

УДК 523.4

НЕТЕПЛОВАЯ ПОТЕРЯ АТМОСФЕРЫ СУБ-НЕПТУНА π Men c ЗА СЧЕТ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ФОТОХИМИИ

© 2022 г. А. А. Автаева^a, В. И. Шематович^{a, *}^aИнститут астрономии РАН, Москва, Россия

*e-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 31.08.2021 г.

После доработки 15.11.2021 г.

Принята к публикации 26.11.2021 г.

В работе оценивается вклад реакций экзотермической фотохимии, а именно диссоциации молекулярного водорода, жестким УФ-излучением и сопутствующим потоком фотоэлектронов в образование фракции надтеплого атомарного водорода в переходной $H_2 \rightarrow H$ области протяженной верхней атмосферы экзопланеты — горячего суб-нептуна π Men c и формирование соответствующего потока убегания из атмосферы. Рассчитаны скорость образования и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии при диссоциации H_2 . При помощи численной стохастической модели горячей планетной короны исследованы на молекулярном уровне кинетика и перенос надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере, и рассчитан нетепловой поток убегания. Поток убегания оценен величиной $2.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ для умеренного уровня звездной активности в УФ-излучении, что позволяет получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет процессов диссоциации H_2 , равной $6.7 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$. Расчетная оценка близка к полученным из наблюдений оценкам возможной скорости потери атмосферы экзопланеты π Men c в диапазоне не выше, чем $1.0 \times 10^9 \text{ г с}^{-1}$. Данная оценка скорости потери атмосферы экзопланетой π Men c за счет надтепловых атомов водорода может рассматриваться как среднее значение, так как расчеты проведены для условий умеренной звездной активности в УФ-излучении и для минимальных значений вероятностей преддиссоциации возбужденных электронных уровней молекулы H_2 . Предложенный источник надтепловых атомов водорода рекомендуется включить в современные астрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет.

Ключевые слова: экзопланеты, наблюдения в УФ-диапазоне, планетные атмосферы, астрономия, потеря атмосферы, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0320930X22020013

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее распространенным типом планет, обнаруженным в ходе исследований экзопланет за последнюю четверть века (см., например, Fressin и др., 2013) являются планеты, занимающие промежуточное положение по размеру между Землей и Нептуном, и вращающиеся по орбитам, более близким к их родительским звездам, чем у Меркурия. Для планет этого класса часто используется термин “горячие суб-нептуны”, так как нет их точных аналогов в Солнечной системе. Их называют горячими из-за того, что обычно их периоды обращения менее 100 дней, т.е. они вращаются на низких орбитах и, соответственно, верхние атмосферы этих планет подвержены воздействию высоких потоков жесткого излучения звезды и сильно нагреваются. Более интенсивные потоки звездного излучения в мягком рентгеновском диапазоне (soft X-rays, 1–10 нм) и жесткого УФ-излучения (extreme ultraviolet (EUV) — КУФ, 10–100 нм), так называемого жесткого излучения

звезды (XUV) в диапазоне длин волн 1–100 нм, на таких близких орбитальных расстояниях будут в значительной степени изменять структуру и состав верхних слоев атмосфер этих планет (Massol и др., 2016; Owen, 2019) и, в частности, приводить к образованию протяженных газовых оболочек у горячих экзопланет (см., например, Bisikalo и др., 2017). Два преобладающих механизма, которые призваны объяснить потерю первичных газовых оболочек суб-нептунов на их эволюционном пути, — это фотоиспарение из-за высокого потока энергии жесткого излучения родительской звезды (Owen, Jackson, 2012; Lopez и др., 2012) и потеря атмосферы за счет энергии ядра, выделяющейся во время его остывания, когда светимость от горячего ядра подстилающей планеты подпитывает нагрев оболочек планеты, что приводит к потере атмосферы (Ginzburg и др., 2016). Эти два механизма имеют схожую физическую основу: нагрев верхних слоев атмосферы планеты вызывает гидродинамический отток, похожий на звездный ветер Пар-

кера, что приводит к потере массы атмосферой (см., например, Owen, 2019).

В настоящее время активно ведутся работы по моделированию тепловых потерь первичных атмосфер горячих экзопланет малого размера, включая режим гидродинамического оттока атмосферного газа (см., например, недавний обзор таких исследований в работах Owen, 2019; Owen и др., 2020). Результаты открытий планет с космического телескопа (КТ) Kepler показали совершенно неожиданную картину образования планет, которая сильно отличается от той, которая предполагается на основе наблюдательных данных для нашей Солнечной системы: наблюдаемое распределение радиусов экзопланет, определяемых в наблюдениях транзитов, является идеальным континуумом (Rowe и др., 2015), простираясь от планет типа Земли с размерами меньше 1 радиуса Земли до планет-гигантов с радиусами больше 4 радиусов Юпитера. Результаты миссии КТ Kepler позволили выявить бимодальность в распределении по радиусам горячих суб-нептунов с относительным дефицитом планет между 1.5 и 2.0 радиусами Земли — так называемой “долины радиусов” (Fulton и др., 2017; Van Eylen и др., 2018). Эта бимодальность предполагает, что суб-нептуны — это в основном скалистые планеты, родившиеся с первичной водородно-гелиевой атмосферой, масса которой составляет несколько процентов от массы планеты, и была захвачена из протопланетной туманности. Планеты из области, находящейся выше “долины радиусов”, смогли сохранить свои первичные атмосферы (суб-нептуны как миры с радиусами от 1.8 до 4 радиусов Земли), в то время как планеты из области, находящейся ниже “долины радиусов”, потеряли свою первичную атмосферу и представляют собой практически обнаженные ядра (супер-земли как миры с радиусами в пределах от 1 до 1.7 радиусов Земли). Эти открытия свидетельствуют, что существуют экзопланеты всех размеров, и многие из них могут иметь скалистые ядра, окруженные тонкой оболочкой из легких газов H_2 –He. Другой пример разнообразия, обнаруженного в популяции экзопланет, можно найти в составе их атмосфер. Помимо некоторых остающихся неопределенностей, открытие нескольких реальных каменных планет с малой массой с оболочками из легких газов H_2 и/или H_2O указывает на то, что многие планеты, которые могут считаться планетами земного типа, не полностью теряют свои исходные водородные протоатмосферы (Lammer и др., 2014; Luger и др., 2015; Rogers, 2015; Massol и др., 2016).

Недавние открытия такого разнообразия планет, и в частности, горячих суб-нептунов, которых нет в Солнечной системе, сопровождались большой работой с целью лучше понять процессы образования суб-нептунов и их последующей эволюции (Schlichting, 2014; Ginzburg и др., 2016; Izidoro и др., 2017). Радиусы значительной части

этих планет достаточно большие, что может быть свидетельством существования протяженных H/He -оболочек, содержащих до несколько процентов от общей массы планеты (Wolfgang, Lopez, 2015). Это означает, что суб-нептуны сформировались при наличии первичного газового протопланетного диска. Поскольку потеря массы атмосферы является обычным явлением после рассеивания газового диска, то массы атмосфер, которые наблюдаются сегодня, как правило, не такие же, как массы вещества, захватываемые планетой в присутствии первичного газового диска (Ikoma, Hori, 2012; Owen, Jackson, 2012; Ginzburg и др., 2016). Для решения данной актуальной проблемы необходимо более глубоко изучить тепловые и нетепловые процессы потери атмосферы горячими суб-нептунами на их эволюционном пути.

Наблюдения на КТ HST (Hubble Space Telescope) (см. Gandolfi и др., 2018; García Muñoz и др., 2020) показали образование у горячего суб-нептуна π Men с протяженной атмосферой. Соответственно, объектом исследования в данной статье выбрана экзопланета π Men с, первая открытая в космической миссии TESS экзопланета с транзитом (Gandolfi и др., 2018). Она находится на низкой орбите (расстояние 0.067 а. е.) по отношению к родительской звезде π Men (яркой и спокойной звезде класса G0 V). Из наблюдений (Gandolfi и др., 2018) известны основные параметры планеты — радиус $R_p = (2.06 \pm 0.03) \times R_{\text{Earth}}$ и масса $M = (4.52 \pm 0.81) M_{\text{Earth}}$, — а средняя плотность равна $2.82 \pm 0.53 \text{ г см}^{-3}$, что позволяет отнести эту планету к классу горячих супер-земель и суб-нептунов. Из оценок массы и объемной плотности горячего суб-нептуна π Men с можно предположить, что данная планета могла удерживать значительную атмосферу (Gandolfi и др., 2018; King и др., 2019). Из-за яркости родительской звезды эта система очень хорошо подходит для широкого спектра дальнейших наблюдений и исследований с целью изучения атмосферы этой экзопланеты как характерного примера горячего суб-нептуна, поскольку π Men с сильно облучена жестким излучением родительской звезды, а ее объемная плотность соответствует обилию H_2O . В работе (García Muñoz и др., 2020) приведены результаты поиска атмосферного водорода, образующегося за счет фотодиссоциации молекул H_2 и H_2O в верхних слоях атмосферы π Men с. Использовались результаты трансмиссионной спектроскопии в линии $H I \text{ Ly}\alpha$ в наблюдениях спектрографа STIS на борту КТ HST, однако поглощение в линии $H I \text{ Ly}\alpha$ не было обнаружено. Эти наблюдения предварительно можно объяснить тем обстоятельством (García Muñoz и др., 2020), что планеты со средней плотностью $\leq 2 \text{ г см}^{-3}$ (и, вероятно, с атмосферами с преобладанием содержания водорода) приводят к поглощению в линии $H I \text{ Ly}\alpha$, в то время как планеты с плотностью $\geq 3 \text{ г см}^{-3}$ (и вероятно, с атмосферами без преобладания со-

держания водорода) не приводят к измеримому поглощению.

Существующие аэрономические модели (King и др., 2019; García Muñoz и др., 2020; Shaikhislamov и др., 2020) верхней атмосферы планеты π Men с предсказывают значительный темп потери атмосферы. Для того, чтобы оценить влияние КУФ-излучения родительской звезды и сопутствующего потока фотоэлектронов на образование надтепловых атомов водорода в переходной области $H_2 \rightarrow H$ атмосферы π Men с используются данные о составе нейтральной атмосферы и ее температуре, полученные при помощи аэрономической модели (Shaikhislamov и др., 2020). Теоретическое изучение верхних атмосфер горячих экзопланет развивалось на основе гидродинамического описания. В одной из первых работ (Lammer и др., 2003) было показано, что жесткое излучение звезды, проникающее в обогащенную водородом термосферу, должно приводить к газодинамическому истечению. Соответственно, в первых газодинамических моделях π Men с (García Muñoz и др., 2020; Shaikhislamov и др., 2020) было установлено, что термосфера этой экзопланеты нагревается до температуры ~ 3000 K, а молекулярный водород не диссоциирует полностью в верхней атмосфере π Men с и уносится с течением далеко от планеты. Численное моделирование с использованием газодинамических моделей показывает, что экзопланета π Men с должна быть окружена обширной и относительно плотной частично ионизованной газовой оболочкой с присутствием молекулярного водорода.

В подавляющем большинстве проводимых исследований эволюции атмосфер горячих планет внимание уделялось лишь тепловым процессам потери атмосферы. Однако в наших предыдущих исследованиях нетепловых потерь атмосфер горячих юпитеров и нептонов (Шематович, 2010; Автаева, Шематович, 2021) было установлено, что нетепловые потери атмосферы за счет экзотермической фотохимии, особенно в условиях высокой звездной активности, могут быть сравнимы со скоростями тепловых потерь. Известно, что в протяженных водородных атмосферах горячих экзопланет протекают как тепловые, так и нетепловые процессы, приводящие к потере атмосферы (Massol и др., 2016; Owen, 2019). Например, надтепловые частицы образуются при фотолизе богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды (Shematovich и др., 2015). Такие частицы с избытком кинетической энергии являются важным источником тепловой энергии в верхней атмосфере богатой водородом экзопланеты. Изучение влияния надтепловых частиц на современные аэрономические модели планетных атмосфер — это сложная вычислительная задача, потому как требуется решение кинетического уравнения Больцмана для надтепловых частиц (Shematovich, Marov, 2018).

В статье оценивается влияние КУФ-излучения родительской звезды и сопутствующего потока фотоэлектронов на образование надтепловых атомов водорода в переходной области $H_2 \rightarrow H$ богатой водородом атмосферы π Men с. Для этого, используется модель из работ (Шематович, 2010; Автаева, Шематович, 2021), при помощи которой рассчитываются скорость производства и энергетический спектр атомов водорода, которые образуются с избытком кинетической энергии в фотохимических процессах, включая диссоциацию H_2 . Далее, используется стохастическая модель горячей планетарной короны (Шематович, 2010) для изучения кинетики и переноса надтепловых атомов водорода в протяженных верхних слоях атмосферы и расчета скорости потери массы в атмосфере.

ФРАКЦИЯ НАДТЕПЛОВЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА ЗА СЧЕТ ФОТОХИМИИ

Тепловой режим и скорость теплового убегания из атмосферы горячей экзопланеты существенно зависят от состава атмосферы. Однако, в отличие от атмосфер планет Солнечной системы, состав которых стабилен на геологических масштабах времени, атмосферный состав горячей экзопланеты может изменяться вследствие воздействия интенсивного поля излучения родительской звезды. Более того, тепловой режим и состав атмосферы тесно связаны через скорости нагрева и выхолаживания, как показывают аэрономические модели верхней атмосферы π Men с (García Muñoz и др., 2020; 2021; Shaikhislamov и др., 2020). Процессы диссоциации, такие как фотодиссоциация, диссоциация электронным ударом, диссоциативная ионизация и др., являются основными источниками тепловых и надтепловых фрагментов молекул в состояниях электронного возбуждения в верхних атмосферах планет (Shematovich, Marov, 2018).

Надтепловые атомы водорода, образующиеся в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода, теряют свою избыточную энергию в упругих столкновениях с основными нейтральными компонентами окружающего атмосферного газа. Следует отметить, что при надтепловых энергиях атомов водорода эффективность переноса энергии от горячих атомов к тепловым атомам и молекулам водорода в упругих столкновениях в существенной степени определяется фазовыми функциями — распределениями угла рассеяния. Как следует из экспериментальных и расчетных данных (см. ссылки в Автаева, Шематович, 2021), эти распределения характеризуются пиками в области малых углов рассеяния при относительно высоких значениях сечений упругого рассеяния. Соответственно, эффективность переноса энергии сильно зависит от энергии столкновения. Данные особенности упругого рассеяния надтепловых атомов водорода на тепловых компонентах H_2 , He и

Н в существенной степени определяют параметры фракции надтеплового водорода в верхней атмосфере π Мен с и учитывались в используемой численной модели.

Для родительской звезды π Мен использовался аппроксимированный спектр в спектральном диапазоне 0.5–91.2 нм. В приведенных ниже расчетах использовалась более детальная спектральная модель потока солнечного излучения в интервале длин волн 1–115 нм для условий умеренной солнечной активности из работы (Huebner и др., 1992). Из этой же работы выбраны относительные выходы возбужденных электронных состояний нейтральных и ионизованных продуктов фотолиза, сечения ионизации и полного поглощения для основных атмосферных компонент — H_2 , He и H. Детальный спектральный поток солнечного излучения был масштабирован для орбиты с большой полуосью 0.067 а. е. экзопланеты π Мен с и ее аппроксимационного КУФ-спектра в соответствии с соотношениями, приведенными в табл. 1 в работе (Garcia Munoz и др., 2020). А именно использовались следующие множители: (а) в диапазоне длин волн 0.5–12.4 нм солнечный поток умножался на фактор 3.3; (б) в диапазоне длин волн 12.4–91.2 нм — на фактор 2.

Скорости образования надтепловых атомов водорода в процессах экзотермической фотохимии — диссоциации и диссоциативной ионизации H_2 жестким УФ-излучением звезды, — вычислялись при помощи приведенных в работе (Автаева, Шематович, 2021) выражений для фотохимических источников, в которых использовались соответственно сечения поглощения и диссоциации для этих процессов с учетом измеренного в лаборатории распределения продуктов диссоциации по кинетической энергии (Ajello и др., 1991; Huebner и др., 1992).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились для переходной $H_2 \rightarrow H$ области протяженной верхней атмосферы π Мен с в интервале высот $(2.0\text{--}3.9)R_p$. Отметим, что максимум поглощения жесткого звездного КУФ-излучения наблюдается на высоте $1.8R_p$, что ниже нижней границы, однако на этих высотах плотность окружающего атмосферного газа столь высока, и, соответственно, длина свободного пробега атомов водорода значительно меньше высоты однородной атмосферы по плотности и, в результате, происходит локальная термализация надтепловых атомов водорода в упругих столкновениях с окружающим атмосферным газом. Распределение основных нейтральных компонент показано на верхней панели рис. 1 в соответствии с данными аэрономической модели (Shaikhislamov и др., 2020). Температура атмосферного газа в переходной области задавалась равной значению температуры из аэрономической модели, рассчитанной на нижней границе $2.0R_p$. Расчетные кон-

центрация, температура и массовая скорость фракции надтепловых атомов водорода показаны красными линиями на рис. 1. Видим, что концентрация надтепловых атомов вблизи нижней границы исследуемой переходной области очень низкая из-за высокой частоты упругих столкновений с окружающим атмосферным газом. На верхней границе выбранной области значения длины свободного пробега приближаются к значениям высоты однородной атмосферы по плотности и, соответственно, возможно убежание надтепловых атомов водорода с энергиями выше локального значения энергии убегания. Отметим, что верхняя граница находится значительно ниже положения точки Лагранжа L_1 , расположенной на расстоянии $\approx 13.3R_p$ для системы планета π Мен с — родительская звезда π Мен. Соответственно, гравитационное влияние звезды на траектории атомов водорода не учитывалось. Весь расчетный интервал высот разбит на ячейки, размер которых порядка локальной длины свободного пробега для надтепловых атомов водорода.

Результаты расчетов скорости образования надтепловых атомов водорода, образующихся в процессах экзотермической фотохимии за счет воздействия КУФ-излучения звезды и сопутствующего потока фотоэлектронов, показаны на рис. 2 и рис. 3. Пик образования надтепловых атомов водорода наблюдается на высотах $(1.8\text{--}2.0)R_p$ и основным источником является фотодиссоциация H_2 (см. панель (б) рис. 3). Из результатов расчетов видно, что распределение надтепловых атомов водорода, образующихся при диссоциации H_2 , носит существенно неравновесный характер. Наблюдаются два пика — медленные атомы H с избыточной кинетической энергией в диапазоне 0–1 эВ, и быстрые атомы водорода в диапазоне кинетических энергий 4–6 эВ.

Данные расчетные скорости и их энергетические спектры образования надтепловых атомов водорода за счет диссоциации H_2 являются входными параметрами в качестве функции источника для кинетического уравнения Больцмана для надтепловых атомов. Решением кинетического уравнения при помощи численной кинетической модели Монте-Карло (Шематович, 2010), в которой рассматриваются кинетика и транспорт надтепловых атомов водорода на молекулярном уровне, являются функции распределения надтепловых атомов водорода в переходной области верхней атмосферы. Расчеты выполнены для стационарных условий в дневной верхней атмосфере в направлении планета—звезда. Из расчетов аэрономической модели следует, что верхняя атмосфера суб-нептуна существенно нагревается, достигая температур ~ 3000 К. Следовательно, тепловой поток потери атмосферы в расчетах данной аэрономической модели в соответствии с формулой Джинса достигает высоких значений $\sim 10^{12}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$ (Shaikhislamov и др., 2020). Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания ато-

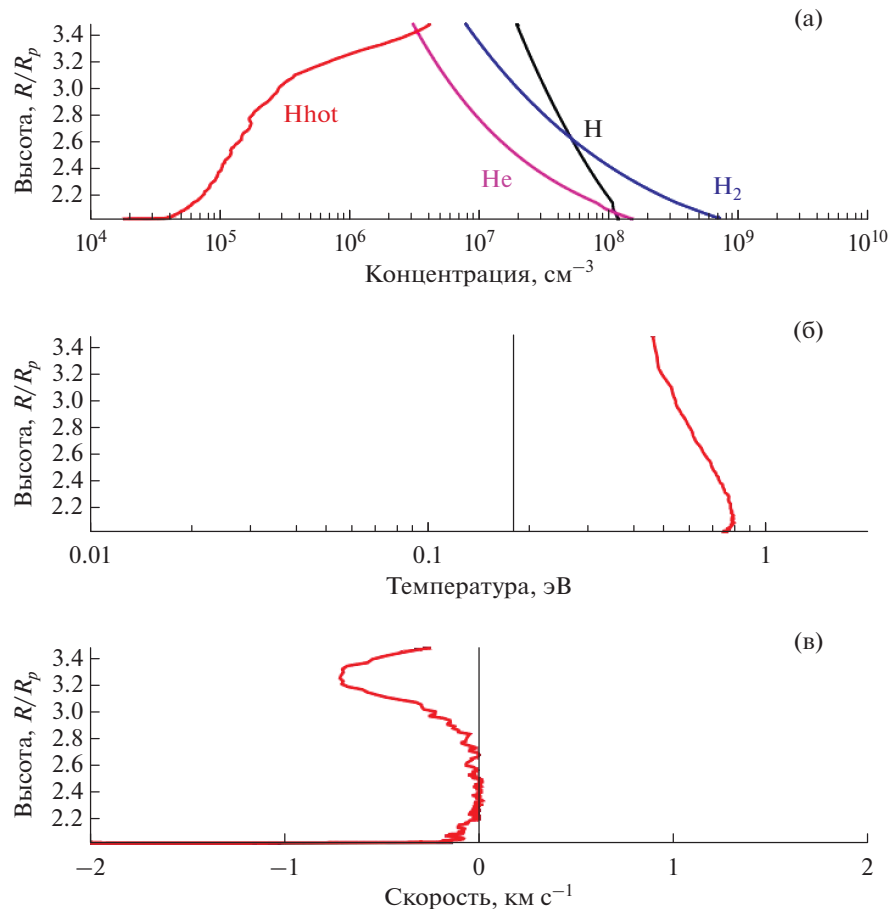


Рис. 1. Верхняя панель (а): концентрация Н — линия черного цвета, H_2 — синего цвета, He — малинового цвета. Средняя панель (б): температура. Нижняя панель (в): средняя скорость в переходной $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$ области верхней атмосферы экзопланеты π Men с согласно астрономической модели (Shaikhislamov и др., 2020). На верхней панели линией красного цвета показан расчетный профиль концентрации надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 0.4 эВ. Расчетные температура и средняя скорость фракции надтепловых атомов водорода показаны красными линиями на средней и нижней панели, соответственно.

мов водорода на приведенных высотах. Так как целью данной работы является получение оценки скорости убегания атомов водорода за счет реакций экзотермической фотохимии, то на рис. 4 расчетные потоки представлены лишь в области надтепловых энергий выше 0.4 эВ. Из расчетов следует, что потоки надтепловых атомов водорода существенно неравновесны по сравнению с восходящими потоками для локально равновесных распределений тепловых атомов водорода в атмосфере π Men с. На высотах около $2.33R_p$, где производство атомов водорода в процессе диссоциации H_2 высоко, уже формируется значительная фракция атомов водорода с энергиями выше энергии убегания. Так, на высоте $3.53R_p$, близкой к верхней границе переходной $\text{H}_2 \rightarrow \text{H}$ области, значения расчетного нетеплового потока становятся сравнимым со значением теплового потока, рассчитанного для локально равновесного распределения. Видно, что при кинетических энергиях больше ~ 5 эВ, заселенность надтепловыми атомами водорода за счет экзотермической

фотохимии превышает заселенность, рассчитанную по локально равновесному распределению. Другими словами, в расчетном восходящем потоке формируется избыток атомов водорода в области надтепловых энергий ≥ 5 эВ, т.е. в области быстрых атомов водорода, образующихся за счет механизма преддиссоциации высоковозбужденных электронных состояний молекулы H_2 .

Используя расчетные энергетические спектры восходящего потока атомов Н, представленные на рис. 4, можно оценить числовую плотность фракции надтепловых атомов водорода, образующихся за счет экзотермической фотохимии, и сравнить с высотным распределением тепловых компонент нейтральной атмосферы. Высотный профиль концентрации надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 0.4 эВ показан на верхней панели рис. 2 и рис. 3 линией красного цвета, где также приведены распределения по высоте теплового атомного и молекулярного водорода. Расчеты показывают, что стационарная фракция надтепловых атомов водорода с

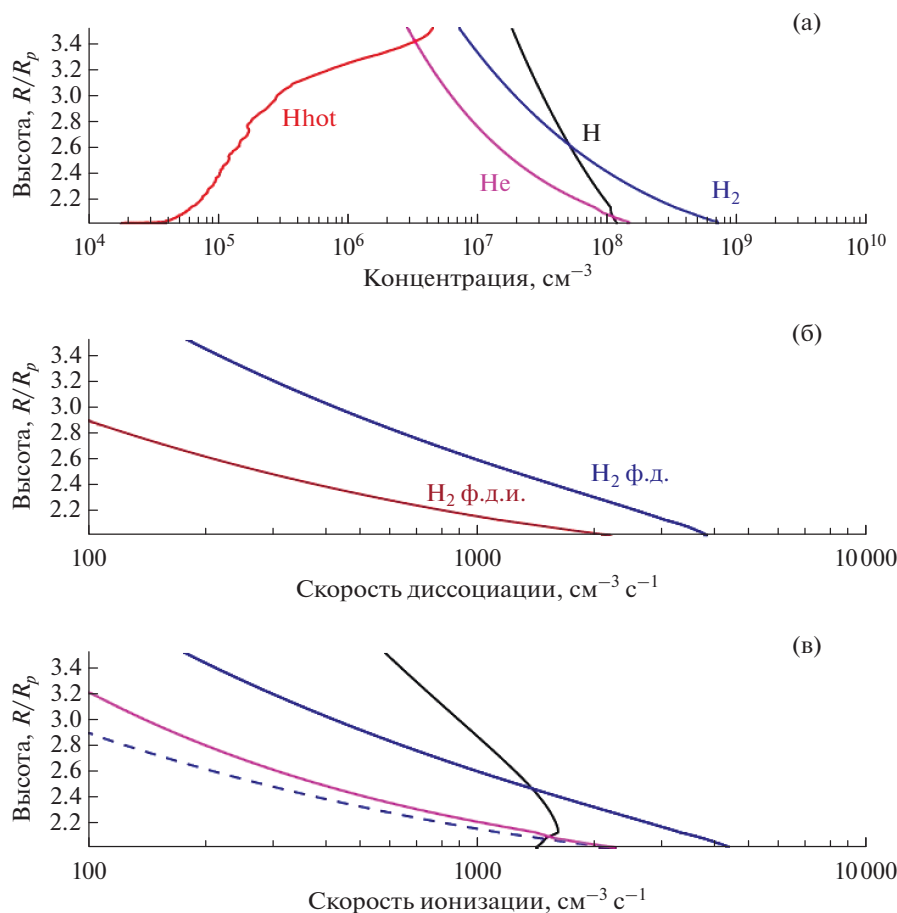


Рис. 2. Концентрации основных составляющих газа в переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы суб-нептуна π Men с согласно аэрономической модели (Shaikhislamov и др., 2020). На верхней панели (а): линией красного цвета показан расчетный профиль концентрации надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 0.4 эВ. На средней панели (б): скорости фотодиссоциации (линия синего цвета) и диссоциативной (линия красного цвета) ионизации молекулярного водорода жестким излучением родительской звезды. На нижней панели (в): скорости фотоионизации основных компонент (H , H_2 и He , см. рис. 1) атмосферы экзопланеты. Пунктирной линией показана скорость диссоциативной фотоионизации H_2 .

энергиями выше 0.4 эВ формируется лишь в самых верхних слоях переходной области, где упругие столкновения надтепловых атомов происходят преимущественно с атомами атмосферного водорода, причем температура атмосферы здесь достаточно высока (см. среднюю панель рис. 1). Расчеты показывают, что температура и массовая скорость фракции надтепловых атомов водорода (линии красного цвета на средней и нижней панелях рис. 1) в несколько раз выше значений, характеризующих тепловую фракцию.

Расчеты энергетических спектров восходящего потока надтепловых атомов водорода, представленные на рис. 4, показывают, что процессы экзотермической фотохимии (преимущественно диссоциации молекулярного водорода) сопровождаются образованием и переносом в самые верхние слои переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы экзопланеты π Men с движущихся вверх надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше локальной энергии убегания.

Из расчетного энергетического спектра потока атомов водорода (линия черного цвета на нижней панели рис. 4), убегающих из атмосферы через верхнюю границу переходной области на высоте $\sim 3.6R_p$ за счет процесса диссоциации H_2 , можно получить следующую оценку $2.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ величины численного потока убегания в направлении планета—звезда в условиях умеренного уровня звездной активности в рассматриваемом диапазоне УФ-излучения. Отметим, что это расчетное значение численного потока убегания надтепловых атомов водорода сравнимо со значением $1.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ теплового потока, рассчитанного по формуле Джинса для численного потока тепловых атомов водорода (линия синего цвета на нижней панели рис. 4). Если усреднить данный расчетный поток по освещенной полусфере верхней атмосферы, то можно получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет надтепловых атомов водорода, образующихся в процессах диссоциации H_2 , равной величине $6.7 \times 10^8 \text{ г с}^{-1}$, что является относительно

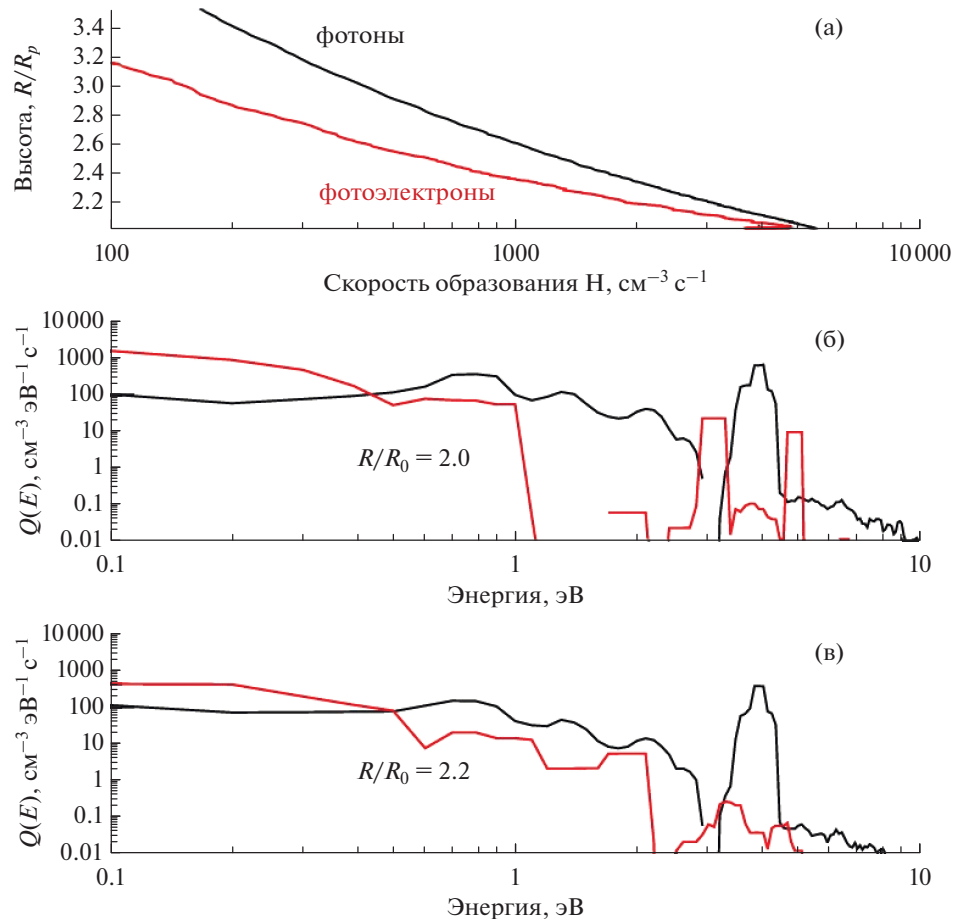


Рис. 3. Верхняя панель (а): скорости образования надтепловых атомов водорода за счет диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода КУФ-излучением звезды (линия черного цвета) и сопутствующего потока фотоэлектронов (линия красного цвета). Нижние панели (б, в): энергетические спектры атомов водорода, образующихся за счет диссоциации и диссоциативной ионизации КУФ-фотонами (линии черного цвета) и сопутствующим потоком фотоэлектронов (линии красного цвета) на высотах $R/R_p = 2.0$ (б) и $R/R_p = 2.2$ (в) соответственно.

низким значением потока убегания по сравнению с предсказаниями гидродинамического оттока атмосферы в аэрономических моделях (García Muñoz и др., 2020; 2021; Shaikhislamov и др., 2020).

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В приведенных выше расчетах оценка скорости нетепловой потери атмосферы экзопланетой π Мен с была получена впервые и может рассматриваться как среднее значение, так как расчеты выполнены в условиях умеренной звездной активности в УФ-излучении, а для вероятностей преддиссоциации возбужденных электронных уровней использовались минимальные значения 0.1. Естественно, в условиях высокого уровня звездного УФ-излучения, а тем более в условиях звездной вспышки, вклад процессов экзотермической фотохимии, включая процессы диссоциации H_2 жестким УФ-излучением звезды и сопутствующим потоком фотоэлектронов, в образование потока убегавших из атмосферы атомов водорода станет еще более существенным (Bisikalo

и др., 2019). По мере накопления данных о вспышечной активности звезды π Мен планируется провести расчеты с учетом возможной фазы активности (вплоть до супервспышек) и оценить вклад вариаций активности родительской звезды в темп потери атмосферы. Такие расчеты будут проведены после расширения используемой аэрономической модели за счет включения в исходный состав атмосферы тяжелых молекул — H_2O , CO_2 и N_2 . Аналогично проведенным ранее исследованиям для горячих юпитеров и нептонов (Шематович, 2010; Автаева, Шематович, 2021) можно сделать следующее заключение: в аэрономических моделях горячих суб-нептонов необходимо учитывать нетепловые потери атмосферы за счет процессов экзотермической фотохимии.

Полученные относительно низкие скорости потери атомарного водорода из атмосферы могут являться свидетельством того, что в атмосфере π Мен с не преобладает водород, что может быть подтверждено в поисках планетного атмосферного поглощения на длинах волн линий более тяжелых элементов, таких как He, C и O. Действительно,

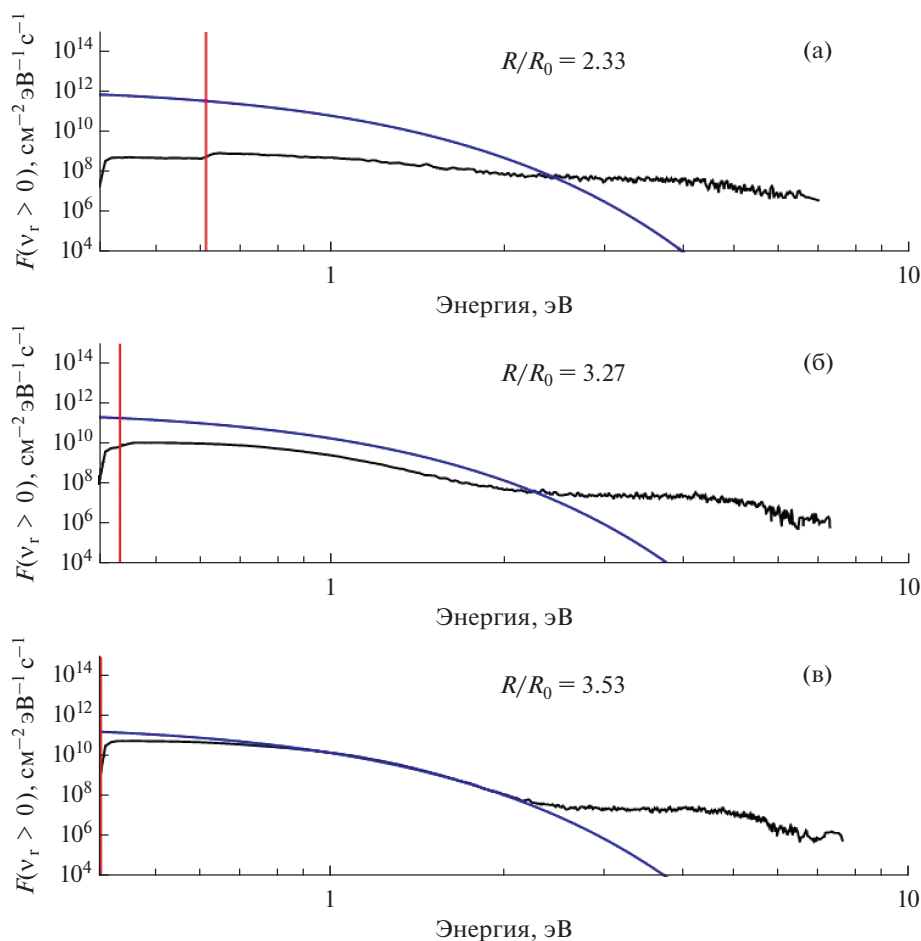


Рис. 4. Расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах $2.33R_p$ (верхняя панель (а)), $3.27R_p$ (средняя панель (б)) и $3.53 \times R_p$ (нижняя панель (в)). Линиями синего цвета показаны потоки тепловых атомов H, рассчитанные для локально равновесного распределения атомарного водорода в соответствии с профилем температуры из модели (Shaikhislamov и др., 2020). Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах.

недавно в работе (García Muñoz и др., 2021) сообщается об открытии потока убегающих из атмосферы ионов C II во время транзита суб-нептуна π Men с по диску родительской звезды. Анализ наблюдений позволил авторам работы (García Muñoz и др., 2021) заключить, что экзопланета π Men с обладает плотной атмосферой с обильными тяжелыми летучими веществами ($\approx 50\%$ по массе атмосферы). Более того, в недавней работе (Vidotto, Cleary, 2020) было отмечено, что темп потери атмосферы для ряда горячих суб-нептунов, включая π Men с, должен быть ограничен воздействием на атмосферу ветров их родительских звезд, что потенциально предотвращает для сильно облученных планет убежание их атмосферы. Таким образом, отсутствие в наблюдениях свидетельств потери атомарного водорода, о котором недавно сообщалось для π Men с (García Muñoz и др., 2020), может быть вызвано также воздействием звездного ветра.

Представленная численная модель Монте-Карло кинетики переноса надтепловых атомов водорода в протяженной верхней атмосфере π Men с в последующих работах будет расширена как за счет включения в рассмотрение процессов воздействия плазмы звездного ветра на корону планеты, так и учета присутствия паров воды H_2O и других более тяжелых газов в атмосфере исследуемого суб-нептуна.

Исследование выполнено в рамках Проекта № 075-15-2020-780 “Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет” Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Автаева А.А., Шематович В.И. Нетепловая потеря атмосферы экзопланеты GJ 436b за счет процессов диссоциации H_2 // Астрон. вестн. 2021. V. 55. № 2.

- C. 172–181. (Avtaeva A.A., Shematovich V.I. Nonthermal atmospheric loss of the exoplanet GJ 436b due to H₂ dissociation processes // Sol. Syst. Res. 2021. V. 55. № 2. P. 150–158.)
- Шематович В.И. Надтепловой водород в протяженной верхней атмосфере экзопланеты HD209458b за счет диссоциации молекулярного водорода // Астрон. вестн. 2010. Т. 44. С. 108–117. (Shematovich V.I. Suprathermal hydrogen produced by the dissociation of molecular hydrogen in the extended atmosphere of exoplanet HD 209458b // Sol. Syst. Res. 2010. V. 44. P. 96–103.)
- Ajello J.M., Shemansky D.E., James G.K. Cross sections for production of H (2p, 2s, 1s) by electron collisional dissociation of H₂ // Astrophys. J. 1991. V. 371. P. 422.
- Bisikalo D.V., Kaygorodov P.V., Shematovich V.I. Exoplanets: Atmospheres of Hot Jupiters // Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science / Eds Read Peter et al. Oxford Univ. Press, 2019. P. 103.
- Fressin F., Torres G., Charbonneau D., Bryson S.T., Christiansen J., Dressing C.D., Jenkins J.M., Walkowicz L.M., Batalha N.M. The false positive rate of Kepler and the occurrence of planets // Astrophys. J. 2013. V. 766. № 2. Article id. 81 (20 p.)
- Fulton B.J., Petigura E.A., Howard A.W., Isaacson H., Marcy G.W., Cargile P.A., Hebb L., Weiss L.M., Johnson J. Asher, Morton T.D., Sinukoff E., Crossfield I.J.M., Hirsch L.A. The California-Kepler Survey. III. A gap in the radius distribution of small planets // Astron. J. 2017. V. 154. Article id. 109 (19 p.).
- Gandolfi D., Barragán O., Livingston J.H., Fridlund M., Justesen A.B., Redfield S., Fossati L., Mathur S., Grziwa S., Cabrera J., and 22 more. TESS's first planet. A super-Earth transiting the naked-eye star π Mensae // Astron. and Astrophys. 2018. V. 619. Article id. L10 (10 p.)
- García Muñoz A., Fossati L., Youngblood A., Nettelmann N., Gandolfi D., Cabrera J., Rauer H. A heavy molecular weight atmosphere for the super-Earth π Men c // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 907. Article id. 36 (14 p.)
- García Muñoz A., Youngblood A., Fossati L., Gandolfi D., Cabrera J., Rauer H. Is π Men c's atmosphere hydrogen-dominated? Insights from a non-detection of H I Ly α absorption // Astrophys. J. Lett. 2020. V. 888. id. L21 (12 p.)
- Ginzburg S., Schlichting H.E., Sari R. Super-Earth atmospheres: Self-consistent gas accretion and retention // Astrophys. J. 2016. V. 825. Article id. 29 (12 p.)
- Huebner W.F., Keady J.J., Lyon S.P. Solar photo rates for planetary atmospheres and atmospheric pollutants // Astrophysics and Planet Sci. Suppl. 1992. V. 195. P. 1–294.
- Ikoma M., Hori Y. In situ accretion of hydrogen-rich atmospheres on short-period super-Earths: Implications for the Kepler-11 planets // Astrophys. J. 2012. V. 753. Article id. 66 (6 p.)
- Izidoro A., Ogihara M., Raymond S.N., Morbidelli A., Pierens A., Bitsch B., Cossou Ch., Hersant F. Breaking the chains: hot super-Earth systems from migration and disruption of compact resonant chains // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2017. V. 470. № 2. P. 1750–1770.
- King G.W., Wheatley P.J., Bourrier V., Ehrenreich D. The XUV irradiation and likely atmospheric escape of the super-Earth π Men c // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. Lett. 2019. V. 484. P. L49–L53.
- Lammer H., Selsis F., Ribas I., Guinan E.F., Bauer S.J., Weiss W.W. Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating // Astrophys. J. Lett. 2003. V. 598. P. L121–L124.
- Lammer H., Stökl A., Erkaev N.V., Dorfi E.A., Odert P., Güdel M., Kulikov Yu.N., Kislyakova K.G., Leitzinger M. Origin and loss of nebula-captured hydrogen envelopes from “sub”- to “super-Earths” in the habitable zone of Sun-like stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2014. V. 439. P. 3225–3238.
- Lopez E.D., Fortney J.J., Miller N. How thermal evolution and mass-loss sculpt populations of super-Earths and sub-Neptunes: Application to the Kepler-11 system and beyond // Astrophys. J. 2012. V. 761. Article id. 59 (13 p.)
- Luger R., Barnes R., Lopez E., Fortney J., Jackson B., Meadows V. Habitable evaporated cores: transforming mini-Neptunes into super-Earths in the habitable zones of M dwarfs // Astrobiology. 2015. V. 15. P. 57–88.
- Massol H., Hamano K., Tian F., Ikoma M., Abe Y., Chassefiere E., Davaille A., Genda H., Guedel M., Hori Y., Leblanc F., Marcq E., Sarda P., Shematovich V.I., Stoekl A., Lammer H. Formation and evolution of protoatmospheres // Space Sci. Rev. 2016. V. 205. P. 153–211.
- Owen J.E. Atmospheric escape and the evolution of close-in exoplanets // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 2019. V. 47. P. 67–90.
- Owen J.E., Jackson A.P. Planetary evaporation by UV & X-ray radiation: basic hydrodynamics // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2012. V. 425. P. 2931–2947.
- Owen J.E., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Fossati L., Khodachenko M.L. Hydrogen dominated atmospheres on terrestrial mass planets: evidence, origin and evolution // Space Sci. Rev. 2020. V. 216. Article id. 129.
- Rogers L.A. Most 1.6 Earth-radius planets are not rocky // Astrophys. J. 2015. V. 801. Article id. 41 (13 p.)
- Rowe J.F., Coughlin J.L., Antoci V., Barclay T., Batalha N.M., Borucki W.J., Burke C.J., Bryson S.T., Caldwell D.A., Campbell J.R., Catanzarite J.H., Christiansen J.L., Cochran W., Gilliland R.L., Girouard F.R., and 31 more. Planetary candidates observed by Kepler. V. Planet sample from Q1-Q12 (36 months) // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2015. V. 217. Article id. 16 (22 p.)
- Schlichting H.E. Formation of close in super-Earths and mini-Neptunes: Required disk masses and their implications // Astrophys. J. Lett. 2014. V. 795. № 1. id. L15 (5 p.)
- Shaikhislamov I.F., Fossati L., Khodachenko M.L., Lammer H., García Muñoz A., Youngblood A., Dwivedi N.K., Rumenskikh M.S. Three-dimensional hydrodynamic simulations of the upper atmosphere of π Men c: comparison with Ly-alpha transit observations // Astron. and Astrophys. 2020. V. 639. id. A109 (7 p.)
- Shematovich V.I., Bisikalo D.V., Ionov D.E. Suprathermal Particles in XUV-Heated and Extended Exoplanetary Upper Atmospheres // Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments. Astrophys. and Space Sci. Library. 2015. V. 411. P. 105.
- Shematovich V.I., Marov M.Ya. Escape of planetary atmospheres: physical processes and numerical models // Phys. Uspekhi. 2018. V. 61. P. 217–246.
- Van Eylen V., Agentoft C., Lundkvist M.S., Kjeldsen H., Owen J.E., Fulton B.J., Petigura E., Snellen I. An asteroseismic view of the radius valley: stripped cores, not born rocky // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2018. V. 479. P. 4786–4795.
- Vidotto A.A., Cleary A. Stellar wind effects on the atmospheres of close-in giants: a possible reduction in escape instead of increased erosion // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 2020. V. 494. № 2. P. 2417–2428.
- Wolfgang A., Lopez E. How rocky are they? The composition distribution of Kepler's sub-Neptune planet candidates within 0.15 AU // Astrophys. J. 2015. V. 806. Article id. 183 (22 p.)