

НЕТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ЭКЗОПЛАНЕТЫ GJ 3470b

© 2022 г. А. А. Автаева¹, В. И. Шематович^{1,*}

¹ Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 09.08.2022 г.

После доработки 14.09.2022 г.

Принята к публикации 30.09.2022 г.

В работе получены численные оценки скорости нетепловой потери атмосферы горячей экзопланеты за счет экзотермических фотохимических процессов. В качестве примера выполнены расчеты для переходной области $H_2 \rightarrow H$ верхней атмосферы горячего нептона GJ 3470b в интервале высот $(1.6–2.05) R_p$. Из полученного энергетического спектра потока надтепловых атомов водорода, образующихся за счет процессов диссоциации молекул H_2 и убегающих из атмосферы через верхнюю границу переходной области, была выведена оценка числового потока убегающих в направлении планета-звезда в условиях умеренного уровня звездной активности, равная $3.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это расчетное значение числового потока убегающих надтепловых атомов водорода близко к величине числового потока тепловых атомов водорода, рассчитанной по формуле Джинса для данных астрономической модели и равной $3.3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Усредненный по освещенной полусфере верхней атмосферы расчетный поток потери массы атмосферы равен $9.5 \times 10^9 \text{ г/с}$ на верхней границе переходной области. Можно заключить, что нетепловые процессы при моделировании атмосфер экзопланет необходимо учитывать как один из важных факторов потери массы атмосферы, в особенности, для горячих экзопланет из семейств суб-нептунов и супер-земель.

Ключевые слова: экзопланета, атмосферная фотохимия, нетепловые потери атмосферы, надтепловые атомы

DOI: 10.31857/S0004629922110056

1. ВВЕДЕНИЕ

К настоящему моменту обнаружено множество экзопланет со значительной водородно-гелиевой атмосферой, причем орбиты многих из них находятся очень близко к своим родительским звездам [1, 2]. Атмосферы таких планет, часто называемых «горячими экзопланетами», подвергаются экстремальным уровням облучения звездным излучением в диапазонах мягкого рентгена (soft X-rays, 1–10 нм) и жесткого ультрафиолета (УФ) (extreme ultraviolet (EUV) – КУФ, 10–100 нм), так называемого жесткого (или XUV) излучения звезды в диапазоне длин волн 1–100 нм, что приводит к образованию протяженных планетных оболочек из-за теплового и нетеплового убегающего из атмосферы [3]. С помощью транзитной спектроскопии было обнаружено, что в нескольких близких системах происходит убегающее вещество из атмосфер как горячих юпитеров, так и суб-нептунов и других планет с меньшей массой [2].

Основные механизмы потери атмосферы – фотоиспарение из-за высокого потока энергии жесткого излучения родительской звезды [4, 5] и потеря атмосферы за счет энергии ядра, выделя-

ющейся во время его остывания: светимость горячего ядра подстилающей планеты подпитывает нагрев оболочки планеты, что приводит к последующей потере атмосферы [6]. Эти механизмы обладают схожей физической основой: при нагревании верхних слоев атмосферы экзопланеты происходит гидродинамический отток вещества, который приводит к потере атмосферы планеты (см., например, [2, 3]). В последнее время интенсивно ведутся работы по моделированию первичных атмосфер горячих экзопланет и расчеты тепловых потерь, в том числе за счет гидродинамического оттока атмосферного газа (например, [7]).

Недавние открытия большого разнообразия планет (типов экзопланет, открытых при помощи космического телескопа Kepler, не представленных в Солнечной системе), в частности, горячих суб-нептунов, которых нет в Солнечной системе, стимулировали большую работу по моделированию атмосфер экзопланет с целью лучше понять процессы образования атмосфер суб-нептунов и их последующую эволюцию [8–10]. Большие (по сравнению с планетами земной группы Солнечной системы) радиусы значительной части экзо-

планет такого типа могут быть свидетельством существования протяженных водородно-гелиевых (H/He)-оболочек с массой в несколько процентов от общей массы планеты [11]. Это может означать, что суб-нептун сформировался из вещества первичного газового протопланетного диска. Массы атмосфер, как правило, меньше массы вещества, захваченного планетой из первичного протопланетного газового диска, так как потеря атмосферы — обычное явление после рассеивания газового диска [4–6, 11]. Для подробного изучения эволюционного пути горячих суб-нептунов необходимо более глубоко изучить тепловые и нетепловые процессы потери их атмосферы.

В большей части исследований эволюции атмосфер горячих экзопланет рассматриваются лишь тепловые процессы потери атмосферы [2, 3, 7]. В то же время в наших ранних исследованиях нетепловых потерь атмосфер планет [12, 13], проводимых для горячих юпитеров и непунов, было показано, что скорости нетепловых потерь атмосфер экзопланет за счет экзотермической фотохимии под действием жесткого излучения родительской звезды, могут быть сопоставимы со скоростями потери атмосферы за счет тепловых процессов, особенно в случаях высокой звездной активности.

Как известно, потере атмосферы способствуют как тепловые, так и нетепловые процессы, происходящие в атмосферах экзопланет [2, 14]. Частицы с избытком кинетической энергии являются важным источником тепловой энергии в богатой водородом верхней атмосфере экзопланеты. Например, такие надтепловые частицы образуются при фотолизе богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды [15]. Изучение вклада надтепловых частиц в современные аэрономические модели планетных атмосфер — сложная вычислительная задача, в которой требуется решение кинетического уравнения Больцмана для надтепловых частиц [16].

В 2012 г. был открыт горячий нептун GJ 3470b [17], обращающийся вокруг красного M карлика GJ 3470 на расстоянии 0.0348 а. е. от него. Планета GJ 3470b имеет радиус $R_p = 3.88 \pm 0.32 R_E$ и массу $M_p = 12.58 \pm 1.3 M_E$ [18], т.е. находится на границе суб-нептунов (R_E и M_E радиус и масса Земли). Близость к родительской звезде этого горячего суб-нептуна дает возможность исследовать, как маломассивные экзопланеты на близких орбитах эволюционируют под воздействием излучения родительских звезд. В одном из первых исследований [19] было выполнено аэрономическое и гидродинамическое моделирование убегающих атмосфер 18 горячих газовых планет в окрестностях Солнца с целью поиска идеальных объектов для наблюдений. Было обнаружено, что

горячий суб-нептун GJ 3470b должен характеризоваться одним из самых больших темпов потери атмосферы из-за малой массы, близкой орбиты и относительно высокой активности родительской звезды GJ 3470 — $M_{st} = 0.54 M_{Sun}$, $R_{st} = 0.55 R_{Sun}$ [18].

Первые наблюдения [20] прохождения по диску родительской звезды экзопланеты GJ 3470b в линии Lyman- α с помощью космического телескопа Хаббла (HST) обнаружили свидетельства поглощения со схожими свойствами, с глубиной поглощения в $35 \pm 7\%$ в синем крыле [–94; –41] км/с линии и в $23 \pm 5\%$ в красном крыле [23; 76] км/с, а также относительно короткую продолжительность фаз раннего входа и длительного выхода. Это позволило сделать вывод о наличии протяженной верхней атмосферы из нейтрального водорода вокруг GJ 3470b. В целом подобно горячему нептуну GJ 436b, экзопланета GJ 3470b оказывается следующей горячей экзопланетой с большой водородной оболочкой, простирающейся далеко за пределы полости Роша. Существующие модели верхней атмосферы планеты GJ 3470b предсказывают значительный отток атмосферного вещества [19–22]. В работе [20] представлена 3D модель верхних слоев атмосферы GJ 3470b, предполагая термосферу с солнечным составом H и He и температурой 7000 K, и получена оценка величины темпа потери массы нейтрального водорода 1.5×10^{10} г с^{–1}. В работе [22] приводится еще более высокое значение полного темпа потери массы 1.9×10^{11} г с^{–1}, когда учитывалась потеря всех нейтральных, возбужденных и ионизованных компонентов водорода и гелия. Во всех созданных аэрономических моделях для данной планеты не учитывались процессы экзотермической химии, сопровождаемые образованием надтепловой фракции водорода.

В предлагаемой статье оценивается влияние жесткого ультрафиолетового (УФ) звездного излучения на образование надтепловой фракции атомарного водорода в переходной $H_2 \rightarrow H$ области в верхней атмосфере горячего суб-нептуна GJ 3470b. Также изучается формирование убегающего потока атомов H, создаваемого в ходе нетепловых процессов, и рассчитываются скорость образования и энергетический спектр атомов водорода с избыточной кинетической энергией из-за экзотермической фотохимии. Для этого используется модель из работ [12, 13], при помощи которой рассчитываются функции источника — скорость производства и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии в фотохимических процессах, включая диссоциацию H_2 . Далее, используя численную стохастическую модель горячей планетарной короны [12], мы исследовали кинетику и перенос надтепловых атомов водорода в верх-

ней атмосфере и рассчитали нетепловой поток атомов водорода, убегающих из атмосферы (см. рис. 3 и 4).

2. О РАСЧЕТЕ ФРАКЦИИ НАДТЕПЛОВЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА

В процессах диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода образуются надтепловые атомы водорода, которые в столкновениях с нейтральными компонентами окружающего газа теряют свою избыточную энергию. Эффективность переноса энергии от горячих атомов к тепловым частицам, в случае надтепловых энергий, определяется по большей части фазовыми функциями – распределениями углов рассеяния. Эти распределения характеризуются пиками в диапазоне малых углов рассеяния (см. ссылки в [13]), следовательно, эффективность переноса энергии в этом случае имеет сильную зависимость от энергии столкновения. Данные особенности упругого рассеяния надтепловых атомов водорода на тепловых компонентах H_2 , He и H в существенной степени определяют параметры фракции надтеплого водорода в верхней атмосфере GJ 3470b и учитывались в используемой численной модели.

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 [13] 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 [23, 24].

Для того, чтобы оценить влияние XUV-излучения родительской звезды и сопутствующего потока фотоэлектронов на образование надтепловых атомов водорода в переходной области $H_2 \rightarrow H$ верхней атмосферы GJ 3470b используются данные о составе нейтральной атмосферы и ее температуре, полученные при помощи аэрономической модели [21]. В работе [21] представлена 3D модель атмосферы планеты GJ 3470b, в которой учитывается гидродинамическое взаимодействие нейтральной атмосферы экзопланеты и звездного ветра родительской звезды. Для представленных в нашей работе расчетов использованы концентрации основных компонентов нейтральной атмосферы, таких как H, H_2 и He (см. панель (а), рис. 1), а также профиль температуры (панель (б), рис. 1) для нейтральной атмосферы экзопланеты, полученных при помощи аэрономической модели [21].

Для родительской звезды GJ 3470 использовался спектр жесткого излучения из работы [20]. 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 [24], который был перенормирован на спектр GJ 3470 в соответствии с данными из работы [20]. Из обзора [24] также были выбраны относительные выходы возбужденных электронных состояний нейтральных и ионизованных продуктов фотолиза, сечения ионизации и полного поглощения для основных атмосферных компонентов – H_2 , He и H. Далее детальный спектр излучения был масштабирован для орбиты с большой полуосью 0.0348 а. е. для экзопланеты GJ 3470b.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

В данной работе приведены результаты расчетов, которые проводились в интервале высот (1.6–2.05) R_p переходной области $H_2 \rightarrow H$ (переход происходит на высоте $\sim 1.5 R_p$) верхней атмосферы экзопланеты GJ 3470b. При этом максимум поглощения жесткого звездного XUV-излучения наблюдается на высоте 1.5 R_p , что ниже нижней границы переходной области, но на этих высотах из-за высокой плотности окружающего газа и, соответственно, малой длины свободного пробега (меньше высоты однородной атмосферы по плотности) происходит локальная термализация надтепловых атомов водорода в упругих столкновениях с окружающим атмосферным газом. Другими словами, надтепловые атомы водорода из области глубже нижней границы практически не вносят вклад в образование убегающего из атмосферы потока горячих атомов H.

Для расчетов использовались концентрации и температура основных компонентов нейтральной атмосферы, взятые из аэрономической модели [21], температура представлена на панели (б) рис. 1 линией черного цвета, а концентрации – на панели (а) рис. 1: H – линия черного цвета, He – малиновая линия, H_2 – синяя линия. Расчетные концентрации, температура и средняя скорость надтепловой фракции атомарного водорода представлены линиями красного цвета на рис. 1 на верхней, средней и нижней панелях соответственно. Как можно увидеть на верхней панели рис. 1, концентрация надтепловой фракции атомарного водорода падает с высотой в расчетной области, что объясняется как резким падением концентрации молекулярного водорода, так и большой массовой скоростью надтепловых H (нижняя панель рис. 1), которая наоборот растет с высотой, способствуя убеганию частиц из атмосферы. Ближе к верхней границе переходной $H_2 \rightarrow H$ области значения длины свободного про-

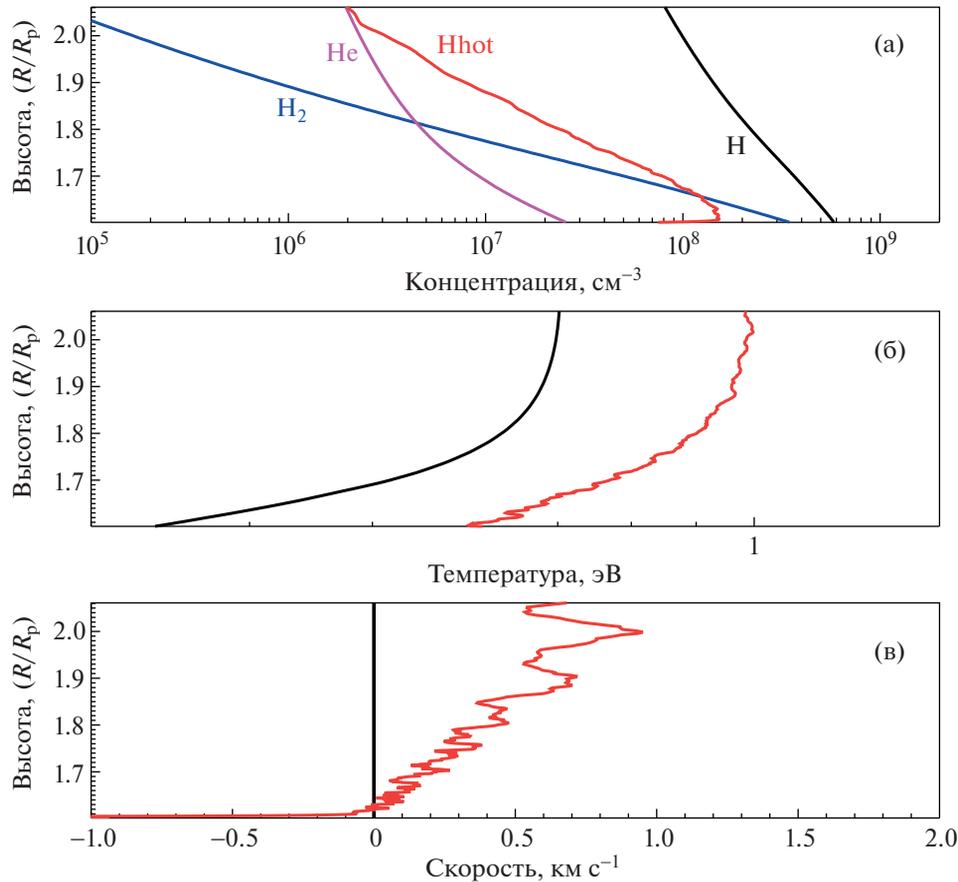


Рис. 1. На панели (а) показаны концентрации основных нейтральных компонентов: Н – линия черного цвета, Н₂ – синего цвета, He – малинового цвета. Панель (б): температура; панель (в): средняя скорость в переходной Н₂ → Н области верхней атмосферы экзопланеты GJ 3470b. Высотные профили атмосферных концентраций и температуры приведены по данным расчетов аэрономической модели [21]. 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.

бега приближаются к значениям высоты однородной атмосферы по плотности и, соответственно, становится возможным убежание надтепловых атомов водорода с энергиями выше локального значения энергии убегания. Заметим, что гравитационное влияние родительской звезды на траекторию частиц не учитывается, потому как точка Лагранжа L1 расположена на расстоянии $\sim 6 R_p$, что значительно выше верхней границы расчетной области.

Результаты расчетов частот образования надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и ионизации представлены на верхней панели рис. 2 соответственно. Пики образования атомов водорода приходятся, в основном, на высоты ниже расчетной области по высотам, но из-за большой концентрации и, следовательно, малой длины свободного пробега здесь надтепловые атомы локально термализуются через множественные столкновения и не могут покинуть ат-

мосферу. Полученные расчетные скорости и энергетические спектры образования надтепловых атомов водорода за счет процессов диссоциации Н₂ являются входными параметрами в качестве функции источника для кинетического уравнения Больцмана для надтепловых атомов.

Энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода в переходной области верхней атмосферы, представленные на рис. 3 линиями черного цвета, рассчитываются на основе функций распределения надтепловых атомов Н по скоростям. Последние являются решением кинетического уравнения Больцмана при помощи численной кинетической модели Монте-Карло [12], в которой рассматриваются кинетика и перенос надтепловых атомов водорода на молекулярном уровне. Расчеты проводились в направлении планета-звезда для стационарных условий в дневной верхней атмосфере. На рис. 3 представлены расчеты для разных высот: $1.66 R_p$

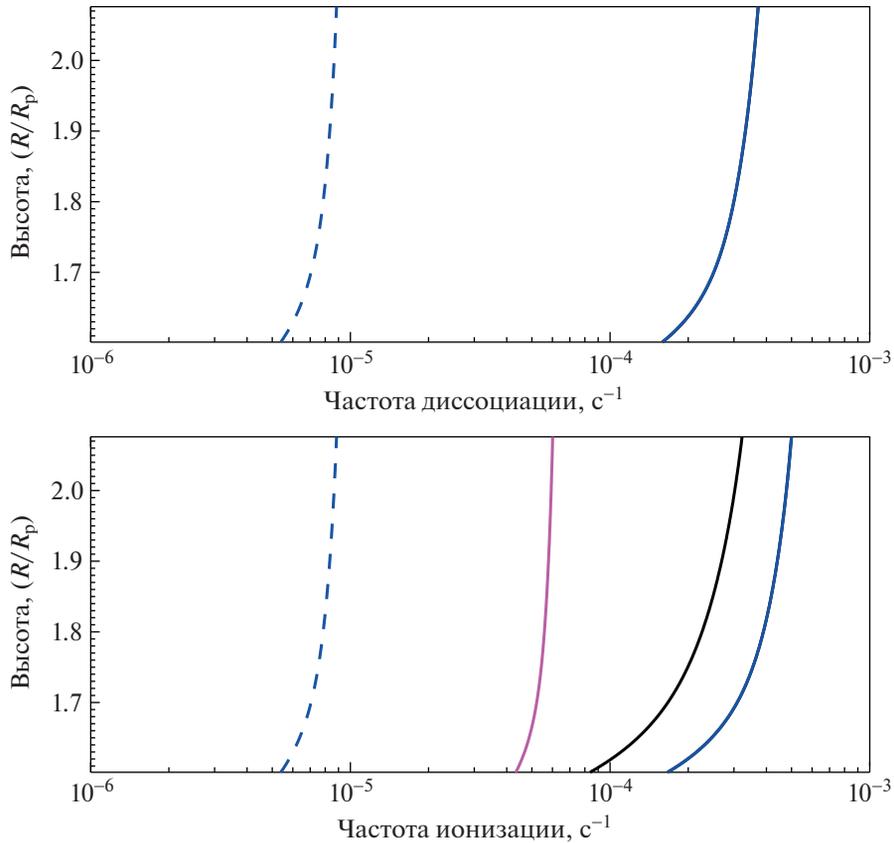


Рис. 2. На панели (а) представлены частоты фотодиссоциации (линия синего цвета) и диссоциативной фотоионизации (пунктирная линия синего цвета) молекулярного водорода жестким излучением родительской звезды. На панели (б): частоты фотоионизации основных компонентов (H — черная линия, H₂ — синяя линия и He — малиновая линия) атмосферы экзопланеты. Пунктирной линией повторно показана частота диссоциативной фотоионизации H₂.

(а), $1.73R_p$ (б) и $1.86R_p$ (в). Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах. Из аэрономической модели [21] следует, что верхняя атмосфера экзопланеты GJ 3470b существенно нагревается, достигая температур ~ 8000 К. Соответственно скорость потери атмосферы за счет теплового испарения в соответствии с формулой Джинса достигает высоких значений, $\sim 3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, причем спектры потока движущихся вверх тепловых атомов водорода были рассчитаны с использованием локально равновесной функции распределения Максвелла и показаны синей линией на панелях рис. 3. Так как целью исследования является получение оценки скорости убегания атомов водорода за счет реакций экзотермической фотохимии, то на рис. 3 представлены расчетные потоки лишь в области надтепловых энергий выше 1 эВ, что близко к кинетической энергии убегания.

Используя представленные на рис. 3 расчетные энергетические спектры восходящего потока атомов H, можно оценить концентрацию фракции надтепловых атомов водорода, образующихся за счет процессов экзотермической фотохи-

мии, и сравнить с высотным распределением тепловых компонентов нейтральной атмосферы. Полученный высотный профиль концентрации надтепловых атомов водорода с кинетическими энергиями выше 0.4 эВ представлен на верхней панели рис. 1 линией красного цвета, где также приведены распределения по высоте атмосферного атомного и молекулярного водорода. Из расчетов следует, что температура и средняя скорость фракции надтепловых атомов водорода (линии красного цвета на средней и нижней панелях рис. 1) выше значений, характеризующих тепловую фракцию (черная линия на панелях рис. 1).

Суммируя расчетные энергетические спектры потока атомов водорода, убегающих из атмосферы через верхнюю границу переходной области за счет процесса диссоциации H₂, получим оценку числового потока убегания в направлении планета-звезда в условиях умеренного уровня звездной активности в рассматриваемом диапазоне УФ излучения, равной величине $3.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это расчетное значение числового потока убегания надтепловых атомов водорода близко к величине,

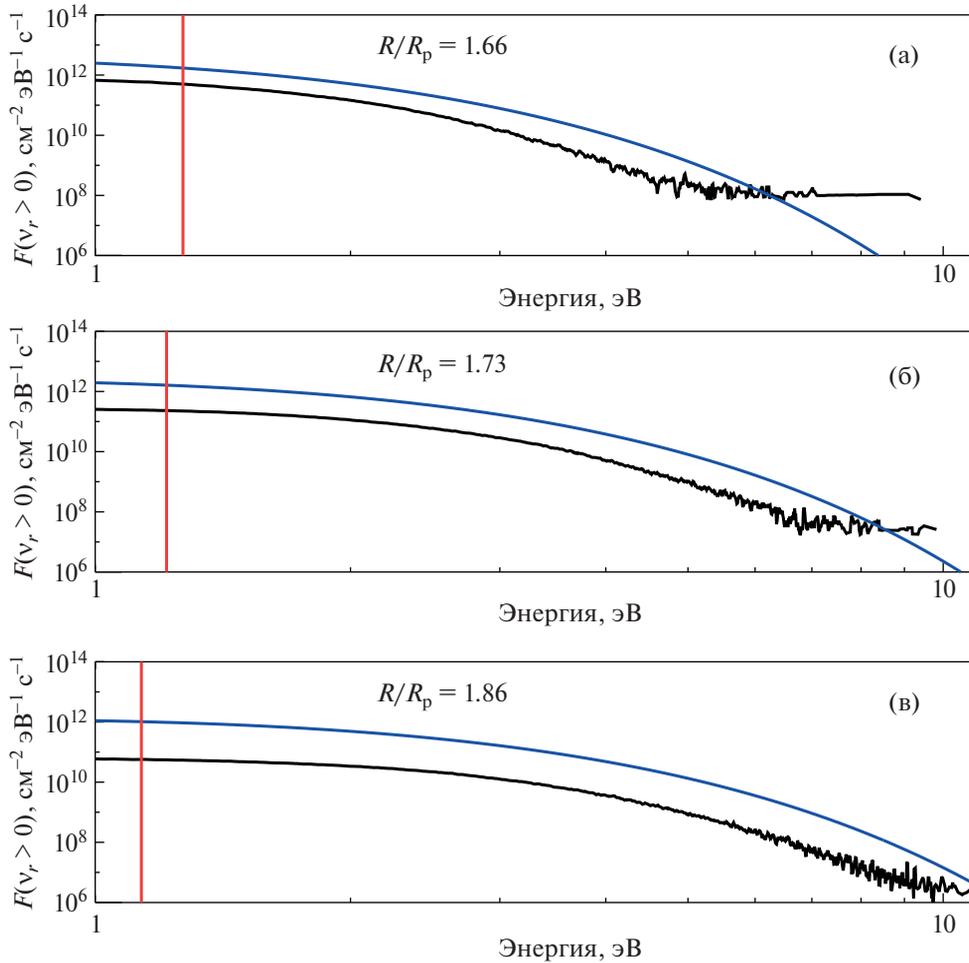


Рис. 3. Расчетные энергетические спектры восходящего потока надтепловых атомов водорода на высотах $1.66R_p$ (а), $1.73R_p$ (б) и $1.86R_p$ (в). Линиями синего цвета показаны восходящие потоки тепловых атомов H, рассчитанные для локально равновесного распределения атомарного водорода в соответствии с профилями концентрации и температуры из модели [21]. Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах.

вычисленной по формуле Джинса для числового потока тепловых атомов водорода (линии синего цвета на рис. 3) и равной $3.3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

На верхней панели рис. 4 представлены расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах $2.0R_p$ (малиновая линия) и $1.73R_p$ (красная линия) атмосферы горячего суб-нептуна GJ 3470b. Вертикальные пунктирные линии показывают энергию убегания атомов водорода за счет экзотермической фотохимии на данной высоте ($1.73R_p$ – красная линия и $2.0R_p$ – малиновая линия), которые равны 1.05 эВ для $2.0R_p$ и 1.21 эВ для $1.73R_p$. Интегралы по энергии для полученных спектров дают локальный поток убегания надтепловых атомов водорода, на высотах $1.73R_p$ и $2.0R_p$ они равны $2.1 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ и $1.86 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ соответственно. На нижней панели сплошной красной линией представлен восходящий поток

надтепловых атомов водорода в зависимости от высоты, пунктирной линией красного цвета представлен поток надтепловых атомов водорода с энергиями выше энергии убегания в зависимости от высоты.

Для сравнения с другими авторами усредним расчетный поток (на верхней границе переходной области, $3.4 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) по освещенной полусфере верхней атмосферы, чтобы получить верхнюю оценку скорости потери атмосферы за счет надтепловых атомов водорода, образующихся за счет процессов диссоциации молекулярного водорода, равную $9.5 \times 10^9 \text{ г/с}$. Это значение относительно ниже значений скорости потери массы атмосферы в соответствии с предсказаниями гидродинамического оттока атмосферы для суб-нептуна GJ 3470b в астрономических моделях ([20] – $1.5 \times 10^{10} \text{ г с}^{-1}$; [22] – $1.9 \times 10^{11} \text{ г с}^{-1}$; [18] – $3 \times 10^{10} \text{ г с}^{-1}$; [21] – $\sim 10^{10} \text{ г с}^{-1}$), т.е. темп нетепловых потерь ат-

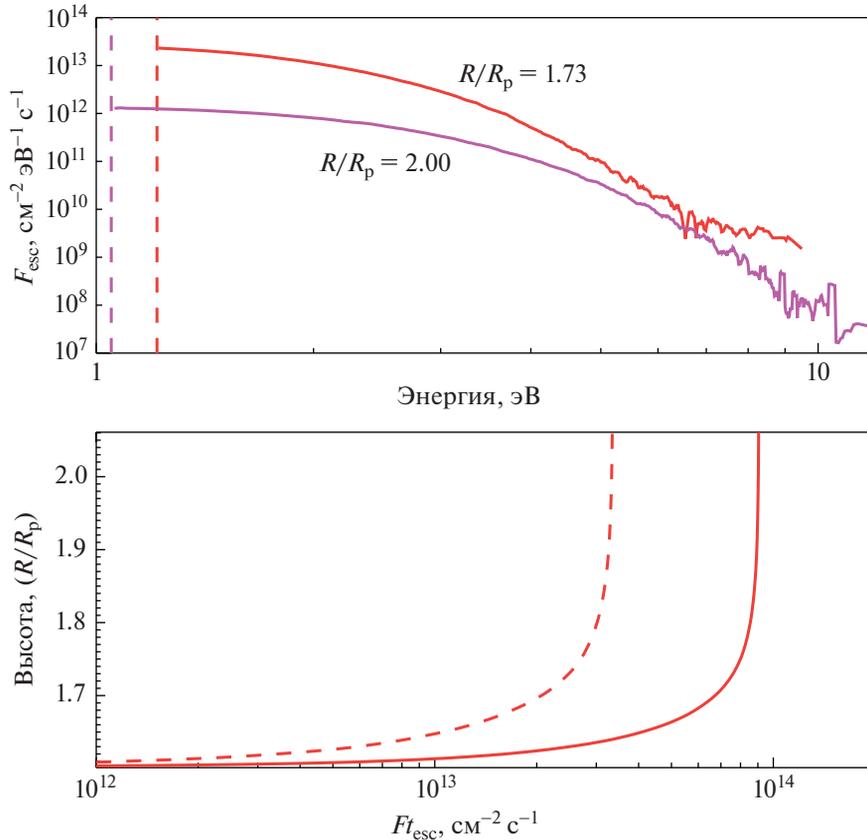


Рис. 4. На верхней панели представлены расчетные энергетические спектры восходящего потока надтепловых атомов водорода на высотах $1.73R_p$ (красная линия) и $2.0R_p$ (малиновая линия), атмосферы горячего нептона GJ 3470b. Вертикальные пунктирные линии показывают энергию убегания атомов водорода за счет экзотермической фотохимии на данной высоте ($1.73R_p$ – красная линия и $2.0R_p$ – малиновая линия). На нижней панели представлены профили полных (т.е. проинтегрированных по кинетической энергии) восходящего (сплошная линия) и убегающего (штриховая линия) потоков надтепловых атомов H, образующихся за счет экзотермической фотохимии.

мосферы изменяется в пределах от нескольких процентов и вплоть до 100% по сравнению с тепловым. Здесь следует отметить, что приведенные выше оценки темпа тепловой потери атмосферы в аэродинамических моделях [18–22] получены в режиме гидродинамического оттока атмосферы, когда возможны изменения темпа тепловой потери атмосферы вплоть до порядка величины в зависимости от уровня активности родительской звезды в XUV диапазоне излучения и других допущений моделей (см., например, недавние обзоры [2, 7]). Детальное исследование [25] режима гидродинамического оттока в планетной атмосфере из одноатомного газа показало, что данный режим реализуется лишь в очень ограниченном диапазоне параметра Джинса для данной атмосферы. Следовательно, в современных аэродинамических моделях атмосфер горячих экзопланет [2, 7, 26] требуется более детальное рассмотрение условий реализации режима гидродинамического оттока атмосферы, чтобы получить корректные оценки темпа тепловой потери. Более того, использование аппроксимационных формул для

оценки темпа тепловой потери атмосферы горячей экзопланеты также показывает широкий диапазон получаемых оценок. Так, например, используя часто используемую формулу для приближенной оценки темпа потери атмосферы в режиме ограничения по энергии (см., например, формулу (20) в недавней работе [27]) для горячего нептона GJ 3470b можно получить значения в пределах $(0.34–1.7) \times 10^9$ г/с для уровня XUV светимости родительской звезды от низкого до высокого соответственно. В результате проведенного в нашей работе сравнения можно заключить, что нетепловые процессы при моделировании атмосфер экзопланет необходимо учитывать для получения темпа потери массы атмосферы.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведенная оценка скорости нетепловой потери атмосферы экзопланетой GJ 3470b за счет надтепловых атомов водорода была получена впервые. Ее можно рассматривать как среднее

значение, потому как расчеты проводились для случая умеренной звездной активности в УФ излучении. Вклад процессов экзотермической фотохимии, включающих процессы диссоциации H_2 жестким УФ излучением звезды, в образование потока убегающих из атмосферы атомов водорода станет еще более существенным в условиях высокого уровня звездного УФ излучения, а тем более в условиях звездной вспышки [3].

Полученные относительно высокие значения скорости нетепловой потери атмосферы, равной 9.5×10^9 г/с, по сравнению с тепловым потоком убегания атмосферы в других моделях (от нескольких % вплоть до 100% от значений теплового потока), являются свидетельством того, что нетепловые потери из атмосфер экзопланет необходимо учитывать при разработке моделей убегания атмосферы для экзопланет с малой массой, в особенности для молодых планетных систем. Следует также отметить, что нетепловые потери атмосферы должны учитываться в расчетах эффективности преобразования энергии звездного XUV излучения в энергетический баланс, т.е. в аэрономической модели верхней атмосферы экзопланеты. В данном исследовании результаты аэрономических расчетов были входными параметрами и ставилась задача оценить величину темпа нетепловой потери атмосферы за счет фотохимических источников надтепловых атомов водорода. Соответственно, в последующих исследованиях в аэрономической модели необходимо будет учесть данный дополнительный источник потери тепловой энергии атмосферным газом в переходной $H_2 \rightarrow H$ области для горячей экзопланеты.

Известно, что перезарядка атомов водорода на протонах звездного ветра является важным нетепловым процессом потери атмосферы в дополнение к рассмотренным в данной статье фотохимическим процессам. Ранее проводились сходные исследования с использованием кинетического метода Монте-Карло для планет Солнечной системы. Например, в недавних исследованиях нетепловой потери атомов кислорода и водорода из атмосферы Марса, вызванных воздействием солнечного ветра, были получены оценки темпа потери атмосферы в зависимости от уровня солнечной активности [28]. Соответственно, в дальнейшем планируется расширить представленную в работе модель и учесть влияние звездного ветра на темп нетепловой потери атмосферы горячими экзопланетами.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Проект 22-22-00909).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *F. Fressin, G. Torres, D. Charbonneau, S. T. Bryson, et al.*, *Astrophys. J.* **766**, 81 (2013).
2. *J. E. Owen*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **47**, 67 (2019).
3. *D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, P. V. Kaygorodov, and A. G. Zhilkin*, *Physics Uspekhy* **64**, 747 (2021).
4. *J. E. Owen and A. P. Jackson*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **425**, 2931 (2012).
5. *E. D. Lopez, J. J. Fortney, and N. Miller*, *Astrophys. J.* **761**, 59 (2012).
6. *S. Ginzburg, H. E. Schlichting, and R. Sari*, *Astrophys. J.* **825**, 29 (2016).
7. *J. E. Owen, I. F. Shaikhislamov, H. Lammer, L. Fossati, and M. L. Khodachenko*, *Space Sci. Rev.* **216**, 129 (2020).
8. *H. E. Schlichting*, *Astrophys. J. Lett.* **795**, 1, L15 (2014).
9. *A. Izidoro, M. Ogihara, S. N. Raymond, A. Morbidelli, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **470**, 2, 1750 (2017).
10. *A. Wolfgang and E. Lopez*, *Astrophys. J.* **806**, 183 (2015).
11. *M. Ikoma and, Y. Hori*, *Astrophys. J.* **753**, 66 (2012).
12. *V. I. Shematovich*, *Solar System Research* **44**, 96 (2010).
13. *A. A. Avtaeva and V. I. Shematovich*, *Solar System Research* **55**, 150 (2021).
14. *H. Massol, K. Hamano, F. Tian, M. Ikoma, et al.*, *Space Sci. Rev.* **205**, 153 (2016).
15. *V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and D. E. Ionov*, *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments* (Editors Lammer H. and Khodachenko M.), *Astrophysics and Space Science Library* **411**, 105 (2015).
16. *V. I. Shematovich and M. Ya. Marov*, *Physics Uspekhi* **61**, 217 (2018).
17. *X. Bonfils, M. Gillon, S. Udry, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **546**, A27 (2012).
18. *E. Palle, L. Nortmann, N. Casasayas-Barris, M. Lampón, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **638**, A61 (2020).
19. *M. Salz, S. Czesla, P. C. Schneider, and J. H. M. M. Schmitt*, *Astron. and Astrophys.* **586**, A75 (2016).
20. *V. Bourrier, A. L. Des Etangs, D. Ehrenreich, J. Sanz-Forcada, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **620**, A147 (2018).
21. *I. F. Shaikhislamov, M. L. Khodachenko, H. Lammer, A. G. Berezutsky, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **500**, 1404 (2021).
22. *M. Lampón, M. López-Puertas, J. Sanz-Forcada, A. Sánchez-López, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **647**, 129 (2021).
23. *J. M. Ajello, D. E. Shemansky, and G. K. James*, *Astrophys. J.* **371**, 422 (1991).
24. *W. F. Huebner, J. J. Keady, and S. P. Lyon*, *Astrophys. Planet Sci. Suppl.* **195**, 1 (1992).
25. *A. N. Volkov*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **459**, 2030 (2016).
26. *D. E. Ionov, Y. N. Pavlyuchenkov, and V. I. Shematovich*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **476**, 5639 (2018).
27. *T. T. Koskinen, P. Lavvas, C. Huang, G. Bergsten, et al.*, *Astrophys. J.* **929**, 52 (22pp) (2022).
28. *V. I. Shematovich*, *Solar System Research* **55**, 322 (2021).