

УДК 523.4

## АТМОСФЕРНЫЕ ПОТЕРИ АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА ПРИ ПРОТОННЫХ АВРОРАЛЬНЫХ СОБЫТИЯХ НА МАРСЕ

© 2021 г. В. И. Шематович\*

*Институт астрономии РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: shematov@inasan.rssi.ru*

Поступила в редакцию 19.03.2021 г.

После доработки 05.04.2021 г.

Принята к публикации 06.04.2021 г.

В данной работе впервые используется расчет проникновения в дневную атмосферу Марса протонов невозмущенного солнечного ветра за счет перезарядки в протяженной водородной короне (Шематович и др., 2021), что позволило самосогласованно рассчитать как источники надтепловых атомов кислорода, так и их кинетику и перенос. Дополнительный источник горячих атомов кислорода – столкновения с переносом количества движения и энергии от потока высыпавшихся атомов водорода с высокими кинетическими энергиями (ЭНА-Н) к атомарному кислороду в верхней атмосфере Марса, – включен в кинетическое уравнение Больцмана, решение которого было получено при помощи кинетической модели Монте-Карло. В результате, были получены оценки заселения горячей кислородной короны Марса и показано, что протонные авроральные события сопровождаются атмосферными потерями атомарного кислорода, величина которых изменяется в пределах  $(3.5–5.8) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Показано, что экзосфера населяется значительным количеством надтепловых атомов кислорода с кинетическими энергиями вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е., формируется горячая кислородная корона Марса. Полученные в самосогласованных расчетах при помощи комплекса кинетических Монте-Карло моделей значения скорости потери атомов кислорода из атмосферы Марса за счет спорадического источника – высыпания ЭНА-Н при протонных авроральных событиях на Марсе, – сравнимы с величиной потери атомов O за счет регулярного источника – реакций экзотермической фотохимии (Groeller и др., 2014; Jakosky и др., 2018). В настоящее время представляется, что потери атмосферы Марса за счет воздействия плазмы солнечного ветра и, в частности, высыпания в атмосферу потоков протонов и атомов водорода с высокими энергиями при солнечных вспышках может играть важную роль в потере нейтральной атмосферы на астрономических масштабах времени (Jakosky и др., 2018).

**Ключевые слова:** Солнечная система, Марс, солнечный ветер, горячая корона, потери атмосферы, кинетический метод Монте-Карло

**DOI:** 10.31857/S0320930X21040083

### ВВЕДЕНИЕ

Солнечное воздействие на верхние слои атмосферы Марса осуществляется, как за счет поглощения мягкого рентгеновского и жесткого ультрафиолетового солнечного излучения, так и воздействия плазмы солнечного ветра, и приводит к образованию протяженной нейтральной короны, заселенной надтепловыми (горячими) атомами H, C, N и O (см., например, Groeller и др., 2014). Одним из важных результатов КА MAVEN было подтверждение в наблюдениях при помощи спектрографа IUVS (Imaging UV Spectrograph) присутствия протяженной короны из атомов водорода, углерода и кислорода (Deighan и др., 2015). Горячая корона, в свою очередь, изменяется за счет притока плазмы солнечного ветра и локальных потоков захваченных из ионосферы ионов в пла-

нетную экзосферу. Такой приток приводит к образованию сверхтепловых атомов (энергетических нейтральных атомов – ЭНА), убегающих из марсианской нейтральной атмосферы из-за перезарядки с высыпавшимися ионами с высокими кинетическими энергиями.

Атомарный кислород теряется из короны Марса преимущественно за счет нетепловых процессов (см., например, Lillis и др., 2015; Шематович, 2019), 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 так называемую горячую корону и могут убежать из экзосферы в открытое космическое простран-

ство, если они обладают достаточной кинетической энергией (см., например, Шематович, 2019). Преобладающим фотохимическим источником надтепловых атомов O является диссоциативная рекомбинация ионов  $O_2^+$  с ионосферными 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, Fox, Nas, 2009; Lillis и др., 2017). Приборы, размещенные на борту КА MAVEN, не позволяют измерить потоки убегающих нейтральных атомов O напрямую, поэтому для получения оценок потери атмосферы необходимо привлекать численные модели (Шематович, 2019; Lillis и др., 2015) для интерпретации наблюдений планетных корон. Так, например, при дистанционном зондировании горячей кислородной короны Марса были получены высотные профили горячей фракции атомов O (Deighan и др., 2015) при помощи проведенного спектрографом MAVEN/IUVS сканирования на лимбе в линиях из мультиплетов 130.4 и 135.6 нм атомарного кислорода. Полученные оценки содержания надтепловых атомов кислорода сопоставлялись с моделями короны, чтобы оценить фракцию убегающих атомов кислорода (Lillis и др., 2017). В результате такого сравнения (Jakosky и др., 2018), были получены оценки скорости потери нейтрального кислорода со значениями примерно  $3.5\text{--}7.0 \times 10^{25} \text{ O c}^{-1}$  и обычно принимается репрезентативное значение скорости потери нейтрального кислорода за счет фотохимических источников, равное  $5 \times 10^{25} \text{ O c}^{-1}$ , что эквивалентно потере массы атомарного кислорода с темпом  $1.3 \text{ кг c}^{-1}$ .

Потеря планетной атмосферы в открытое космическое пространство может происходить посредством ряда различных тепловых и нетепловых процессов (Шематович, 2019). В наших предыдущих исследованиях (см., например, работу Шематович, Калиничева, 2020; и ссылки в ней) был исследован дополнительный источник убегания атомов кислорода из верхней атмосферы Марса за счет высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями из солнечного ветра. Такой механизм атмосферных потерь нейтральной верхней атмосферы впервые был предложен в исследовании протонных полярных сияний в верхней атмосфере Земли (см., например, работу Шематович, 2019; и ссылки в ней). Хотя протонные авроральные явления носят спорадический характер, тем не менее они являются проявлением повышенной солнечной активности и сопровождаются достаточно высокими скоростями потери атомарного кислорода из атмосферы Земли. Так как недавно протонные полярные сияния были

открыты в наблюдениях избыточного свечения атомарного водорода в линии Ly- $\alpha$  (Ritter и др., 2018; Deighan и др., 2018), то в работах (см., например, работу Шематович, Калиничева, 2020; и ссылки в ней) были предприняты попытки оценить вклад атмосферного разбрызгивания при протонных полярных сияниях на Марсе в темп потери атомов кислорода, тем более, что данный процесс не учитывался в недавних исследованиях потери атмосферы Марса по данным измерений КА MAVEN (Jakosky и др., 2018).

В данной статье исследованы процессы кинетики и переноса горячих атомов кислорода в верхней атмосфере Марса, образование которых при авроральных протонных явлениях на Марсе сопровождается высыпанием атомов водорода из солнечного ветра. Так как протонные авроральные события наблюдаются на дневной стороне Марса (Hughes и др., 2019) и вызываются проникающими в атмосферу потоками атомов водорода с высокими кинетическими энергиями (Deighan и др., 2018), то для расчета функции источника надтепловых атомов кислорода использованы разработанные ранее кинетические Монте-Карло модели (Шематович и др., 2019, 2021). Эти модели позволяют исследовать процесс перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса с целью получить спектры атомов водорода (Шематович и др., 2021), проникающих в атмосферу через границу индуцированной магнитосферы Марса. Далее полученные спектры атомов водорода используются в качестве верхнего граничного условия для кинетической Монте-Карло модели (Шематович и др., 2019) высыпания атомов водорода с высокими энергиями в верхнюю атмосферу, что позволило провести моделирование характеристик протонных авроральных событий на Марсе. В частности, были получены скорости образования и энергетические спектры атомов кислорода с надтепловыми энергиями за счет упругих и неупругих столкновений атмосферных атомов кислорода с проникающими в атмосферу атомами водорода. И, наконец, полученные таким образом скорости образования надтепловых атомов кислорода были использованы как источник для кинетической Монте-Карло модели (Шематович, Калиничева, 2020) для исследования кинетики и переноса надтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере планеты. В результате, были рассчитаны функции распределения надтепловых атомов кислорода по кинетической энергии в переходной от термосферы к экзосфере области атмосферы Марса. Найдено, что наблюдаемые на дневной стороне планеты протонные авроральные события на Марсе сопровождаются образованием значительного количества надтепловых атомов кислорода с кинетическими энергиями вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е. формируется дополнительная

к фотохимическим источникам горячая фракция кислородной короны, и образуется дополнительный нетепловой поток убегания атомарного кислорода из атмосферы Марса. В наших предыдущих исследованиях (см., например, работу Шематович, Калиничева, 2020; и ссылки в ней) в качестве граничного условия на верхней границе использовались лишь упрощенные оценки потока проникающих в атмосферу атомов водорода и аппроксимации их энергетических спектров. В данной работе впервые используются результаты расчетов проникновения в дневную атмосферу Марса протонов невозмущенного солнечного ветра за счет перезарядки в протяженной водородной короне (Шематович и др., 2021), что позволило самосогласованно рассчитать, как источники надтепловых атомов кислорода, так и их кинетику и перенос. В результате, были получены оценки заселения горячей кислородной короны Марса и величины атмосферных потерь атомарного кислорода при протонных авроральных событиях. Хотя протонные полярные сияния являются спорадическими событиями, однако индуцированный процессами высыпания поток убегания горячих атомов кислорода может стать доминантным в условиях экстремальных солнечных событий — солнечных вспышек и корональных выбросов массы, — как показали недавние наблюдения КА MAVEN (Deighan и др., 2015; Lee и др., 2018; Jakosky и др., 2015; 2018). Изученный механизм потери атомов кислорода за счет атмосферного разбрызгивания при протонных полярных сияниях на Марсе необходимо принимать во внимание, в особенности, в исследованиях эволюции климата планеты на геологических масштабах времени.

#### ОБРАЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ АТОМОВ КИСЛОРОДА В ПРОТОННЫХ АВРОРАЛЬНЫХ СОБЫТИЯХ

Одним из интересных результатов космической миссии MAVEN были наблюдения инструментами SWIA (Solar Wind Ion Analyzer) и SEP (Solar Energetic Particles) небольшой фракции протонов с энергиями, близкими к энергии солнечного ветра, но на высотах порядка ~150–250 км в атмосфере Марса (Halekas и др., 2015), которые показали, что скорость этой популяции почти соответствует наблюдаемой скорости солнечного ветра. Из предыдущих исследований было известно, что протоны солнечного ветра могут взаимодействовать с протяженной короной Марса и после обмена зарядом с атомами водорода в этой короне, определенная часть протонов воздействующего солнечного ветра может получить электрон и стать энергетическим нейтральным атомом водорода (ЭНА-Н). Как нейтральные, эти частицы с легкостью проникают через границу индуциро-

ванной магнитосферы Марса, попадая в более плотные области нейтральной атмосферы.

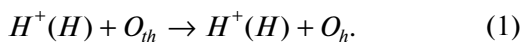
Протяженная водородная корона неоднократно наблюдалась в рассеянном солнечном ультрафиолетовом (УФ) излучении в линии Лайман- $\alpha$  при помощи КА Марс-Экспресс (Chaufraу и др., 2008), космического телескопа им. Хаббла (Clarke и др., 2014) и КА MAVEN (Chaffin и др., 2018). Наблюдения показали, что существуют значительные изменения в лучевой концентрации атомарного водорода в короне Марса в зависимости от сезона. Измерения при помощи прибора SWIA (Solar Wind Ion Analyzer) на борту КА MAVEN, проведенные в течение полного марсианского года, позволяют уверенно говорить, что вариации лучевой концентрации водорода в короне Марса могут достигать порядка величины (Halekas, 2017). Анализ распределений плотности водорода, полученных из наблюдений, указывает на то, что убегание водорода не может происходить только за счет молекулярного водорода, и действительно, пары воды были обнаружены на высотах 40–100 км в наблюдениях солнечного затмения с помощью прибора SPICAM/MEX (Maltagliati и др., 2013; Fedorova и др., 2018). Эти исследования показывают, что вода не так эффективно удерживается в холодной ловушке в мезосфере, как обычно предполагалось ранее. Новые данные о вертикальном распределении водяного пара в верхней атмосфере Марса были получены в наблюдениях прибора ACS (Atmospheric Chemistry Suite) на борту КА ExoMars Trace Gas Orbiter (Vandaele и др., 2019; Fedorova и др., 2020), которые свидетельствовали о крупных и быстрых сезонных вторжениях воды и ледяных частиц в верхние слои атмосферы, что приводит к повышению содержания водорода в короне. В зависимости от обилия и высоты паров воды и ледяных частиц, переносимых на высоты вплоть до 100 км (Vandaele и др., 2019; Fedorova и др., 2020), этот эффект может вызывать вариации лучевой концентрации водорода в короне Марса вплоть до порядка величины в зависимости от сезона (Chaffin и др., 2017; Heavens и др., 2018).

В работе (Шематович и др., 2021) при помощи кинетической Монте-Карло модели, далее обозначаемой как КМКМ-1, было проведено численное исследование влияния наблюдаемых изменений плотности протяженной водородной короны Марса на эффективность перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра и определены параметры и свойства процесса высыпания образующихся при перезарядке ЭНА-Н в дневную атмосферу Марса, что позволило детально исследовать протонные авроральные события на Марсе. Установлено, что значение эффективности перезарядки изменяется в интервале 4–8% для выявленных в наблюдениях вариаций лучевой концентрации атомарного водорода в ко-

роне Марса, а энергетический спектр проникающих через границу индуцированной магнитосферы в атмосферу Марса атомов водорода идентичен спектру невозмущенных протонов солнечного ветра.

Проникающие в дневную атмосферу энергичные атомы водорода ЭНА-Н сталкиваются 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 высыпавшегося потока ЭНА-Н с основными нейтральными компонентами атмосферного газа следует рассматривать как каскадный процесс, который сопровождается образованием нарастающего множества поступательно 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 КМКМ-2), разработанной ранее для анализа данных измерений приборов MEX/ASPERA-3 на борту космического аппарата (КА) Mars Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN (Шематович и др., 2019; 2021).

В исследуемом случае протонных авроральных событий на Марсе процессы высыпания ЭНА-Н можно рассматривать как дополнительный источник надтепловых атомов кислорода (Шематович, Калиничева, 2020), образующихся в результате атмосферного разбрызгивания частицами ЭНА-Н основной компоненты верхней атмосферы – атомарного кислорода. Соответственно, одним из последствий проникновения высыпавшегося потока частиц ЭНА-Н из солнечного ветра 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 свою избыточную кинетическую энергию при столкновениях с другими частицами атмосферы и распространяются в переходной области между термосферой и экзосферой (Шематович, Калиничева, 2020). Их кинетика и перенос описываются кинетическим уравнением Больцмана (см., например, работу Шематович, 2019 и ссылки в ней) для функций распределения по скоростям  $f_{O_h}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  и  $f_M(\mathbf{r}, \mathbf{v})$  для горячих атомов кислорода и компонентов окружающего атмосферного газа, соответственно. Предполагается, что атмосферный газ характеризуется локально равновесной

функцией Максвелла распределения по скоростям.

Кинетический метод Монте-Карло является эффективным инструментом для изучения сложных дискретных систем в стохастическом приближении (Шематович, 2019). В численной реализации упомянутой выше модели (КМКМ-2) кинетики и переноса потока высыпавшихся атомов водорода из плазмы солнечного ветра, накапливается статистика о столкновениях (1), сопровождающихся образованием надтепловых атомов кислорода и на ее основе определяется функция источника  $Q_{O_h}(E)$ :  $H(E) + O_{th} \rightarrow H^+(E' < E) + O_h(E' = E - E')$ , где  $E$  и  $E'$  – кинетические энергии частиц  $H$  до и после столкновения. Функция  $Q_{O_h}(E)$ , задает скорость образования надтепловых атомов кислорода при высыпании энергичных частиц  $H$  и используется в качестве входных данных для кинетической Монте-Карло модели (КМКМ-3) столкновений и переноса горячих атомов кислорода в переходной области. Выходные данные кинетической модели КМКМ-2 – это объемные скорости образования надтепловых атомов в столкновениях (1) и их функция распределения по кинетической энергии в исследуемой переходной области атмосферы Марса. Данная численная модель отвечает микроскопическому уровню описания состояния газа в планетной короне (Шематович, 2019), 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.

Исследуется область между высотами 80 и 500 км атмосферы Марса. За нижнюю границу взята относительно плотная термосфера, где горячие частицы быстро теряют избыточную кинетическую энергию в столкновениях с тепловыми молекулами углекислого газа и кислорода. Верхняя граница взята выше экзобазы (~190 км), где течение газа становится свободно молекулярным. Исследуемая область разбивается на ячейки с шагом 5 км. В каждой ячейке атмосферный газ, состоящий из молекул  $CO_2$  и  $N_2$  и атомов  $O$ , представляется модельными частицами с заданными концентрациями и температурами согласно расчетам работы (Fox, Nas, 2009). В каждой ячейке рождаются модельные частицы, отвечающие в физической модели функции источника надтепловых атомов кислорода в процессе (1), которые движутся в гравитационном поле Марса, а также сталкива-

ются с атмосферным газом, производя вторичные надтепловые частицы. Так как моделирование осуществляется на молекулярном уровне, то накапливается подробная статистика о пространственном распределении надтепловых атомов кислорода по скоростям (кинетической энергии) и об энергетических спектрах потоков частиц, как населяющих горячую кислородную корону, так и убегающих из атмосферы Марса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

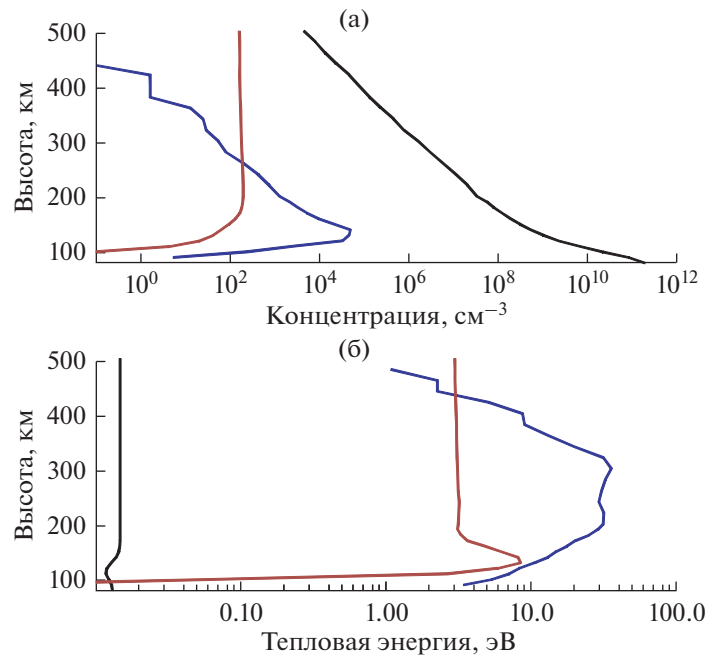
Для расчета функции источника надтепловых атомов кислорода была использована разработанная ранее кинетическая Монте-Карло модель (Шематович и др., 2019), при помощи которой исследован процесс перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса и получены спектры атомов водорода (Шематович и др., 2021), проникающих в атмосферу через границу индуцированной магнитосферы Марса. Далее полученные спектры атомов водорода используются в качестве верхнего граничного условия для кинетической Монте-Карло модели КМКМ-2 (Шематович и др., 2019) высыпания атомов водорода с высокими энергиями в верхнюю атмосферу, что позволило численно оценить характеристики протонных авроральных событий на Марсе. В частности, были получены скорости образования и энергетические спектры атомов кислорода с надтепловыми энергиями за счет упругих и неупругих столкновений (1) атмосферных атомов кислорода с проникающими в атмосферу атомами водорода. И, наконец, полученные таким образом скорости образования надтепловых атомов кислорода были использованы как функция источника для кинетической Монте-Карло модели КМКМ-3 (Шематович, Калиничева, 2020) для исследования кинетики и переноса надтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере планеты. В данной работе впервые использованы результаты расчетов проникновения в дневную атмосферу Марса протонов невозмущенного солнечного ветра за счет перезарядки в протяженной водородной короне (Шематович и др., 2021), что позволило самосогласованно считать, как источники надтепловых атомов кислорода, так и их кинетику и перенос.

Для оценки вклада дополнительного источника надтепловых атомов кислорода при протонных авроральных событиях — столкновений (1) с переносом избыточной энергии от высыпающихся атомов водорода с высокими кинетическими энергиями к тепловым атомам кислорода — в формирование горячей протяженной короны Марса были использованы по аналогии с работой (Шематович и др., 2021) модели А и Б, со следующей логикой расчетов:

- базовая Модель А, в которой профили температуры и плотности основных компонент  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{O}$  верхней атмосферы взяты из модели (Фок, Нас, 2009) для низкого уровня солнечной активности. Распределение атомов водорода в протяженной короне Марса задавалось при помощи модели Чемберлена для планетной экзосферы, параметры которой были выбраны следующими: высота экзобазы  $h_{\text{exo}} = 200$  км, температура и плотность атомарного водорода на высоте экзосферы задавались равными  $T(h_{\text{exo}}) = 179$  К и  $n_{\text{H}}(h_{\text{exo}}) = 1.48 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$  в соответствии с результатами работы (Chaffin и др., 2018). Далее, в качестве граничного условия на высоте 3000 км для модели КМКМ-1 (Шематович и др., 2021) использовались поток энергии и энергетический спектр протонов из невозмущенного солнечного ветра, измеренный прибором MAVEN/SWIA на орбите 27 февраля 2015 г. (Halekas и др., 2015). Полученные в расчетах КМКМ-1 спектры атомов водорода приняты в качестве верхнего граничного условия для кинетической Монте-Карло модели КМКМ-2 (Шематович и др., 2019) высыпания атомов водорода с высокими энергиями в верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы (ГИМ) на высоте 820 км, что позволило рассчитать высотные профили объемной скорости образования и энергетические спектры атомов кислорода, образующихся в столкновениях (1) с надтепловыми энергиями. Эти характеристики использованы как функция источника для кинетической Монте-Карло модели КМКМ-3 (Шематович, 2017), при помощи которой собственно и было выполнено исследование кинетики и переноса надтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере планеты;

- Модель Б, в которой была учтена вариация лучевой концентрации водорода в короне Марса, а именно, при тех же параметрах экзобазы увеличивалась концентрация атомов водорода  $n_{\text{H}}(h_{\text{exo}})$  на уровне экзобазы в два раза, что соответствует положению границы индуцированной магнитосферы на высоте 1260 км (см. детали в работе (Шематович и др. (2021))). Остальные процедуры расчета распределения надтепловых атомов кислорода в верхней атмосфере Марса аналогичны процедурам для Модели А.

Расчеты выполнены для солнечного зенитного угла, равного  $0^\circ$ . Результаты расчетов для представленных выше Моделей А и Б показаны на рис. 1–4. В численных реализациях кинетических Монте-Карло моделей накапливалась статистика распределений сверх- и надтепловых атомов водорода и кислорода по кинетическим энергиям во всех расчетных ячейках. А именно, в модели КМКМ-1 — поток и энергетический спектр атомов водорода, проникающих через ГИМ в верхнюю атмосферу Марса, в модели КМКМ-2 — объ-



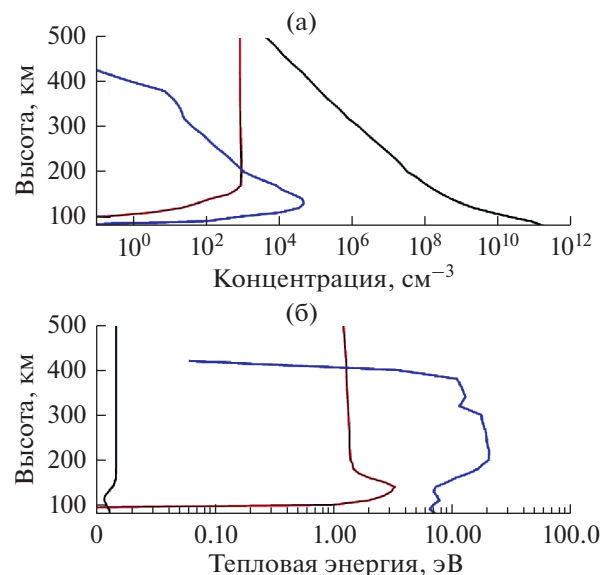
**Рис. 1.** (а) Высотные профили концентрации атмосферного кислорода (линия черного цвета) и надтеплого кислорода (линия коричневого цвета), рассчитанной при помощи модели КМКМ-3. Линией синего цвета показана скорость образования надтепловых атомов кислорода вследствие высыпания атомов водорода с высокими кинетическими энергиями. (б) Высотные профили средней кинетической энергии атмосферного кислорода (линия черного цвета) и надтеплого кислорода (линия коричневого цвета), полученного в результате расчетов. Линией синего цвета показана средняя кинетическая энергия надтепловых атомов кислорода, образующихся вследствие высыпания атомов водорода после перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса. Расчеты выполнены для базовой модели с границей индуцированной магнитосферы на высоте 820 км.

емные скорости образования надтепловых атомов кислорода и их распределение по кинетической энергии, а в модели КМКМ-3 – стационарное распределение надтепловых атомов кислорода, а также энергетический спектр потока убегания, в переходной от термосферы к экзосфере области атмосферы Марса.

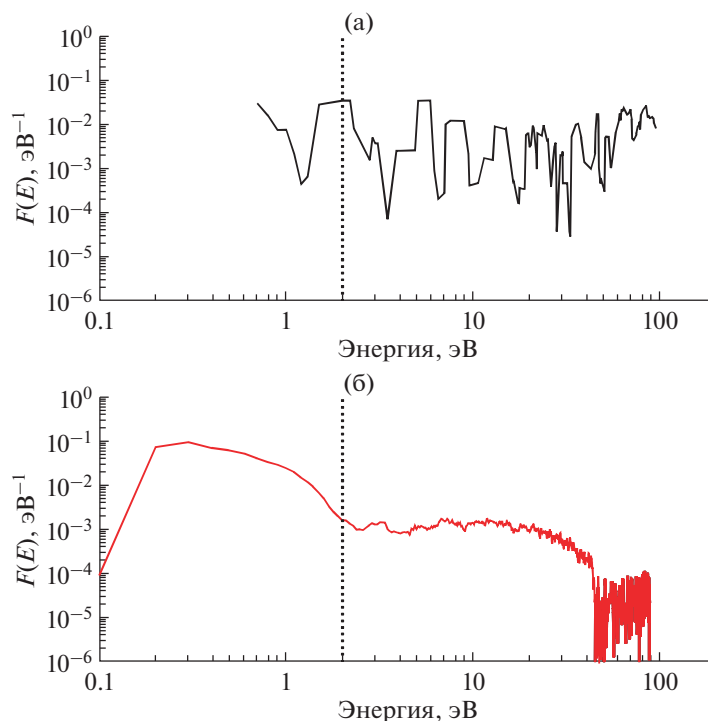
На рис. 1 и 2 линиями синего цвета показаны высотные профили скорости образования и средней кинетической энергии надтепловых атомов кислорода, образующихся в столкновениях (1) для Моделей А и Б соответственно. Здесь же линиями коричневого цвета приведены рассчитанные при помощи модели КМКМ-3 концентрация надтепловых атомов кислорода и их средняя кинетическая энергия. Также на рис. 1 и 2 линиями черного цвета показаны высотные профили концентрации и тепловой энергии для атмосферных атомов кислорода по данным из работы (Фох, Нас, 2009). Концентрации различных фракций атомарного кислорода представлены на панелях (а), а средние кинетические энергии – на панелях (б).

Из рис. 1 и 2 видно, что скорость образования надтепловых атомов кислорода выше для Модели Б, что приводит к более высокой концентрации надтепловых атомов О в короне Марса. Однако средняя кинетическая энергия надтепловых атомов в Модели Б несколько ниже, чем в Модели А. Дан-

ное распределение по высоте и энергетике источника надтепловых атомов кислорода за счет высыпания ЭНА-Н определяется тем обстоятель-



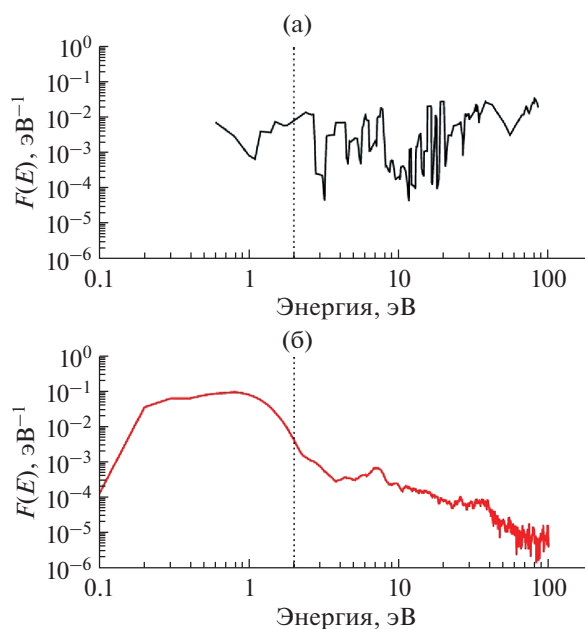
**Рис. 2.** (а) Аналогично рис. 1, только расчеты выполнены для модели с удвоенным содержанием водорода в протяженной короне Марса и, соответственно, границей индуцированной магнитосферы на высоте 1260 км.



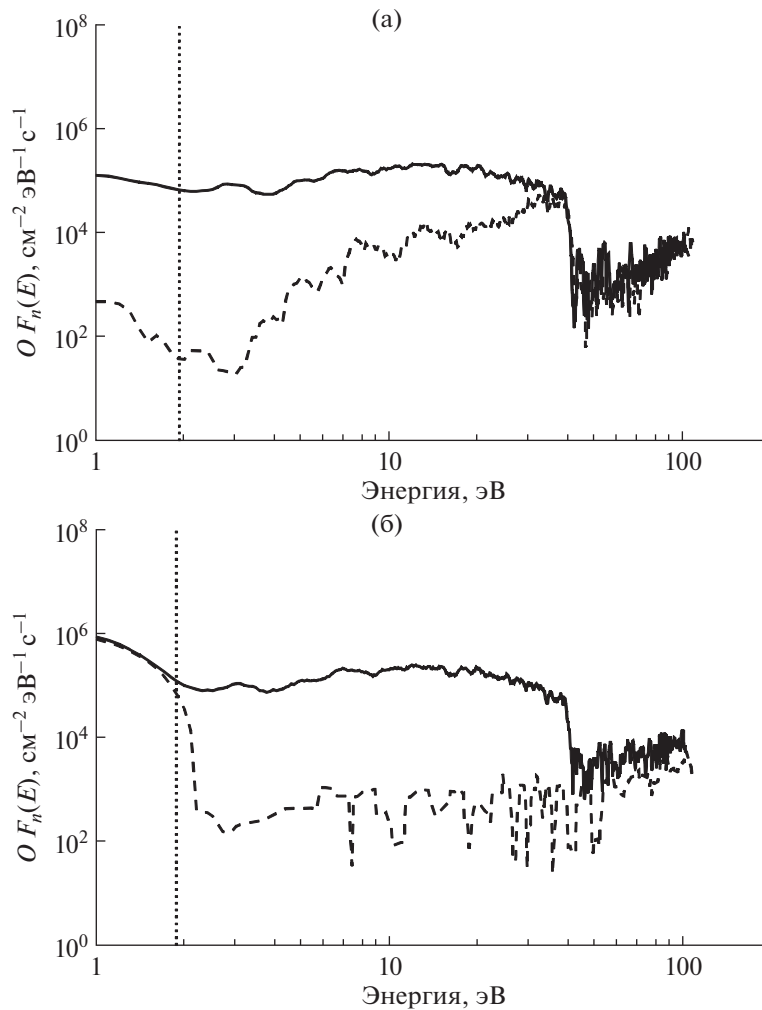
**Рис. 3.** Нормированные на единицу функции распределения по кинетической энергии (ФРЭ) (а) атомов кислорода, образующихся в столкновениях (1), вызванных высыпанием атомов водорода после перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса, и (б) расчетной фракции надтепловых атомов кислорода. Результаты расчетов для базовой Модели А с границей индуцированной магнитосферы на высоте 820 км показаны на высоте 140 км, где наблюдаются максимальные значения скорости образования надтепловых атомов О за счет высыпания ЭНА-Н. Вертикальная линия показывает энергию убегания из атмосферы Марса.

ством, что для модели с удвоенным содержанием водорода в короне Марса, как показывают расчеты КМКМ-1, эффективность перезарядки протонов солнечного ветра в более плотной водородной короне выше (см., детали в работе (Шематович и др., 2021)), чем для Модели А. Отметим, что, как видно из сравнения высотных профилей горячих (коричневые линии на верхней панели рис. 1 и 2) и тепловых (линии черного цвета) атомов кислорода, характерная шкала высоты для распределения надтепловых атомов кислорода значительно выше, чем эта же высота для тепловых атомов. Это определяется существенно более высокой средней кинетической энергией надтепловых атомов кислорода.

На рис. 3 и 4 на верхних панелях (а) приведены результаты расчетов для Моделей А и Б при помощи КМКМ-2 нормированной на единицу функции распределения по кинетической энергии атомов кислорода, образующихся вследствие высыпания атомов водорода после перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса. На нижних панелях (б) рис. 3 и 4 показаны результаты расчета при помощи модели КМКМ-3 стационарной функции распределения (ФРЭ) надтепловых атомов кислорода для протонных авроральных событий, отвеча-



**Рис. 4.** Аналогично рис. 3, только результаты расчетов показаны для Модели Б на высоте 140 км, где наблюдаются максимальные значения скорости образования надтепловых атомов О за счет высыпания ЭНА-Н. Вертикальная линия показывает энергию убегания из атмосферы Марса.



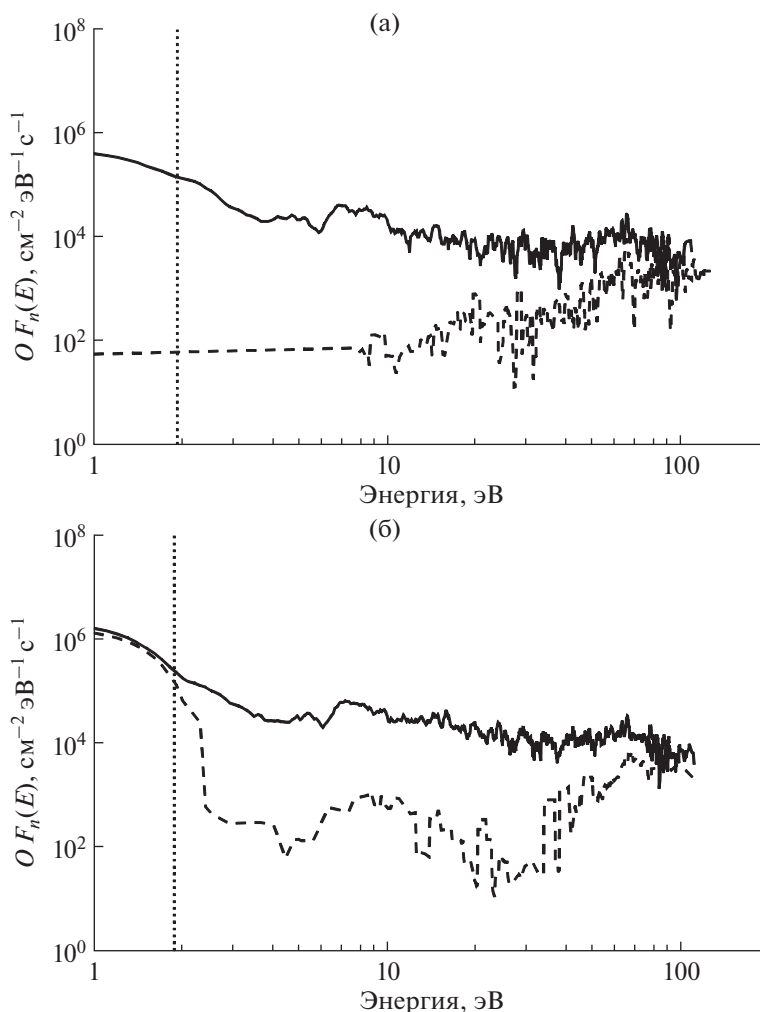
**Рис. 5.** Представлены результаты расчетов восходящего (сплошные линии) и нисходящего (штриховые линии) потоков надтепловых атомов кислорода для базовой Модели А на высотах (а) 140 км и (б) 220 км в верхней атмосфере Марса. В области высоты 140 км наблюдаются максимальные значения скорости образования надтепловых атомов О за счет высыпания ЭНА-Н, а высота 220 км расположена в экзосфере Марса, откуда происходит убегание атомов О с надтепловыми энергиями. Вертикальная линия показывает энергию убегания из атмосферы Марса.

ющих Моделям А и Б. Расчеты функций распределения приведены для высоты 140 км, отвечающей пику производства свежих надтепловых атомов кислорода при высыпании атомов водорода с высокими энергиями.

На рис. 3 и 4 вертикаль отмечена энергия убегания для атомарного кислорода из атмосферы Марса ~2 эВ. Распределение атомов кислорода, образующихся в столкновениях (1) за счет высыпания ЭНА-Н показывает, что данный источник приводит к появлению в атмосфере атомов с кинетическими энергиями вплоть до 100 эВ, а их распределение носит существенно неравновесный характер. Из расчетов стационарных ФРЭ, показанных на нижней панели рис. 3 и 4, видно, что область надтепловых энергий до 2 эВ существенно населена и формируется за счет упругих столкновений с тепловыми атомами кислорода,

которые и вносят дополнительную составляющую, показанную линиями коричневого цвета на рис. 1 и 2, к фотохимической фракции (Groeller и др., 2014) горячей короны Марса. Расчеты показали, 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 (>1.0 эВ), а на высотах выше экзобазы (т.е. 180–200 км) горячую корону преимущественно заселяют надтепловые атомы О, образовавшиеся в реакции (1), благодаря переносу из нижележащих слоев термосферы. Это приводит к тому, что частиц с энергиями, превышающими энергию убегания, становится больше, чем на высотах ниже экзобазы, где надтепловые частицы эффективно теряют избыточную кинетическую энергию в частых столк-





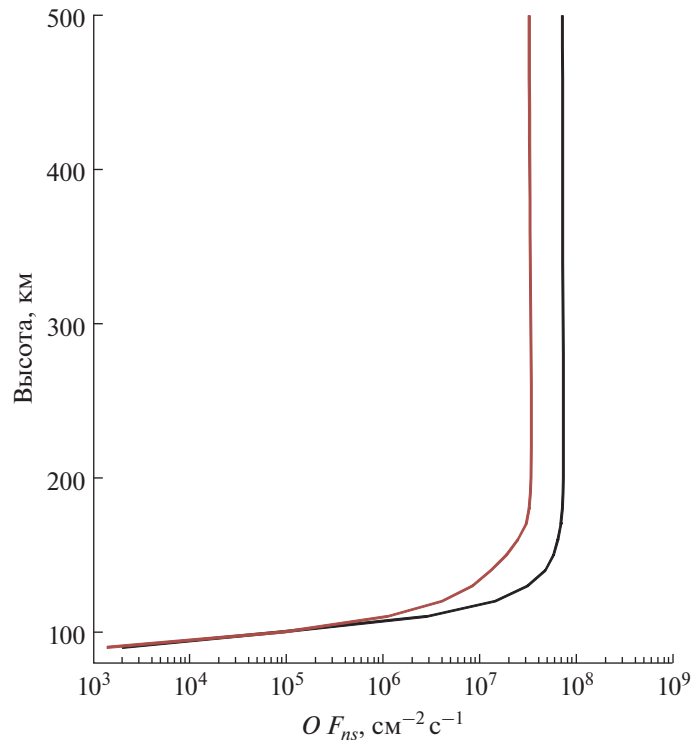
**Рис. 6.** Аналогично рис. 5, только представлены результаты расчетов восходящего (сплошные линии) и нисходящего (штриховые линии) потоков надтепловых атомов кислорода для Модели Б.

новениях с частицами нейтрального атмосферного газа — атомарным кислородом и молекулами углекислого газа. Более того, процессы высыпания приводят к образованию протяженных хвостов в распределении атомов кислорода в области сверхтепловых ( $E > 10$  эВ) энергий, т.е. являются источником энергетических атомов (ЭНА-О) кислорода в окружающем Марс пространстве, которые частично регистрировались инструментом ASPERA-3 на борту КА Марс-Экспресс.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчетов при помощи модели КМКМ-3 восходящего (сплошные линии) и нисходящего (штриховые линии) потоков надтепловых атомов кислорода на высотах (а) 140 км и (б) 220 км в верхней атмосфере Марса для Моделей А и Б соответственно. В области высоты 140 км наблюдаются максимальные значения скорости образования надтепловых атомов О за счет высыпания ЭНА-Н, а высота 220 км расположена в экзосфере Марса, откуда

происходит убегание атомов О с надтепловыми энергиями. На рис. 7 показаны линиями черного и коричневого цвета высотные профили проинтегрированного по энергии восходящего потока надтепловых атомов кислорода для Моделей А и Б соответственно.

Собственно, восходящие потоки надтепловых атомов кислорода, показанные на нижних панелях рис. 5 и 6, позволяют оценить значения потоков убегания атомарного кислорода из атмосферы Марса при протонных авроральных событиях. Для этого необходимо выполнить интегрирование по энергии восходящего потока атомов О, начиная с выделенной вертикальной линией локальной энергии убегания. В результате, для потоков убегания для Моделей А и Б получены следующие оценки: Модель А —  $5.8 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  и Модель Б —  $3.5 \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, при протонных авроральных событиях дополнительный источник — столкновения тепловых атомов



**Рис. 7.** Расчетные профили восходящего потока надтепловых атомов кислорода для Моделей А (линия черного цвета) и Б (линия коричневого цвета).

кислорода с высыпаящимися атомами водорода с высокими кинетическими энергиями, а именно  $Q_{Oh}$ :  $H(E) + O_{th} \rightarrow H(E < E) + O_{sh}(E' = E - E)$ , — приводит к потере атомарного кислорода из атмосферы Марса с величиной потока убегания в пределах  $(3.5-5.8) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Из наших предыдущих исследований (см., например, работу Groeller и др., 2014; и ссылки в ней) известно, что нетепловой поток убегания атомов O за счет экзотермической фотохимии меняется в интервале  $(0.5-5.0) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  в зависимости от уровня солнечной активности, а в предыдущих исследованиях вклада высыпания в атмосферные потери были получены следующие оценки: (а) поток убегания атомов O за счет высыпания протонов и атомов водорода из солнечного ветра изменяется в интервале  $(0.7-28.0) \times 10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  для измеренных инструментом MEX/ASPERA-3 спектров высыпаящихся протонов в условиях низкого уровня солнечной активности и спектров высыпаящихся атомов водорода, полученных в результате гибридного моделирования взаимодействия плазмы солнечного ветра с короной Марса; (б) поток убегания атомов O за счет высыпания протонов и атомов водорода из солнечного ветра, представленных локально измеренными прибором MAVEN/SWIA (Halekas и др., 2015) энергетическими спектрами, меняется

в интервале  $(0.31-5.3) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (см., например, работу Шематович, Калиничева, 2020; и ссылки в ней). Полученные в данной работе оценки атмосферной потери атомарного кислорода при протонных авроральных событиях на Марсе близки по своим значениям к оценкам работы (Шематович, Калиничева, 2020), однако впервые расчеты выполнены самосогласованно. А именно, использован лишь измеренный прибором MAVEN/SWIA (Halekas и др., 2015) энергетический спектр протонов солнечного ветра до взаимодействия с водородной короной, а расчеты основных процессов — перезарядка протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса, сопровождающаяся высыпанием ЭНА-Н в нейтральную атмосферу и образованием убегющего из атмосферы потока надтепловых атомов кислорода, — при протонных авроральных событиях были выполнены при помощи комплекса кинетических Монте-Карло моделей (Шематович и др., 2019; 2021). Соответственно, можно заключить, что индуцированный процессами высыпания поток убегания атомов кислорода может быть доминантным в условиях экстремальных солнечных событий — солнечных вспышек и корональных выбросов массы, когда потоки энергии высыпаящихся протонов и атомов водорода могут на несколько порядков превышать значения, характерные для условий низкой солнечной

активности (Halekas и др., 2015; Jakosky и др., 2018).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены процессы образования, кинетики и переноса надтепловых атомов кислорода в переходной области (от термосферы к экзосфере) при протонных авроральных событиях в дневной атмосфере Марса, вызванных высыпанием атомов водорода с высокими энергиями. Дополнительный источник горячих атомов кислорода – столкновения (1) с переносом количества движения и энергии от потока высыпавшихся частиц  $\text{H}/\text{H}^+$  с высокими кинетическими энергиями к атомарному кислороду в верхней атмосфере Марса, а именно,  $Q_{\text{Oh}}: \text{H}(E) + \text{O}_{\text{th}} \rightarrow \text{H}(E' < E) + \text{O}_h(E'' = E - E')$ , – включен в кинетическое уравнение Больцмана, решение которого было получено при помощи кинетической модели Монте-Карло (см., например, работу Шематович, 2019 и ссылки в ней). В результате, были получены оценки заселения горячей кислородной короны Марса и показано, что протонные авроральные события сопровождаются атмосферными потерями атомарного кислорода, величина которых изменяется в пределах  $(3.5\text{--}5.8) \times 10^7 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Показано, что экзосфера населяется значительным количеством надтепловых атомов кислорода с кинетическими энергиями вплоть до энергии убегания 2 эВ, т.е. формируется горячая кислородная корона Марса. Полученные в самосогласованных расчетах скорости потери атомов кислорода из атмосферы Марса за счет высыпания ЭНА-Н при протонных авроральных событиях на Марсе сравнимы с величиной потери атомов O за счет фотохимии (Groeller и др., 2014; Jakosky и др., 2018). Следует отметить, что, хотя протонные полярные сияния являются спорадическими событиями, однако индуцированный процессами высыпания поток убегания горячих атомов кислорода может становиться доминантным в условиях экстремальных солнечных событий – солнечных вспышек и корональных выбросов массы, – как показали недавние наблюдения КА MAVEN (Deighan и др., 2015; Lee и др., 2015; Jakosky и др., 2018). В настоящее время представляется, что потери атмосферы Марса за счет воздействия плазмы солнечного ветра и, в частности, высыпания потоков протонов и атомов водорода с высокими энергиями при солнечных вспышках могут играть важную роль в эволюции атмосферы на астрономических масштабах времени (Jakosky и др., 2018).

Исследование выполнено при поддержке Проекта РФФ № 19-12-00370 (Разделы МОДЕЛЬ и РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Шематович В.И. Надтепловые частицы в астрохимии // Успехи химии. 2019. Т. 88. С. 1013–1045 (*Shematovich V.I. Suprathermal particles in astrochemistry // Russian Chemical Reviews. 2019. V. 88. P. 1013–1045.*)
- Шематович В.И., Калиничева Е.С. Убегание атомов кислорода из атмосферы при протонных полярных сияниях на Марсе // Астрон. журн. 2020. Т. 97. С. 608–616 (*Shematovich V.I., Kalinicheva E.S. Atmospheric escape of oxygen atoms during the proton aurorae at Mars // Astron. Reports. 2020. V. 64. P. 628–635.*)
- Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жилкин А.Г. Влияние вариаций протяженной водородной короны Марса на эффективность перезарядки с протонами солнечного ветра // Астрон. журн. 2021. Т. 98. С. 232–238 (*Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Zhilkin A.G. Effects of column density variations of extended hydrogen corona of Mars on the charge exchange efficiency with solar wind protons // Astron. Reports. 2021. V. 65. P. 203–208.*)
- Шематович В.И., Бисикало Д.В., Жерар Ж.-К., Хубер Б. Кинетическая Монте-Карло модель высыпания протонов и атомов водорода с высокими энергиями в атмосферу Марса с учетом измеренного магнитного поля // Астрон. журн. 2019. Т. 96. С. 836–846 (*Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Gérard J.-C., Hubert B. Kinetic Monte Carlo model of the precipitation of high-energy proton and hydrogen atoms into the Martian atmosphere with taking into account the measured magnetic field // Astron. Reports. 2019. V. 63. P. 835–845.*)
- Chaffin M.S., Chaufray J.Y., Deighan D., Schneider N.M., Mayyasi M., Clarke J.T. et al. Mars H escape rates derived from MAVEN/IUVS Lyman alpha brightness measurements and their dependence on model assumptions // J. Geophys. Res.: Planets. 2018. V. 123. P. 2192–2210.
- Chaffin M.S., Chaufray J.Y., Deighan J., Schneider N.M., McClintock W.E., Stewart A.I.F. et al. Elevated atmospheric escape of atomic hydrogen from Mars induced by high-altitude water // Nature Geoscience. 2017. V. 10. P. 174–178.
- Chaufray J.Y., Bertaux J.L., Leblanc F., Quemerais E. Observation of the hydrogen corona with SPICAM on Mars express // Icarus. 2008. V. 195. P. 598–613.
- Clarke J.T., Bertaux J.L., Chaufray J.Y., Gladstone G.R., Quemerais E., Wilson J.K., Bhattacharyya D. A rapid decrease of the hydrogen corona of Mars // Geophys. Res. Letters. 2014. V. 41. P. 8013–8020.
- Deighan J., Jain S.K., Chaffin M.S., Fang X., Halekas J.S., Clarke J.T., Schneider N.M., Stewart A.I.F., Chaufray J.-Y., Evans J.S., Stevens M.H., Mayyasi M., Stiepen A., Crismani M., McClintock W.E., Holsclaw G.M., Lo D.Y., Montmessin F., Lefevre F., Jakosky B.M. Discovery of a proton aurora at Mars // Nature Astronomy. 2018. V. 2. P. 802–807.
- Deighan J., Chaffin M.S., Chaufray J.-Y., Stewart A.I.F., Schneider N.M., Jain S.K., Stiepen A., Crismani M., McClintock W.E., Clarke J.T., Holsclaw G.M., Montmessin F., Eparvier F.G., Thiemann E.M.B., Chamberlin P.C., Jakosky B.M. MAVEN IUVS observation of the hot ox-

- xygen corona at Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. <https://doi.org/10.1002/2015GL065487>
- Fedorova A., Bertaux J.L., Betsis D., Montmessin F., Korablev O., Maltagliati L., Clarke, J.* Water vapor in the middle atmosphere of Mars during the 2007 global dust storm // *Icarus*. 2018. V. 300. P. 440–457.
- Fedorova A.A., Montmessin F., Korablev O., Luginin M., Trokhimovskiy A., Belyaev D.A., Wilson C.F.* Stormy water on Mars: The distribution and saturation of atmospheric water during the dusty season // *Science*. 2020. V. 367. P. 297–300.
- Fox J.L., Hać A.B.* Photochemical escape of oxygen from Mars: A comparison of the exobase approximation to a Monte Carlo method // *Icarus*. 2009. V. 204. P. 527–544.
- Halekas J.S.* Seasonal variability of the hydrogen exosphere of Mars // *J. Geophys. Res.: Planets*. 2017. V. 122. P. 901–911.
- Halekas J.S., McFadden J.P., Connerney J.E.P., Espley J.R., Brain D.A., Mitchell D.L., Larson D.E., Harada Y., Hara T., Ruhunusiri S., Jakosky B.M.* Time-dispersed ion signatures observed in the Martian magnetosphere by MAVEN // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. <https://doi.org/10.1002/2015GL064781>
- Heavens N.G., Kleinboehl A., Chaffin M.S., Halekas J.S., Kass D.M., Hayne P.O. et al.* Hydrogen escape from Mars enhanced by deep convection in dust storms // *Nature Astronomy*. 2018. V. 2(2). P. 126–132.
- Hughes A., Chaffin M., Mierkiewicz E., Deighan J., Jain S., Schneider N., Mayyasi M., Jakosky B.M.* Proton aurora on Mars: A dayside phenomenon pervasive in southern summer // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2019. V. 124. P. 10.533–10.548.
- Groeller H., Lichtenegger H., Lammer H., Shematovich V.I.* Hot Oxygen and Carbon Escape from the Martian Atmosphere // *Planet. and Space Sci.* 2014. V. 98. P. 93–105.
- Jakosky B.M., Grebowsky J.M., Luhmann J.G., Connerney J., Eparvier F., Ergun R., Halekas J., Larson D., Mahaffy P., McFadden J., Mitchell D.F., +83 co-authors.* MAVEN observations of the response of Mars to an interplanetary coronal mass ejection // *Science*. 2015. V. 350. Iss. 6261. P. aad0210:1–7.
- Jakosky B.M., Brain D., Chaffin M., Curry S., Deighan J., Zurek R.* Loss of the Martian atmosphere to space: Present-day loss rates determined from MAVEN observations and integrated loss through time // *Icarus*. 2018. V. 315. P. 146–160.
- Lee Y., Combi M.R., Tenishev V., Bougher S.W., Deighan J., Schneider N.M., McClintock W.E., Jakosky B.M.* A comparison of 3-D model predictions of Mars' oxygen corona with early MAVEN IUVS observations // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 9015–9022.
- Lillis R.J., Brain D.A., Bougher S.W., Leblanc F., Luhmann J.G., Grebowsky J. et al.* Characterizing atmospheric escape from Mars today and through time with MAVEN // *Space Sci. Rev.* 2015. V. 195, P. 357–442.
- Lillis R.J., Deighan J., Fox J.L., Bougher S.W., Lee Y., Combi M.R., Cravens T.E., Rahmati A., Mahaffy P.R., Benna M., Elrod M.K., McFadden J.P., Ergun R.E., Andersson L., Fowler C.M., Jakosky B.M., Thiemann E., Eparvier F., Halekas J.S., Leblanc F., Chaufray J.-Y.* Photochemical escape of oxygen from Mars: First results from MAVEN in situ data // *J. Geophys. Res.: Space Physics*. 2017. V. 122. P. 3815–3836.
- Maltagliati L., Montmessin F., Korablev O., Fedorova A., Forget F., Maattanen A. et al.* Annual survey of water vapor vertical distribution and water-aerosol coupling in the Martian atmosphere observed by SPICAM/MEx solar occultations // *Icarus*. 2013. V. 223(2). P. 942–962.
- Ritter B., Gérard J.-C., Hubert B., Rodriguez L., Montmessin F.* Observations of the proton aurora on Mars with SPICAM on board Mars Express // *Geophys. Res. Letters*. 2018. V. 45. P. 231–236.
- Vandaele A.C., Korablev O., Daerden F., Aoki S., Thomas I.R., Altieri F., Zorzano M.P. et al.* Martian dust storm impact on atmospheric H<sub>2</sub>O and D/H observed by ExoMars Trace Gas Orbiter // *Nature*. 2019. V. 568. P. 521–525.