

## КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЫСЫПАНИЯ ПРОТОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В АТМОСФЕРУ МАРСА

© 2021 г. В. И. Шематович<sup>1</sup>, \*, Д. В. Бисикало<sup>1</sup>

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

\*E-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 27.04.2021 г.

После доработки 16.05.2021 г.

Принята к публикации 14.06.2021 г.

Разработана кинетическая Монте-Карло модель воздействия потока протонов невозмущенного солнечного ветра на дневную атмосферу Марса. Впервые проведено самосогласованное моделирование деградации спектра протонов солнечного ветра в каскадном процессе перезарядки в протяженной водородной короне Марса, определены потоки энергии и энергетические спектры атомов водорода, проникающих в дневную верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы. Полученные характеристики позволяют проводить расчеты авроральных протонных свечений, наблюдаемых в верхней атмосфере Марса при помощи спектрографа IUVIS на борту КА MAVEN. В наших последующих исследованиях будет выполнено сравнение результатов этих расчетов с наблюдениями, что предоставит уникальную возможность уточнения свойств атмосферы и магнитного поля Марса, а также расширяет способы определения параметров солнечного ветра.

*Ключевые слова:* планетные атмосферы, полярные сияния, высыпание протонов солнечного ветра, кинетические эффекты

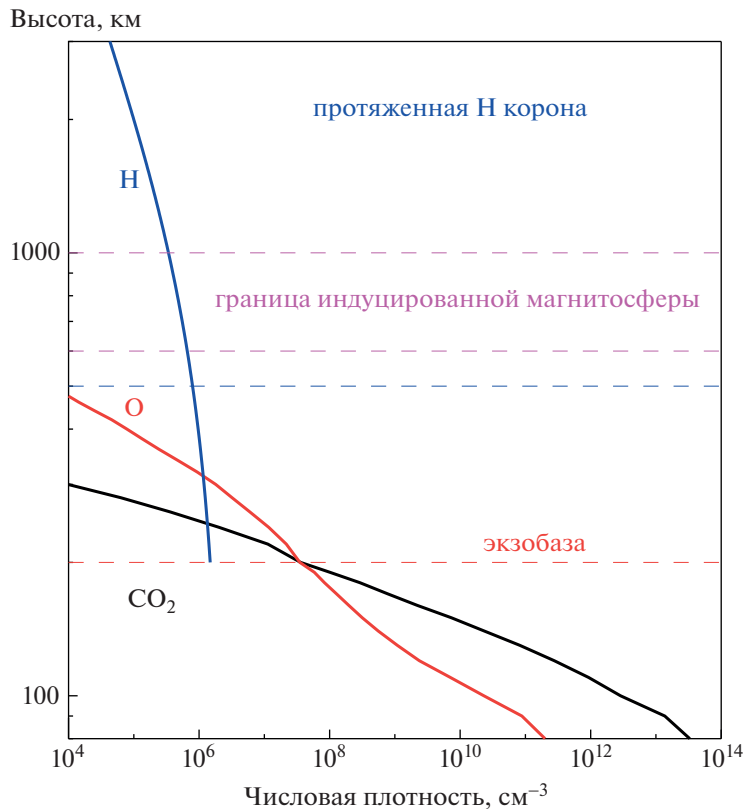
DOI: 10.31857/S0004629921100376

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Протонные авроральные явления, такие как протонная аврора — избыток свечения атомарного водорода в линии Ly $\alpha$  [1], измеренный при помощи спектрографа IUVIS на борту КА MAVEN, наблюдаются [2] на дневной стороне Марса и вызываются проникающими в атмосферу потоками атомов водорода с высокими кинетическими энергиями [1, 2]. Атомы водорода с кинетическими энергиями вплоть до нескольких кэВ образуются за счет перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра с тепловыми атомами водорода в протяженной (простирающейся на несколько радиусов планеты) короне Марса. Эффективность этого процесса зависит от величины лучевой концентрации атомов водорода в короне. Атомы водорода в отличие от протонов солнечного ветра легко проникают в дневную верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы и данный процесс высыпания сопровождается протонными авроральными явлениями. В данной работе для исследования авроральных протонных явлений использованы разработанные ранее кинетические Монте-Карло модели [3, 4] высыпания в верхнюю атмосферу планеты протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями. Эти модели позволи-

ли изучить процесс перезарядки протонов солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса и получить спектры атомов водорода [4], проникающих в атмосферу через границу индуцированной магнитосферы Марса. Рассчитанные энергетические спектры потока атомов водорода используются в качестве верхнего граничного условия для кинетической Монте-Карло модели [3] высыпания атомов водорода с высокими энергиями в верхнюю атмосферу, что и позволило провести моделирование характеристик протонных авроральных явлений в верхней атмосфере Марса. Следовательно, представленная кинетическая модель позволила как проследить перезарядку потока протонов невозмущенного солнечного ветра в протяженной водородной короне Марса, так и изучить кинетику и деградацию энергии потока атомов водорода, проникающих в верхнюю атмосферу на дневной стороне Марса.

В данной работе представлены кинетические расчеты проникновения потока атомов водорода в верхнюю атмосферу Марса, образующегося вследствие перезарядки протонов солнечного ветра с атомами водорода в протяженной водородной короне Марса. Получены оценки потока энергии и энергетические спектры атомов водорода и образующихся вследствие повторной пе-



**Рис. 1.** Высотные профили плотности основных компонентов термосферы  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}$  [6] и атомарного водорода в верхней атмосфере и протяженной короне Марса в соответствии с данными работы [7]. Также показаны условные границы экзосферы, протяженной водородной короны и границы индуцированной магнитосферы в окружающем Марс пространстве.

резарядки протонов в верхней атмосфере Марса. Приведены результаты расчетов параметров авроральных явлений для базовой модели с границей индуцированной магнитосферы на высоте 820 км.

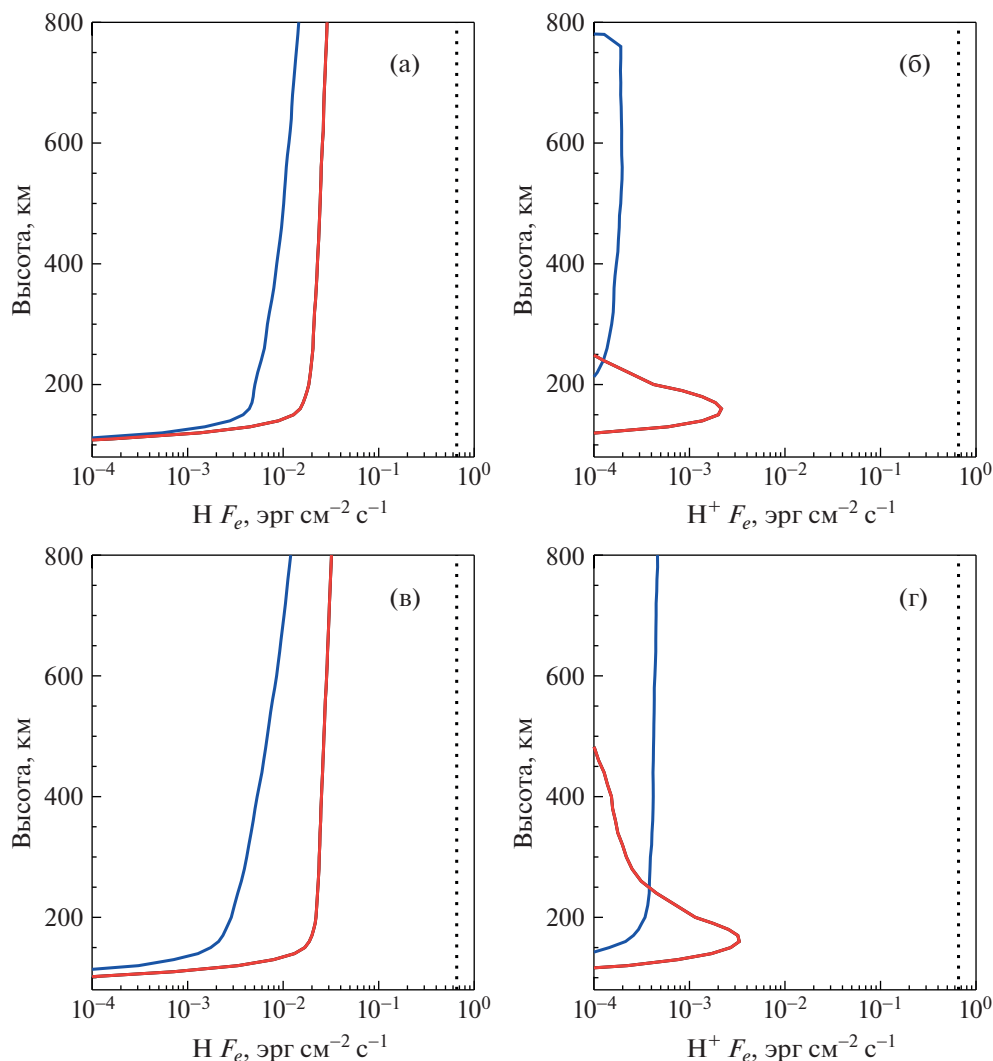
## 2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОНТЕ-КАРЛО МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОТОННЫХ АВРОРАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Нижняя граница исследуемой области атмосферы Марса расположена на высоте 80 км, где частицы с высокими кинетическими энергиями эффективно термализуются в столкновениях с нейтральными компонентами. Верхняя граница установлена на высоте 3000 км, где измерения потока и спектра высыпавшихся протонов из невозмущенного солнечного ветра были выполнены прибором MAVEN/SWIA [5]. Подробное описание всех численных аспектов кинетической модели, использованных в этом исследовании, приведено в недавних работах [3, 4].

В работе [4] при помощи кинетической Монте-Карло модели было проведено численное исследование влияния наблюдаемых изменений со-

держания атомарного водорода в протяженной короне Марса на эффективность перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра, и определены параметры и свойства процесса высыпания образующихся при перезарядке энергетических нейтральных атомов водорода (ЭНА-Н) в дневную атмосферу Марса, что позволяет детально исследовать протонные авроральные явления на Марсе. Установлено, что значение эффективности перезарядки изменяется в интервале 4–8% для выявленных в наблюдениях вариаций лучевой концентрации атомарного водорода в короне Марса, а энергетический спектр атомов водорода, проникающих через границу индуцированной магнитосферы в атмосферу Марса, 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 с атмосферными атомами и молекулами, и процессах ионизации и отрыва электрона (т.е. ионизацией ударяющего атома водорода) и приводит к



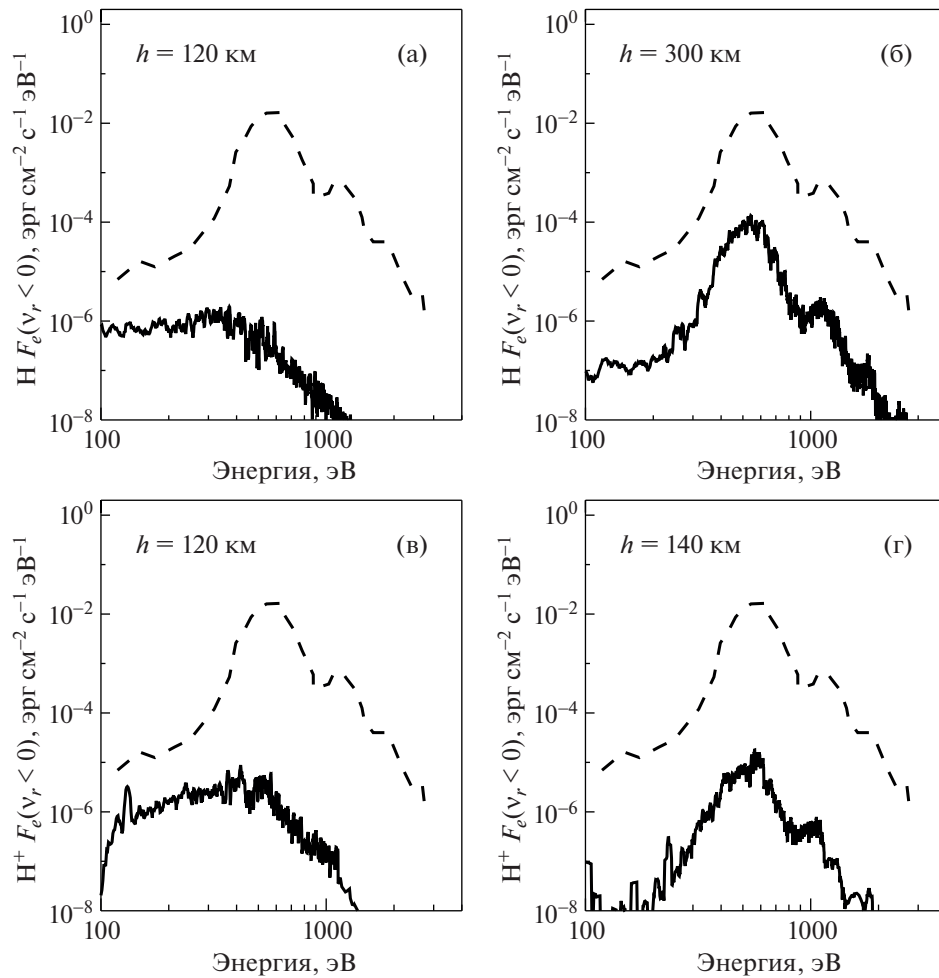
**Рис. 2.** Высотные профили нисходящего (линии красного цвета) и восходящего (линии синего цвета) потоков энергии атомарного водорода (а) и протонов (б). Атомы водорода с высокими кинетическими энергиями образуются за счет перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра с тепловыми атомами водорода в протяженной короне Марса с эффективностью  $\sim 4\%$  и проникают в верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы на высоте 820 км. На панелях (в) и (г) показаны вертикальные профили нисходящего (линии красного цвета) и восходящего (линии синего цвета) потоков энергии атомов водорода и протонов для модели A2 с повышенным содержанием водорода в короне Марса. На панелях (б) и (г) показаны потоки протонов, образующихся в верхней атмосфере Марса за счет процесса повторной перезарядки проникающих атомов водорода, соответственно, для рассмотренных моделей. Вертикальной прямой показано значение потока энергии протонов невозмущенного солнечного ветра, заданное в модели на верхней границе 3000 км, исходя из измерений прибора MAVEN/SWIA.

деградации энергии потока проникающих в атмосферу ЭНА-Н. Следовательно, взаимодействие выпадающих потоков 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 солнечного ветра в верхнюю атмосферу Марса использована модификация кинетической Монте-Карло модели, разработан-

ной ранее для анализа данных измерений приборов MEX/ASPERA-3 на борту космического аппарата (КА) Mars Express и MAVEN/SWIA на борту КА MAVEN [3, 4].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проведены для базовой модели A1, в которой профили температуры и плотности основных компонентов ( $\text{CO}_2$  и O) верхней атмосферы взяты из модели [6] для низкого уровня солнечной активности. Распределение атомов водо-

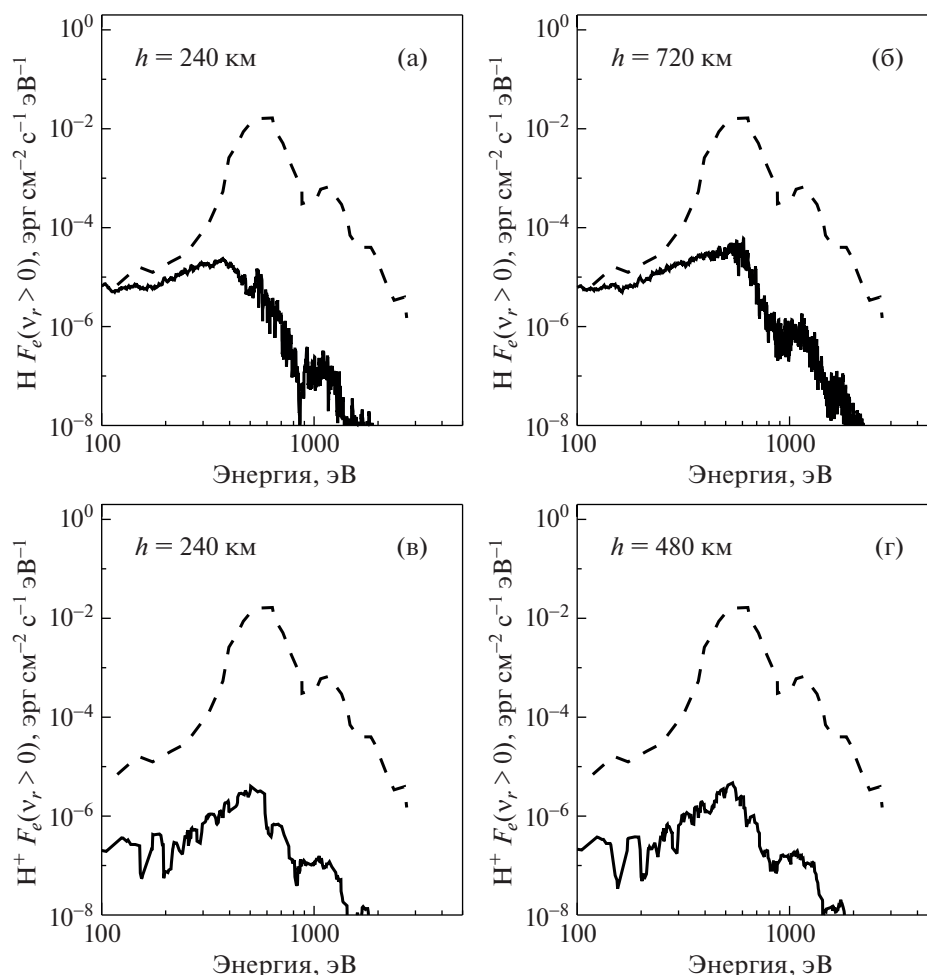


**Рис. 3.** Энергетические спектры нисходящих потоков атомов водорода на высотах 120 км (а) и 300 км (б) и протонов на высотах 120 км (в) и 140 км (г) верхней атмосферы Марса. Штриховая линия показывает энергетический спектр потока протонов невозмущенного солнечного ветра на верхней границе модели 3000 км.

рода 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  $T(h_{\text{exo}}) = 179$  К и  $n_{\text{H}}(h_{\text{exo}}) = 1.48 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$  в соответствии с результатами работы [7]. Далее, в качестве граничного условия на высоте 3000 км для модели [4] использовались поток энергии и энергетический спектр протонов из невозмущенного солнечного ветра, измеренный прибором SWIA/MAVEN на орбите 27 февраля 2015 г. [5]. Полученные в расчетах спектры атомов водорода приняты в качестве верхнего граничного условия для кинетической Монте-Карло модели [3] высыпания атомов водорода с высокими энергиями в дневную верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы (ГИМ).

В наблюдениях КА Mars-Express и КА MAVEN были открыты значительные вариации [7, 8] со-

держания атомарного водорода в короне Марса, которые вызывают изменение величины эффективности перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра с атомами водорода в короне [4]. Соответственно, аналогичные расчеты были также проведены для модели A2, в которой 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 2 раза, что соответствует положению границы индуцированной магнитосферы на высоте 1260 км (см. детали в работе [4]). Эффективность перезарядки для модели A2 достигает значения 6%, т.е. поток энергии проникающих в верхнюю атмосферу ЭНА-Н в 1.5 раза выше, чем соответствующее значение для модели A1. Расчеты выполнены для солнечного зенитного угла, равного  $0^\circ$ . Используемое в расчетах для базовой модели A1 распределение атомарного водорода в протяженной



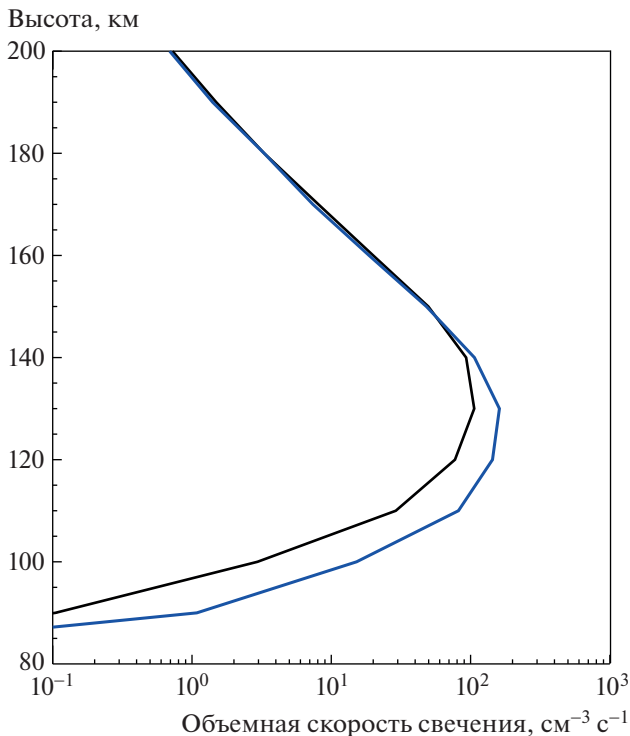
**Рис. 4.** Энергетические спектры восходящих потоков атомов водорода на высотах 240 км (а) и 720 км (б) и протонов на высотах 240 км (в) и 480 км (г) верхней атмосферы Марса. Штриховая линия показывает энергетический спектр потока протонов невозмущенного солнечного ветра на верхней границе модели 3000 км.

короне Марса и высотные профили плотности основных компонентов термосферы  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}$  показаны на рис. 1.

Результаты расчетов представлены на рис. 2–5. На рис. 2 показаны высотные профили нисходящего (проникающего в атмосферу) и восходящего (отраженного атмосферой) потоков энергии атомарного водорода и протонов для моделей A1 (панели (а) и (б)) и A2 (панели (в) и (г)). Атомы водорода с высокими кинетическими энергиями образуются за счет перезарядки протонов невозмущенного солнечного ветра с тепловыми атомами водорода в протяженной короне Марса с эффективностью  $\sim 4\%$  для модели A1 и проникают в верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы на высоте 820 км. В модели A2 эффективность образования атомов водорода с высокими кинетическими энергиями составляет  $\sim 6\%$ ; они проникают в верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы на вы-

соте 1260 км [4]. В верхней атмосфере Марса ниже ГИМ потоки протонов образуются за счет процесса повторной перезарядки проникающих атомов водорода.

Из расчетов видно, что вторичная перезарядка проникающих в верхнюю атмосферу Марса атомов водорода происходит преимущественно в диапазоне высот 80–180 км термосферы, где собственно и наблюдается основная деградация энергии потока атомов водорода в столкновениях с нейтральными компонентами –  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}$ . Так как для модели A2 энергия проникающего потока ЭНА-Н выше, то образование потока протонов происходит с более высоким темпом (красные линии на панелях (б) и (г)). Также из результатов расчетов следует, что отраженный атмосферой поток энергии атомов водорода выше для модели A1, а восходящий поток энергии для протонов выше для модели A2, так как эффективность вторичной перезарядки выше.



**Рис. 5.** Высотные профили объемной скорости возбуждения свечения атомарного водорода в линии  $\text{Ly}\alpha$  за счет высыпания атомов водорода с высокими кинетическими энергиями, проникающих в атмосферу Марса через границу индуцированной магнитосферы на высоте 820 км (линия черного цвета) и 1260 км (линия синего цвета). В последнем случае содержание атомов водорода в короне Марса превышает в 2 раза аналогичную величину для базового расчета с ГИМ на высоте 820 км.

На рис. 3 показаны расчетные энергетические спектры нисходящих потоков атомов водорода и протонов для модели A1 на различных высотах в верхней атмосфере Марса. Также для сравнения приведен исходный энергетический спектр потока протонов невозмущенного солнечного ветра на верхней границе модели 3000 км. Расчеты показывают, что энергетический спектр потока проникающих в атмосферу атомов водорода на экзосферных высотах по-прежнему сохраняет структуру энергетического спектра протонов солнечного ветра (панель (б) на рис. 3), но в столкновительной области, т.е. на высотах термосферы, происходит существенная потеря энергии потока ЭНА-Н, сопровождающаяся формированием низкоэнергетического крыла в энергетическом спектре (панель (а) на рис. 3). Следует отметить, что для нисходящего потока протонов на высотах столкновительной деградации проникающего потока ЭНА-Н энергетический спектр сохраняет структуру исходного потока протонов солнечного ветра, что было подтверждено в измерениях энергетического спектра протонов прибором

MAVEN/SWIA на орбитах КА MAVEN с низким периапсисом [5, 9], когда измерения проводились вплоть до высот 160 км.

На рис. 4 показаны рассчитанные для модели A1 энергетические спектры восходящих потоков атомов водорода и протонов на высотах выше экзобазы в верхней атмосфере Марса. Из расчетов видно, что энергетические спектры восходящего (или, другими словами, отраженного атмосферой) потока ЭНА-Н характеризуются развитым низкоэнергетическим крылом, что является следствием столкновений с основными нейтральными компонентами —  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}$  — в термосфере Марса. Энергетические спектры восходящего потока протонов, образовавшихся за счет повторной перезарядки ЭНА-Н, в большей мере сохраняют структуру энергетического спектра исходного потока протонов солнечного ветра, хотя и присутствует более развитое низкоэнергетическое крыло в распределении вследствие столкновений с нейтральными компонентами в термосфере Марса. Величина отраженного атмосферой потока энергии протонов совпадает с оценками, полученными в результате обработки данных детектора MAVEN/SWIA [9].

Полученные в расчетах при помощи кинетической Монте-Карло модели и представленные на рис. 3 и 4 потоки и энергетические спектры атомов водорода и протонов с высокими энергиями позволяют рассчитать все необходимые параметры протонных авроральных явлений в верхней атмосфере Марса. Так, например, на рис. 5 показаны высотные профили объемной скорости возбуждения свечения атомарного водорода в линии  $\text{Ly}\alpha$  за счет высыпания атомов водорода с высокими кинетическими энергиями, проникающих в атмосферу Марса через границу индуцированной магнитосферы для моделей A1 (линия черного цвета) и A2 (линия синего цвета). Соответственно, данные расчетные скорости совместно с моделью переноса излучения позволяют оценить избыточное свечение водорода в линии  $\text{Ly}\alpha$  при протонной авроре в атмосфере Марса, что было сделано в пробных расчетах в работе [10], и сравнить с результатами измерений [1, 2] спектрографа IUVIS на борту КА MAVEN, что и планируется выполнить в наших последующих исследованиях.

#### 4. ВЫВОДЫ

В работе представлена кинетическая Монте-Карло модель воздействия потока протонов невозмущенного солнечного ветра на дневную атмосферу Марса, при помощи которой впервые проведено моделирование деградации спектра протонов солнечного ветра в каскадном процессе перезарядки в протяженной водородной короне Марса, определены потоки энергии и энергетические спектры атомов водорода, проникающих в

дневную верхнюю атмосферу через границу индуцированной магнитосферы. Полученные характеристики позволяют оценить параметры авроральных протонных явлений [1, 2], наблюдаемых в верхней атмосфере Марса при помощи спектрографа IUVIS на борту КА MAVEN.

В текущей версии модели внешним параметром является положение границы индуцированной магнитосферы, которое может быть получено в расчетах обтекания Марса солнечным ветром при помощи гибридной модели (см., например, расчеты в работе [11]). Наши дальнейшие работы направлены на объединение предложенной кинетической Монте-Карло модели высыпания атомов водорода с высокими энергиями в верхнюю атмосферу с гибридной моделью обтекания солнечным ветром Марса для проведения полностью самосогласованных расчетов параметров протонных авроральных явлений на Марсе. Сравнение результатов таких расчетов с наблюдениями открывает уникальную возможность уточнения свойства атмосферы и магнитного поля Марса, а также расширяет способы определения параметров солнечного ветра.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

ВШ благодарит Российский научный фонд за поддержку в рамках Проекта 19-12-00370 (разделы 2 и 3 статьи). ДБ благодарит Министерство науки и высше-

го образования РФ за поддержку в рамках Проекта № 075-15-2020-780 “Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет” (разделы 1 и 4 статьи).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A. Hughes, M. Chaffin, E. Mierkiewicz, J. Deighan, et al.*, *J. Geophys. Res.: Space Physics* **124**, 10533 (2019).
2. *J. Deighan, S. K. Jain, M. S. Chaffin, X. Fang, et al.*, *Nature Astronomy* **2**, 802 (2018).
3. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, J.-C. Gérard, and B. Hubert*, *Astronomy Reports* **63**, 835 (2019).
4. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and A. G. Zhilkin*, *Astronomy Reports* **65**, 203 (2021).
5. *J. S. Halekas, R. J. Lillis, D. L. Mitchell, T. E. Cravens, et al.*, *Geophys. Res. Lett.* **42**, 8901 (2015).
6. *J. L. Fox and A. B. Hac*, *Icarus* **204**, 527 (2009).
7. *M. S. Chaffin, J. Y. Chaufray, D. Deighan, N. M. Schneider, et al.*, *J. Geophys. Res.: Planets*, **123**, 2192 (2018).
8. *J. S. Halekas*, *J. Geophys. Res.: Planets* **122**, 901, (2017).
9. *Z. Girazian and J. Halekas*, *J. Geophys. Res.: Planets* **126**, e066666 (2021).
10. *J.-C. Gérard, B. Hubert, B. Ritter, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo*, *Icarus* **321**, 266 (2019).
11. *X.-D. Wang, M. Alho, R. Jarvinen, E. Kallio, S. Barabash, and Y. Futaana*, *J. Geophys. Res.: Space Physics* **123**, 8730 (2018).