входных параметров модели (рис. 1). Чтобы оценить вклад дополнительного источника надтепловых атомов кислорода – столкновений (1) с переносом избыточной энергии от высыпающихся протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями к тепловым атомам кислорода – в формирование горячей протяженной короны Марса, были рассмотрены следующие варианты модели – высыпание протонов из магнитослоя (раздел 3.1) и высыпание атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра (раздел 3.2).

3.1. Убегание атомов O при высыпании протонов из магнитослоя Марса

Для расчетов при помощи усовершенствованной кинетической модели высыпания протонов в качестве граничного условия на высоте 500 км принимался энергетический спектр протонов, высыпающихся 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 [8] (показан линией синего цвета на рис. 1). Данный спектр типичен для протонов, проникающих в атмосферу из магнитослоя Марса. В расчетах доминантным ком-

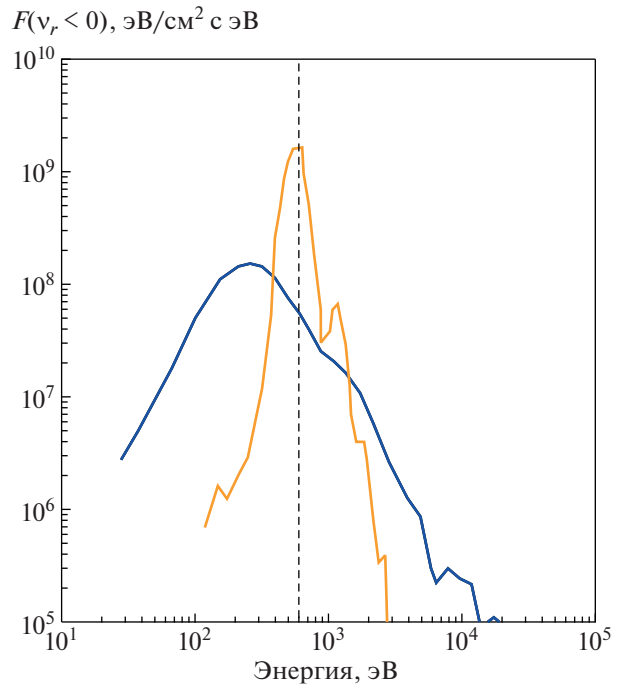


Рис. 1. Исходные данные для кинетической Монте-Карло модели процессов высыпания (КМКМ-1): интегрированные по углу энергетические спектры дифференциальных потоков протонов из солнечного ветра (оранжевая линия) и из магнитослоя (синяя линия), взятые из работы [8]. Вертикальная пунктирная линия соответствует пику невозмущенных протонов солнечного ветра при 600 эВ.

понентом считалась горизонтальная составляющая индуцированного магнитного поля Марса.

В численных реализациях стохастической модели КМКМ-2 горячей протяженной короны Марса накапливалась статистика распределений надтепловых атомов по кинетическим энергиям во всех расчетных ячейках. Это позволяет оценить локальные функции распределения по кинетической энергии ($\Phi_{\text{РЭ}}$) и восходящие и нисходящие потоки горячих атомов кислорода в переходной области верхней атмосферы Марса. Как отмечалось выше, горячими обычно называют частицы с кинетическими энергиями, в 5–10 раз превышающими среднюю тепловую энергию, т.е. надтепловые частицы с энергиями от 0.08 эВ. Собственно на рис. 2–4 горизонтальная ось кинетической энергии и начинается со значения 0.1 эВ. Кроме того, на рисунках энергия убегания для атомарного кислорода из атмосферы Марса ~2 эВ отмечена вертикальной линией. На верхней панели рис. 2 видно, что область надтепловых энергий до 2 эВ существенно населена, причем распределение образующихся за счет процессов высыпания частиц H/H^+ из солнечного ветра надтепловых атомов кислорода является существенно неравновесным по кинетической энер-

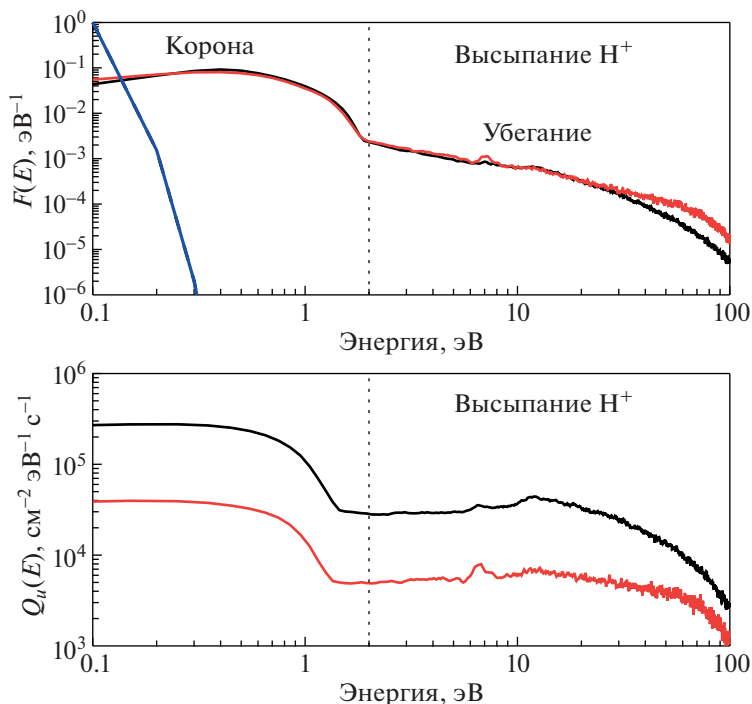


Рис. 2. Верхняя панель: результаты расчета модели КМКМ-2 со спектром высыпающих протонов из магнитослоя Марса. Расчет источника в модели КМКМ-1 проведен без учета (кривые черного цвета) и с учетом горизонтальной составляющей наведенного магнитного поля с величиной напряженности $B = 15$ нТ (кривые красного цвета). Показаны функции распределения (ФРЭ) по кинетической энергии $F(E)$ движущихся вверх тепловых (линия синего цвета) и надтепловых атомов кислорода на высоте 500 км экзосферы Марса. Для сравнения каждая из ФРЭ нормирована на единицу. Вертикальной пунктирной линией показана энергия убегания (~ 2 эВ) атомов кислорода из атмосферы Марса. Нижняя панель: показаны области энергетического спектра восходящего потока атомов кислорода на высоте 500 км, ответственные как за население горячей короны (слева от пунктирной линии), так и за формирование потока убегания из атмосферы Марса за счет процессов высыпания протонов с высокими энергиями из плазмы солнечного ветра.

гии. Эти надтепловые атомы кислорода и формируют дополнительную к фотохимической фракции [11, 12] составляющую горячей короны Марса, образующуюся за счет атмосферного разбрызгивания при протонных полярных сияниях. Помимо горячих частиц, образовавшихся в результате высыпания протонов, в горячую фракцию также включены атомы кислорода из тепловой атмосферной фракции с надтепловыми энергиями (т.е. атомы кислорода из хвоста распределения Максвелла). Эти частицы также участвуют в образовании горячей кислородной короны Марса. Расчеты показывают, что на высотах выше экзобазы горячую корону преимущественно заселяют надтепловые атомы, образовавшиеся в реакции (1) благодаря переносу из нижележащих слоев термосферы. Это приводит к тому, что атомов с энергиями, превышающими энергию убегания, становится больше, чем на высотах ниже экзобазы, где горячие частицы эффективно термализуются в столкновениях с частицами нейтрального атмосферного газа — атомарным кислородом и молекулами углекислого газа. Более того, процессы высыпания приводят к

образованию атомов кислорода со сверхтепловыми ($E > 10$ эВ) энергиями, т.е. являются источником энергетических атомов (ЭНА O) кислорода в окружающем Марс пространстве. На нижней панели рис. 2 представлены энергетические спектры движущихся вверх горячих атомов кислорода на высоте 500 км в условиях модели с высыпанием протонов. Видно, что поток потери атомов кислорода существенно зависит от величины наведенного магнитного поля.

3.2. Убегание атомов O при высыпании атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра

На рис. 3 представлены результаты расчетов энергетических спектров движущихся вверх горячих атомов кислорода на высоте 500 км для модели процессов высыпания атомов водорода с высокими энергиями. При моделировании использован поток протонов от невозмущенного солнечного ветра, измеренный на орбите 27 февраля 2015 г. (см. рис. 1, оранжевая сплошная кривая). Согласно оценкам из работы [23], спектр высыпающих атомов водорода в модели

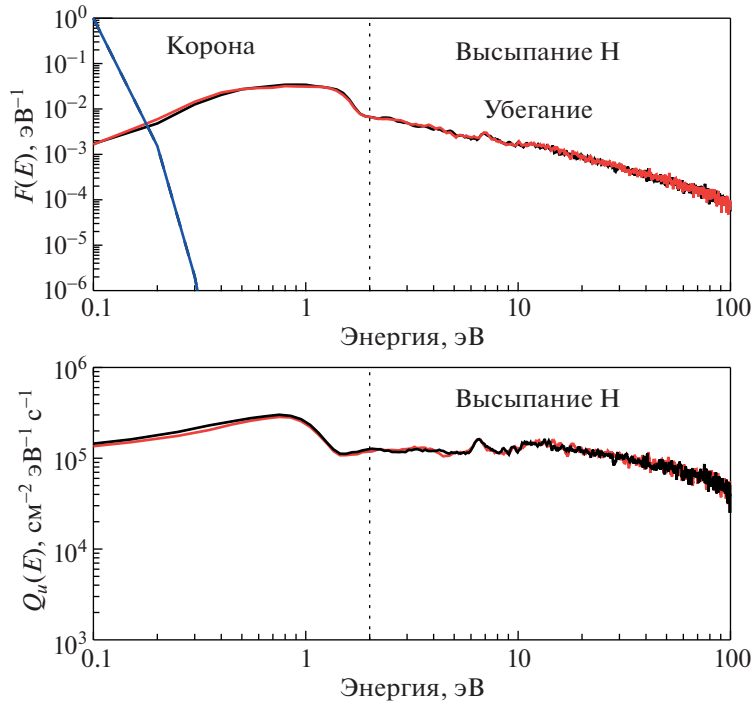


Рис. 3. Аналогично рис. 2, представлены результаты расчета модели КМКМ-2 со спектром высыпающихся атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра.

КМКМ-1 был взят равным 1% от интегрированного по углам спектра ионов от солнечного ветра.

На верхней панели рис. 3 показана общая структура функций распределения по энергии атомов кислорода, заселяющих корону Марса. Из расчетов при помощи модели КМКМ-2 видно, что ФРЭ атомов кислорода носят существенно неравновесный характер по сравнению с тепловой фракцией кислородной короны, так как присутствует значительная фракция атомов кислорода в области надтепловых энергий (>0.4 эВ). На нижней панели представлены энергетические спектры направленного вверх потока атомов кислорода, убегающих из атмосферы Марса. В этих моделях источником над- и сверхтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере Марса являются столкновения тепловых атомов кислорода с высыпающимися атомами водорода с высокими кинетическими энергиями, а именно Q_{Oh} : $H(E) + O_{th} \rightarrow H(E' < E) + O_{sh}(E'' = E - E')$. Из представленного на нижней панели рис. 3 сравнения восходящих (направленных вверх) потоков надтепловых атомов кислорода, образующихся вследствие высыпания атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра, видно, что влияние наведенного магнитного поля в этом случае несущественно.

Для сравнения рассмотренных в статье двух случаев высыпания частиц с высокими энергиями — протонов из магнитослоя Марса (кривые

черного цвета) и атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра (кривые красного цвета) — на рис. 4 приведены ФРЭ (верхняя панель) и энергетические спектры восходящего потока (нижняя панель) атомов кислорода. Расчеты источников в модели КМКМ-1 проведены в обоих случаях без учета горизонтальной составляющей наведенного магнитного поля. Видно, что энергетические спектры убегающих из атмосферы Марса атомов кислорода различаются, что соответствует условиям высыпания частиц с высокими энергиями, представленным на рис. 1.

Расчетные функции распределения позволили получить оценки скорости нетеплового убегания нейтрального кислорода из марсианской верхней атмосферы за счет процессов высыпания. А именно, из наших предыдущих исследований [11, 24] известно, что нетепловой поток убегания атомов O за счет экзотермической фотохимии меняется в интервале $(0.5-1.0) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в зависимости от уровня солнечной активности. Из приведенных выше результатов расчетов (см. нижние панели рис. 2–4) следует, что потоки убегания атомов кислорода за счет высыпания протонов (модели без и с учетом индуцированного магнитного поля $B = 0$ нТ и 15 нТ) и атомов водорода (модели $B = 0$ нТ и 15 нТ) равны $2.3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $3.1 \times 10^6 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $5.3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, $5.3 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Видно, что поток убегания атомов O за счет высыпания протонов и атомов водо-

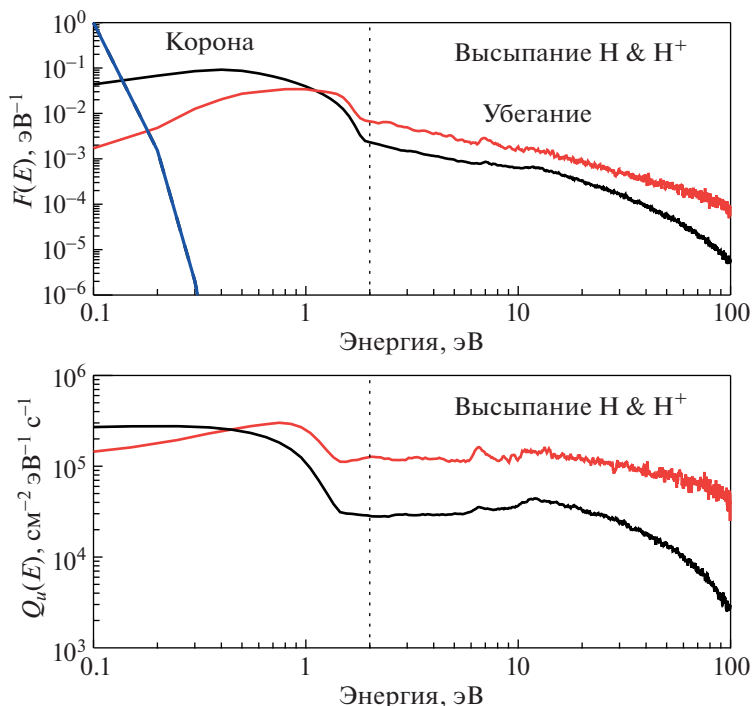


Рис. 4. Аналогично рис. 2 представлены результаты расчетов модели КМКМ-2 со спектрами атомов водорода из невозмущенного солнечного ветра (линии красного цвета) и протонов из магнитослоя Марса (линии черного цвета), высыпающихся на верхней границе 500 км модельной атмосферы. Расчеты источника в модели КМКМ-1 проведены без учета горизонтальной составляющей наведенного магнитного поля.

рода из солнечного ветра меняется в интервале $(0.31-5.3) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Соответственно глобальная скорость потери атомов кислорода из атмосферы Марса за счет атмосферного разбрызгивания при протонных полярных сияниях на Марсе в соответствии с формулами из работы [11] изменяется в пределах $(0.3-5.2) \times 10^{25} \text{ О с}^{-1}$ в зависимости от характерных параметров высыпающихся частиц и величины наведенного магнитного поля.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Известно (см., например, [1, 10, 25]), что атомарный кислород теряется из атмосферы Марса преимущественно за счет нетепловых процессов, основными из которых являются фотохимические реакции, протекающие в результате поглощения солнечных УФ фотонов в марсианской термосфере и сопровождающиеся образованием горячих (надтепловых) нейтральных атомов. Надтепловые атомы кислорода населяют экзосферу и могут убегать из экзосферы в открытое космическое пространство, если они обладают достаточной кинетической энергией (см., например, [1]). Преобладающим фотохимическим источником надтепловых атомов О является диссоциативная рекомбинация ионов O_2^+ с ионо-

сферными электронами. Когда рекомбинация происходит в переходной от термосферы к экзосфере области, то движущийся вверх надтепловой атом, вероятно, не будет рассеиваться назад или замедляться ниже энергии убегания из-за последующих столкновений и с высокой вероятностью покинет атмосферу (см., например, [10-13, 19, 25, 26]). Приборы, размещенные на борту КА MAVEN, не позволяют измерить потоки убегających нейтральных атомов О напрямую. Однако проводятся измерения состава и содержания ионов в верхних слоях атмосферы, а также температуры и плотности электронов, позволяющие рассчитывать скорости диссоциативной рекомбинации. Также выполняются измерения нейтрального состава и плотности, что позволяет оценить вероятность убегания. Профили высоты этих двух величин (скорость диссоциативной рекомбинации и вероятность убегания) позволяют рассчитать скорость потери атомов О за счет фотохимических реакций [26]. Отметим, что детектор ASPERA-3 на борту КА Марс-Экспресс позволяет измерять спектры и потоки энергетических нейтральных атомов (ЭНА) водорода и кислорода, покидающие атмосферу Марса (см., например, [27]), но в силу инструментальных особенностей измерения потоков ЭНА начинаются с кинетических энергий $\sim 100 \text{ эВ}$. Соответственно наиболее интересный диапазон энергии

≥ 2 эВ, с которой, собственно, и начинается убега-ние надтепловых атомов кислорода, в наблюде-ниях не регистрируется. В частности, измерения ЭНА водорода, полученные в наблюдениях детектора MEX/ASPERA-3, были сравнены с ре-зультатами моделирования (см., например, [28]) при кинетических энергиях ≥ 100 эВ.

Другой подход к расчетам потока убегания нейтральных атомов O по сравнению с описан-ным выше подходом, когда используются в основ-ном локальные данные измерений, основан на дистанционном зондировании кислородной ко-роны. Наблюдения спектрографа MAVEN/IUVS, полученные при сканировании на лимбе в лини-ях из мультиплетов 130.4 и 135.6 нм атомарного кислорода, позволяют построить высотные про-фили горячей фракции атомов O [12], которые за-тем можно сопоставить с экзосферными моделя-ми, чтобы оценить фракцию убегающих атомов кислорода [26]. Эти два подхода в целом соответ-ствуют друг другу. Они приводят к оценкам ско-рости потери нейтрального кислорода со значе-ниями примерно $3.5\text{--}7.0 \times 10^{25} \text{ O c}^{-1}$ [3, 26, 27], в зависимости от неопределенностей в расчетах из-за конкретных предположений в модели. Обычно принимается репрезентативное значе-ние скорости потери нейтрального кислорода за счет фотохимических источников, равное $5 \times 10^{25} \text{ O c}^{-1}$, что эквивалентно потере массы ато-марного кислорода с темпом 1.3 кг c^{-1} [3]. Соот-ветственно полученные в наших расчетах значе-ния $(0.3\text{--}5.2) \times 10^{25} \text{ O c}^{-1}$ темпа потери атомов кислорода из атмосферы Марса за счет атмосфер-ного разбрызгивания при протонных полярных сияниях на Марсе сравнимы с величиной потери атомов O за счет фотохимии. Данный источник нетепловых потерь атомов кислорода за счет ат-мосферного разбрызгивания частицами H/H⁺ с высокими энергиями из солнечного ветра являет-ся спорадическим в отличие от регулярного ис-точника за счет экзотермической фотохимии. От-метим, что индуцированный процессами высы-пания поток убегания атомов кислорода может становиться доминантным в условиях экстре-мальных солнечных событий – солнечных вспы-шек и корональных выбросов массы, – когда по-токи энергии высыпавшихся протонов и атомов водорода могут на несколько порядков превы-шать значения, характерные для условий низкой солнечной активности [1, 3, 27].

В данной статье исследованы процессы кинети-ки и переноса горячих атомов кислорода в пе-реходной области (от термосферы к экзосфере) верхней атмосферы Марса. Рассчитаны функции распределения надтепловых атомов кислорода по кинетической энергии. Показано, что при про-тонных полярных сияниях на Марсе экзосфера населяется значительным количеством надтепло-

вых атомов кислорода с кинетическими энергия-ми вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е. форми-руется дополнительная к фотохимическим источ-никам горячая фракция кислородной короны, и образуется дополнительный нетепловой поток убегания атомарного кислорода из атмосферы Марса. Хотя протонные полярные сияния являют-ся спорадическими событиями, индуцирован-ный процессами высыпания поток убегания горячих атомов кислорода может становиться доминантным в условиях экстремальных солнеч-ных событий – солнечных вспышек и корональ-ных выбросов массы, – как показали недавние наблюдения КА MAVEN [3]. Изученный меха-низм потери атомов кислорода за счет атмосфер-ного разбрызгивания при протонных полярных сияниях на Марсе необходимо принимать во вни-мание, в особенности, в исследованиях эволюции климата планеты на геологических масштабах времени.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-02-00721a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *V. I. Shematovich and M. Ya. Marov*, *Physics Uspekhi* **61**, 217 (2018).
2. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, J.-C. Gérard, and B. Hubert*, *Astronomy Reports* **63**, 835 (2019).
3. *B. M. Jakosky, D. Brain, M. Chaffin, et al.*, *Icarus* **315**, 146 (2018).
4. *J.-L. Bertaux, F. Leblanc, O. Witasse, E. Quemerais, J. Lilensten, S. A. Stern, B. Sandel, and O. Korabiev*, *Nature* **435**, 790 (2005).
5. *B. Ritter, J.-C. Gérard, B. Hubert, and L. Rodriguez*, *Geophys. Res. Lett.* **45**, 231 (2018).
6. *N. M. Schneider, J. I. Deighan, S. K. Jain, A. Stiepen, et al.*, *Science* **350**, id.0313 (2015).
7. *J. Deighan, S. K. Jain, M. S. Chaffin, X. Fang, et al.*, *Nature Astronomy* **2**, 802 (2018).
8. *J. S. Halekas, R. J. Lillis, D. L. Mitchell, T. E. Cravens, et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 8901 (2015).
9. *J. Y. Chaufray, J.-L. Bertaux, F. Leblanc, and E. Quémerais*, *Icarus* **195**, 598 (2008).
10. *R. E. Johnson, M. R. Combi, J. L. Fox, W.-H. Ip, F. Leblanc, M. A. McGrath, V. I. Shematovich, D. F. Strobel, and J. H. Jr. Waite*, *Space Sci. Rev.* **139**, 355 (2008).
11. *H. Groeller, H. Lichtenegger, H. Lammer, and V. I. Shematovich*, *Planet. Space Sci.* **98**, 93 (2014).
12. *J. Deighan, M. S. Chaffin, J.-Y. Chaufray, A. I. F. Stewart, et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 9909 (2015).
13. *M. A. Krest'yanikova and V. I. Shematovich*, *Sol. Syst. Res.* **39**, 22 (2005).
14. *V. I. Shematovich*, *Sol. Syst. Res.* **38**, 28 (2004).

15. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and J.-C. Gerard*, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L02105 (2005).
16. *V. I. Shematovich*, *Sol. Syst. Res.* **51**, 249 (2017).
17. *D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, J.-C. Gérard, B. Hubert*, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **123**, 5850 (2018).
18. *V. I. Shematovich*, *Russian Chemical Reviews* **88**, 1013 (2019).
19. *J. L. Fox and A.B. Hac*, *Icarus* **204**, 527 (2009).
20. *D. A. Brain, F. Bagenal, M. H. Acuna, and J. E. P. Connerney*, *J. Geophys. Res.* **108**, 1424 (2003).
21. *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).
22. *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).
23. *E. Kallio, S. Barabash*, *J. Geophys. Res.* **106**, 165 (2001).
24. *V. I. Shematovich*, *Sol. Syst. Res.* **47**, 437 (2013).
25. *R. J. Lillis, D. A. Brain, S. W. Bougher, F. Leblanc, et al.*, *Space Sci. Rev.* **195**, 357 (2015).
26. *R. J. Lillis, J. Deighan, J. L. Fox, S. W. Bougher, et al.*, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122**, 3815 (2017).
27. *C. O. Lee, T. Hara, J. S. Halekas, E. Thiemann, et al.*, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122**, 2768 (2017).
28. *T.E. Cravens, A. Rahmati, J. L. Fox, R. Lillis, et al.*, *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122**, 1102 (2017).