

Физика звёзд: теория и
наблюдения

Влияние звездного ветра на
нетепловое убегание
атмосферы экзопланеты
 ρ 1 Men c

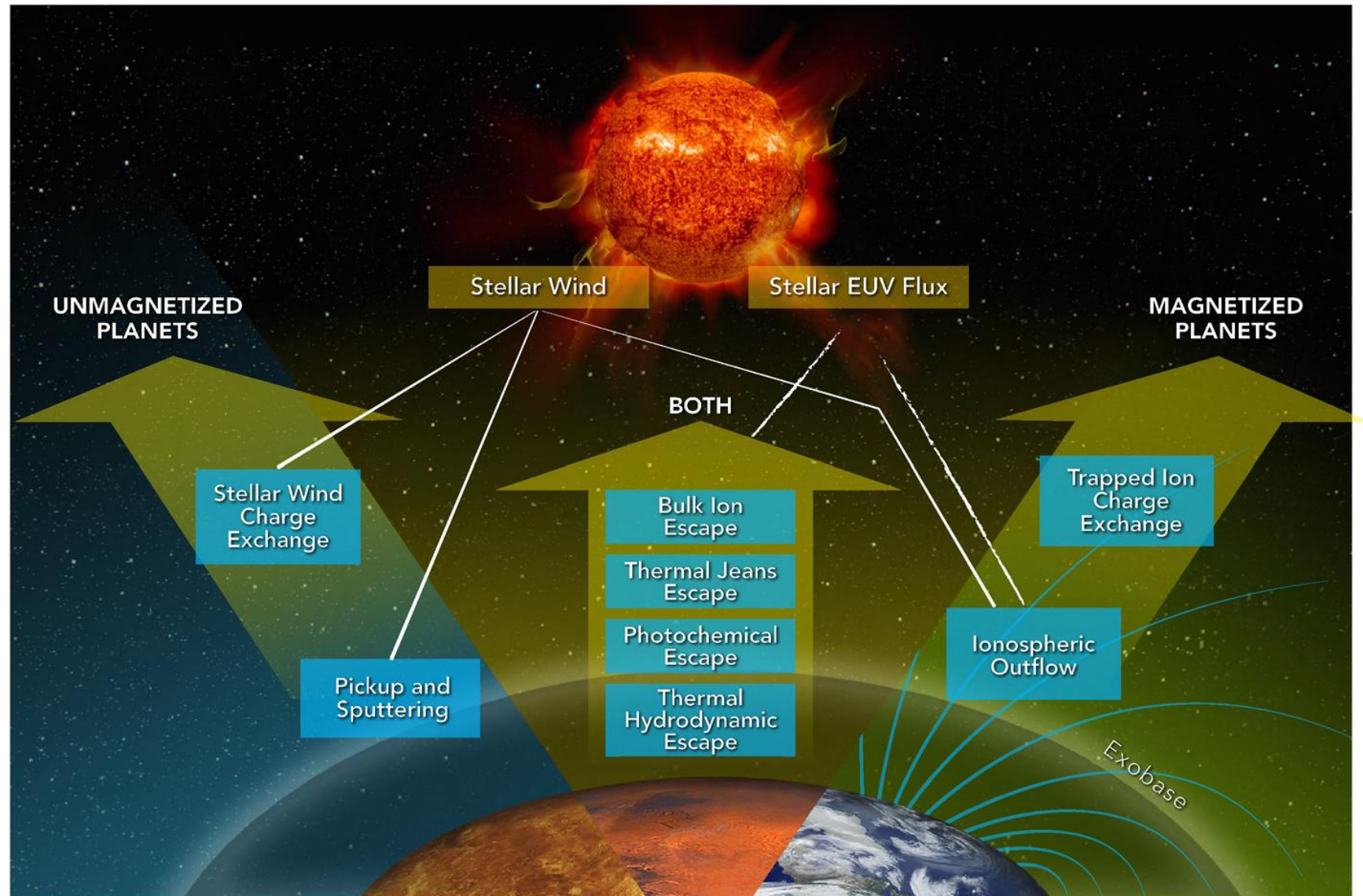
Автаева А.А., Шематович В.И.

Институт астрономии РАН



Звездный ветер

- перезарядка протонов звездного ветра
- подхват и распыление
- ионосферный ОТТОК

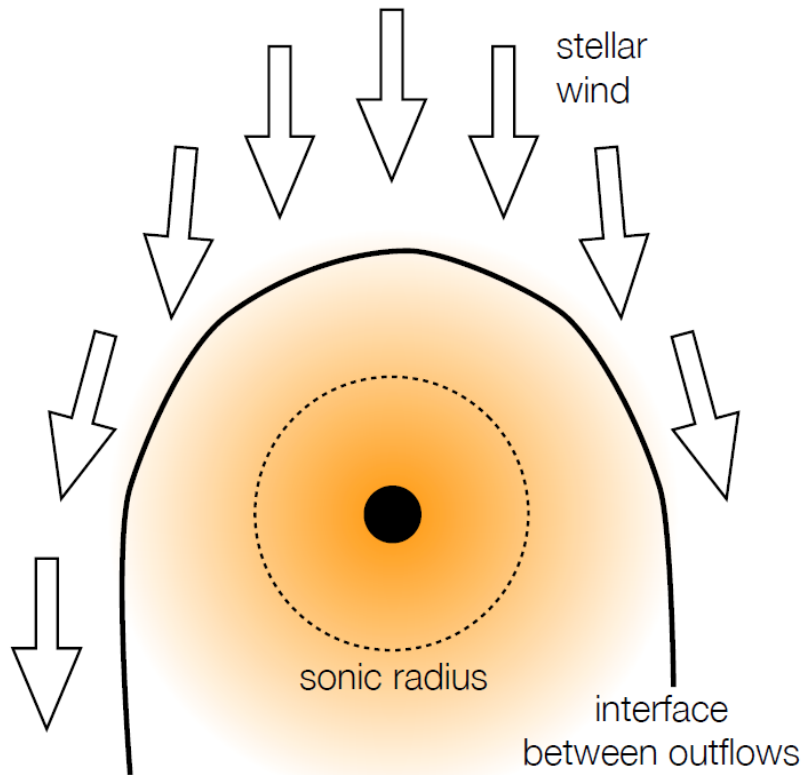


Звездный ветер

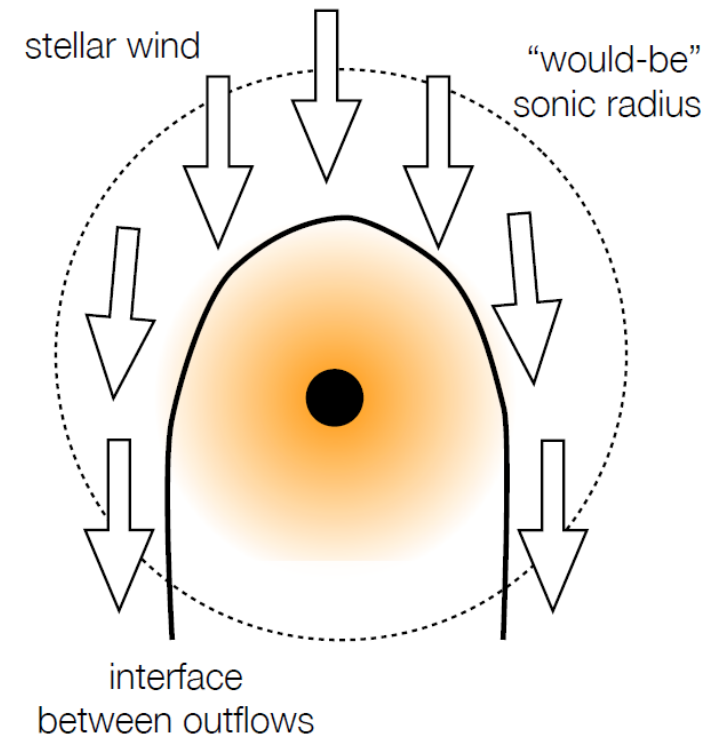
How stellar outflows influence planetary mass loss

Vidotto & Cleary 2020

Stellar wind shapes planetary outflow, affecting **observational signatures**, but not escape rates

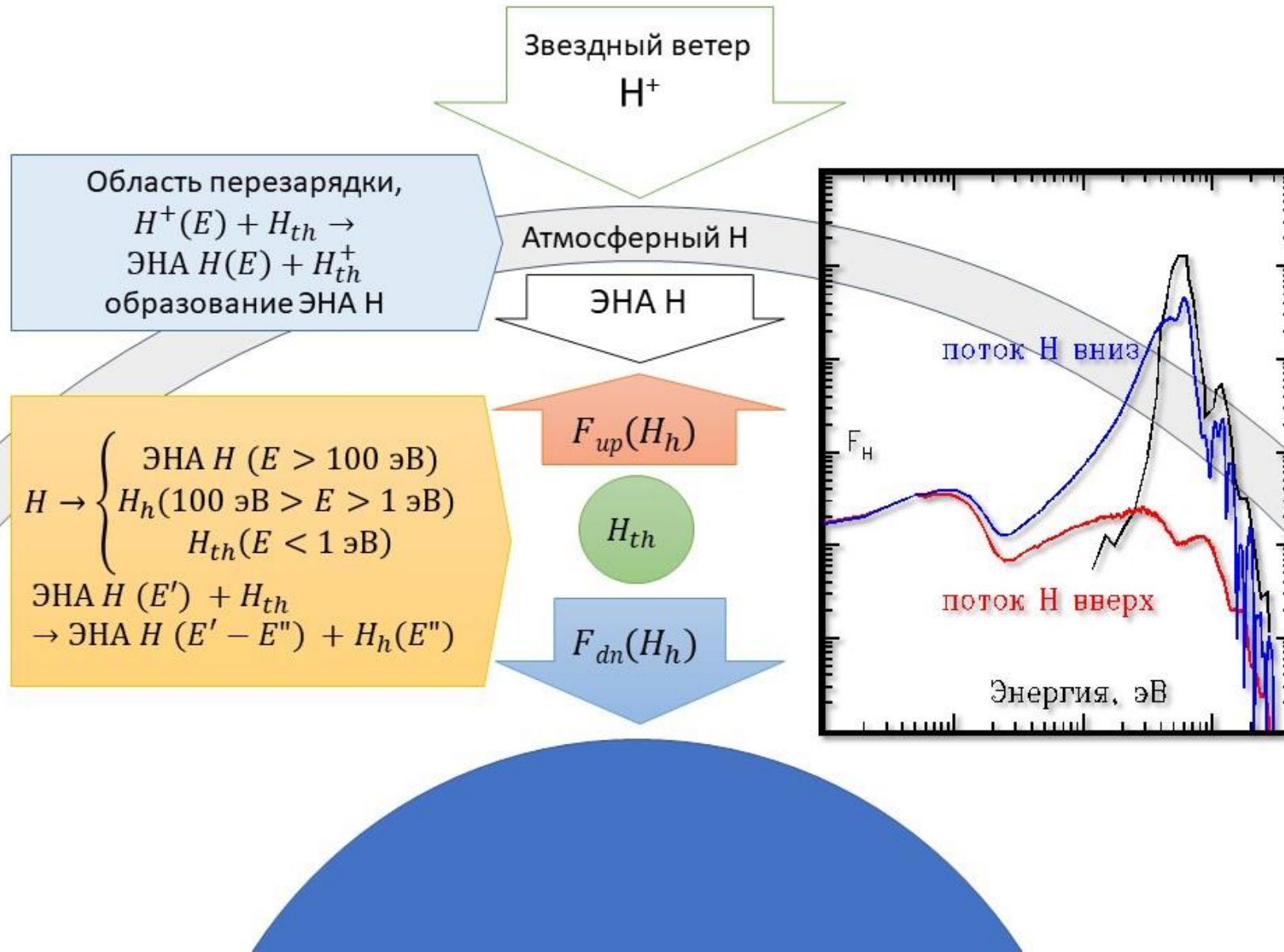


Stellar wind squashes planetary outflow, **reducing/preventing** atmospheric escape



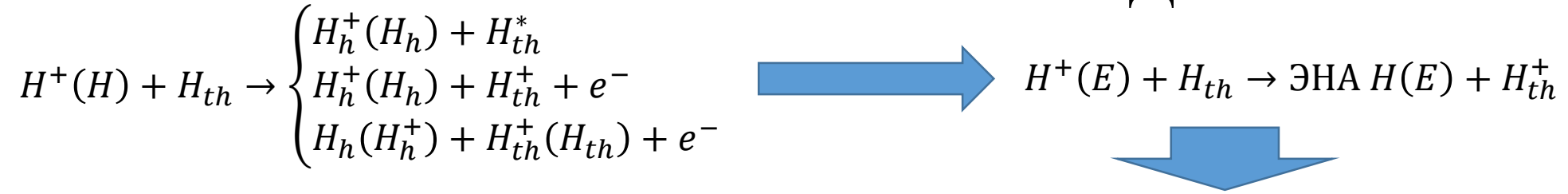
Stellar winds can reduce or even suppress mass loss from their exoplanets

Схема процесса



Схематичное представление воздействия ЗВ на протяженную верхнюю атмосферу горячей экзопланеты. Показаны: область перезарядки (выделена серым цветом на рисунке) протонов ЗВ с атомами водородной короны, в которой происходит образование потока атомов водорода с высокими энергиями (ЭНА Н) – формула перезарядки и образования ЭНА Н представлена на голубом поле. Далее показано взаимодействие потока ЭНА Н с водородной атмосферой экзопланеты (формула взаимодействия представлена на желтом поле), в результате которого образуются, направленные вверх (красная стрелка и красная линия на правой вставке) и вниз (синяя стрелка и синяя линия на правой вставке), потоки надтепловых атомов водорода. В водородной атмосфере присутствуют три фракции атомарного водорода (желтое поле): 1) тепловые атмосферные атомы водорода ($E < 1 \text{ эВ}$), 2) надтепловые атомы ($1 \text{ эВ} < E < 100 \text{ эВ}$), образующиеся за счет воздействия ЭНА Н на атмосферный газ и 3) сверхтепловые или ЭНА Н ($E > 100 \text{ эВ}$), то есть атомы водорода за счет перезарядки звездного ветра. Правая панель представляет схему расчетного спектра энергии восходящего (красная линия) и нисходящего (синяя линия) потока атомов водорода с высокими энергиями на высоте близкой к верхней границе исследуемой области. Черная линия представляет собой спектр входящего потока ЭНА Н в исследуемую область.

Кинетическая модель



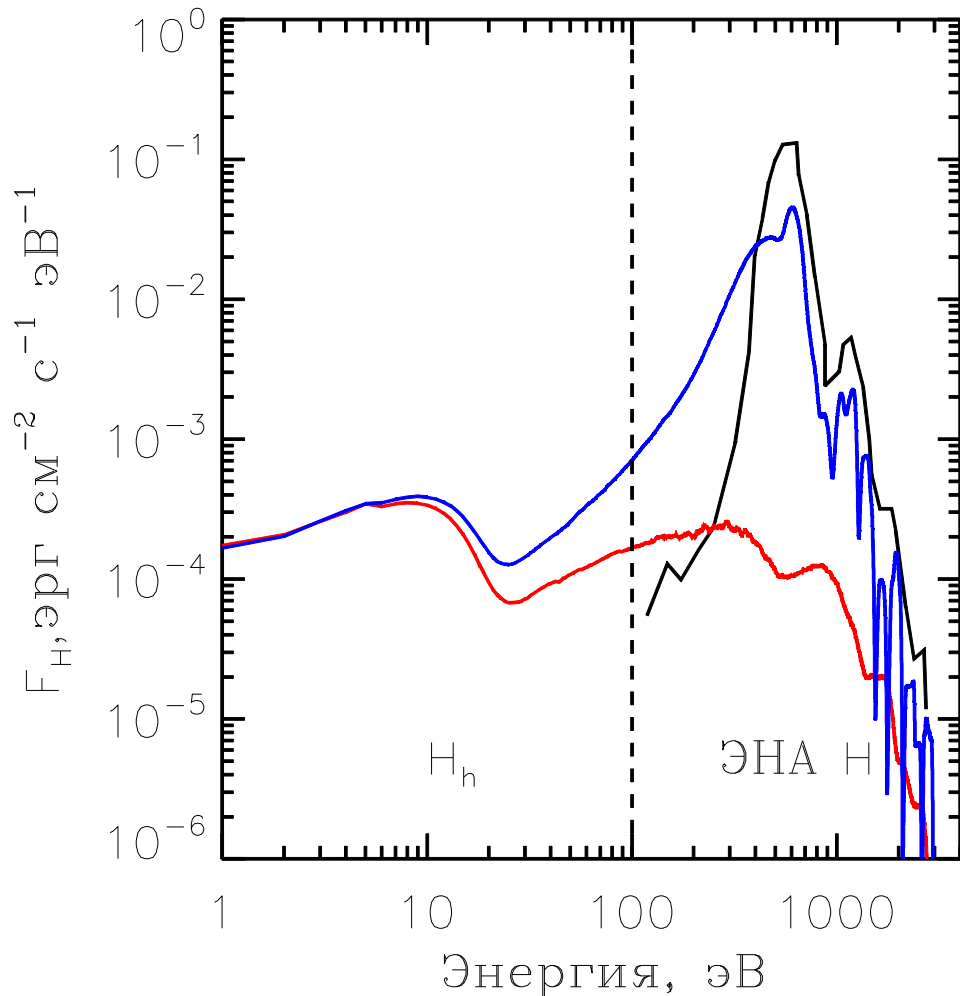
Свежие надтепловые атомы водорода теряют свою избыточную кинетическую энергию при столкновениях с другими частицами атмосферы и распространяются в переходной области между термосферой и экзосферой (Shematovich и др., 1999, 2005, 2011). Их кинетика и перенос описываются кинетическим уравнением Больцмана:

$$\mathbf{v} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} f_{\text{ЭНА } H} + \mathbf{s} \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} f_{\text{ЭНА } H} = Q_{\text{ЭНА } H}(\mathbf{v}) + J_{mt}(f_{\text{ЭНА } H}, f_{H_{th}}),$$

$$\mathbf{v} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} f_{H_h} + \mathbf{s} \frac{\partial}{\partial \mathbf{v}} f_{H_h} = Q_{H_h}(\mathbf{v}) + J_{mt}(f_{H_h}, f_{H_{th}}),$$

где $f_{H_h}(r, v)$, $f_{\text{ЭНА } H}(r, v)$ и $f_{H_{th}}(r, v)$ являются функциями распределения по скоростям для горячих атомов водорода, ЭНА Н и компонентов окружающего атмосферного газа – теплового атмосферного водорода, соответственно. Левая часть кинетического уравнения описывает перенос надтепловых атомов водорода в планетном гравитационном поле \mathbf{s} . В правой части кинетического уравнения функция источника $Q_{H_h}(\mathbf{v})$ описывает скорость образования надтепловых атомов водорода в упругих и неупругих столкновениях потока частиц ЭНА Н с атомами атмосферного водорода. $Q_{\text{ЭНА } H}(\mathbf{v})$ – задается на верхней границе исследуемой области, с помощью спектра звездного ветра. Интегралы столкновений $J_{mt}(f_{\text{ЭНА } H}, f_{H_{th}})$ и $J_{mt}(f_{H_h}, f_{H_{th}})$ для упругого и неупругого рассеяния ЭНА Н и горячих атомов водорода, соответственно, в столкновениях с окружающим атмосферным газом записывается в стандартной форме (Shematovich и др., 1999, 2005, 2011).

Энергетические расчетные спектры потоков высокоэнергетичных атомов водорода



Поскольку рассчитывается популяция надтепловых атомов водорода в переходной области верхних слоев атмосферы экзопланеты r_i Мен с, то нижний предел энергии надтепловых атомов в модели взят как 1 эВ, при этом температура окружающего газа равна ~ 0.4 эВ. Рассматривается область экзопланетной атмосферы от $4.0R_p$ до $8.6R_p$. В качестве нижней границы, мы рассматриваем относительно плотную термосферу, где горячие частицы быстро теряют избыточную кинетическую энергию при столкновениях с тепловыми молекулами окружающей среды или оседают на поверхность экзопланеты.

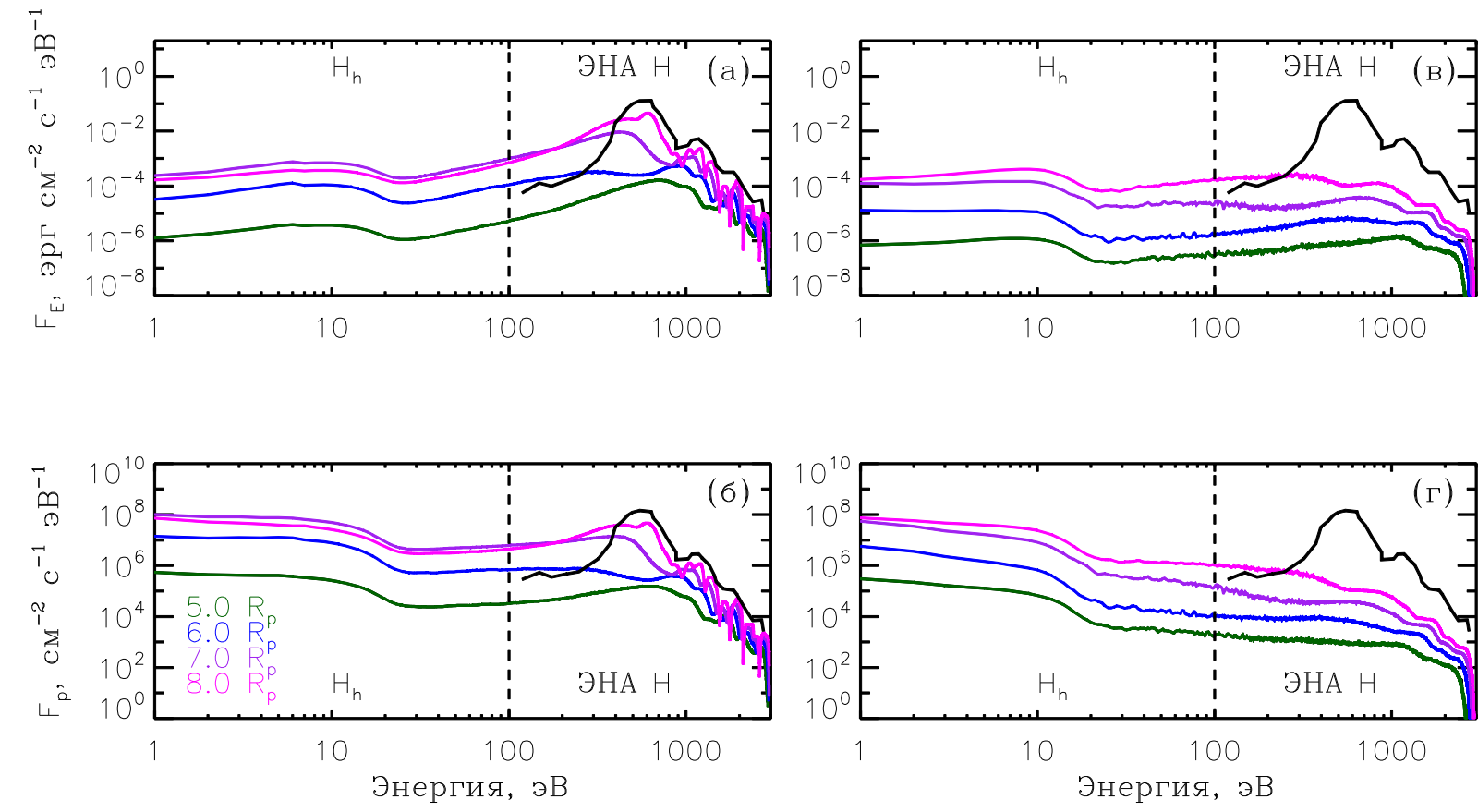
Представлены расчетные энергетические спектры потоков надтепловых атомов водорода ($1\text{эВ} < E < 100\text{эВ}$) и ЭНА H ($E > 100\text{эВ}$) на расстоянии $8.0R_p$ от центра экзопланеты. Синим представлен нисходящий поток энергии атомов водорода, красным – восходящий. Суммарный энергетический поток: вниз – $13,2 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, вверх – $0,2 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что составляет 40% (вниз) и 0,6% (вверх) от входящего в атмосферу потока атомов водорода ЭНА, равного $32,7 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Разница в $32.7 - 13.2 - 0.2 = 19.3 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ идет на нагрев атмосферного газа!

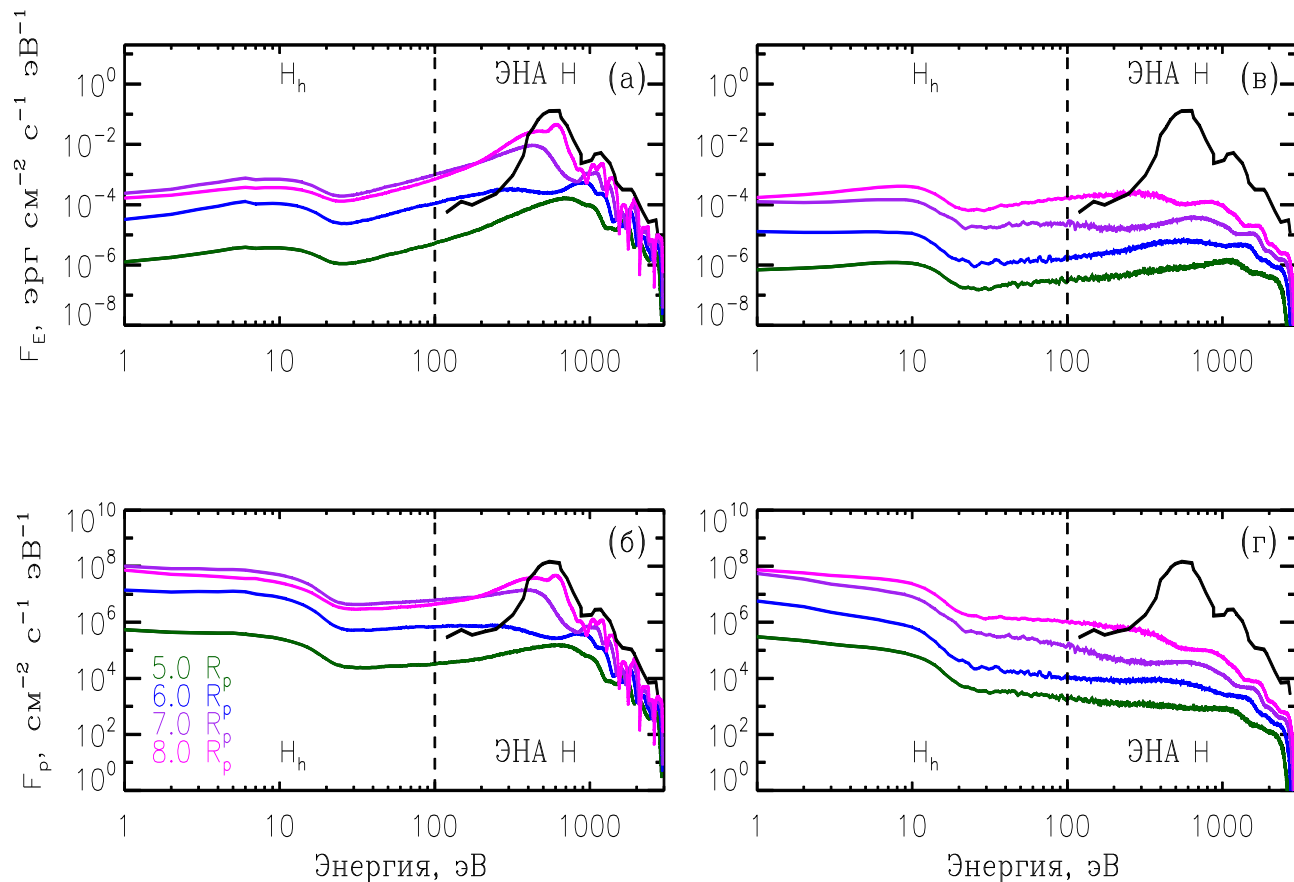
Энергетические спектры нисходящего и восходящего потоков атомов водорода

На верхних панелях (а и в) представлены энергетические спектры (F_E –поток энергии атомов водорода) нисходящего (а) и восходящего (в) потоков надтепловых атомов водорода ($1 \text{ эВ} < E < 100 \text{ эВ}$) и ЭНА Н ($E > 100 \text{ эВ}$) на разных высотах. На нижних панелях (б и г) – спектры числового потока (F_p) надтепловых атомов водорода и ЭНА Н на аналогичных высотах. Черной линией показан спектр входящего потока ЭНА Н, суммарный энергетический поток которого равен $32.7 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что соответствует числовому потоку равному $3.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Вывод: спектры носят существенно неравновесный характер и сильно отличаются от локально равновесных!



Изменение потока атомов водорода и их энергий с высотой



Изменение потока надтепловых атомов водорода с высотой. Представлены следующие значения для разных расстояний от центра планеты. Столбцы: (а) расстояние от центра планеты, в радиусах планеты, R_p ; (б) суммарный нисходящий и восходящий поток энергии надтеплого H_h водорода, эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (в) суммарный нисходящий и восходящий поток атомов надтеплого H_h водорода, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (г) суммарный нисходящий и восходящий поток энергии ЭНА Н, эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (д) суммарный нисходящий и восходящий поток ЭНА Н, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

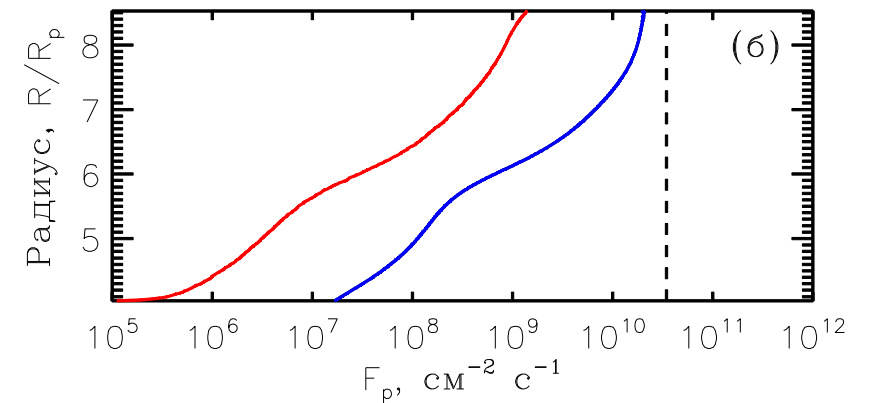
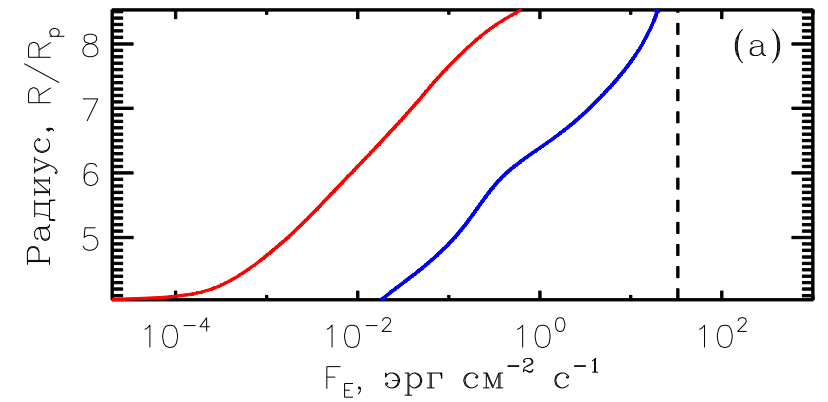
| (а) Расстояние от центра планеты, (R_p) | (б) Суммарный нисходящий поток энергии надтепловых атомов H_h , (эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (в) Суммарный нисходящий поток надтепловых атомов H_h , ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (г) Суммарный нисходящий поток энергии атомов ЭНА Н, (эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (д) Суммарный нисходящий поток атомов ЭНА Н, ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | 6.4×10^{-5} | 1.6×10^6 | 0.02 | 1.7×10^7 |
| 5 | 2.8×10^{-4} | 7.2×10^6 | 0.11 | 1.0×10^8 |
| 6 | 6.7×10^{-3} | 1.9×10^8 | 0.41 | 4.6×10^8 |
| 7 | 5.2×10^{-2} | 1.3×10^9 | 3.35 | 5.3×10^9 |
| 8 | 3.4×10^{-2} | 8.0×10^8 | 13.2 | 1.7×10^{10} |
| 8.5 | 5.5×10^{-3} | 1.2×10^8 | 19.4 | 2.1×10^{10} |
| 8.6 | 5.0×10^{-4} | 1.0×10^7 | 28.1 | 2.9×10^{10} |

| (а) Расстояние от центра планеты, (R_p) | (б) Суммарный восходящий поток энергии надтепловых атомов H_h , (эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (в) Суммарный восходящий поток надтепловых атомов H_h , ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (г) Суммарный восходящий поток энергии атомов ЭНА Н, (эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (д) Суммарный восходящий поток атомов ЭНА Н, ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | 3.7×10^{-6} | 2.6×10^5 | 0.0001 | 8.7×10^4 |
| 5 | 3.6×10^{-5} | 1.8×10^6 | 0.002 | 1.3×10^6 |
| 6 | 2.7×10^{-4} | 2.1×10^7 | 0.008 | 7.5×10^6 |
| 7 | 3.7×10^{-3} | 2.4×10^8 | 0.03 | 3.9×10^7 |
| 8 | 1.5×10^{-2} | 5.9×10^8 | 0.17 | 2.6×10^8 |
| 8.5 | 1.5×10^{-2} | 5.0×10^8 | 0.55 | 8.4×10^8 |
| 8.6 | 1.4×10^{-2} | 4.5×10^8 | 0.74 | 1.1×10^9 |

Изменение суммарного потока надтепловых и сверхтепловых атомов водорода с высотой. Представлены следующие значения для разных расстояний от центра планеты. Столбцы: (а) расстояние от центра планеты, в радиусах планеты, R_p ; (б) суммарный нисходящий поток энергии высокоэнергетического (надтеплого H_h и ЭНА H) водорода, $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (в) суммарный нисходящий поток атомов высокоэнергетического водорода, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (г) остаток потока энергии ЭНА H , проникающих через верхнюю границу исследуемой области, равной $32.7 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$, по мере прохождения через исследуемую область, %; (д) суммарный восходящий поток энергии высокоэнергетического (надтеплого H_h и ЭНА H) водорода, $\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (е) суммарный нисходящий поток атомов высокоэнергетического водорода, $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (ж) отраженная часть потока энергии ЭНА H , проникающих через верхнюю границу исследуемой области, равной $32.7 \text{ эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$, по мере прохождения через исследуемую область, %.

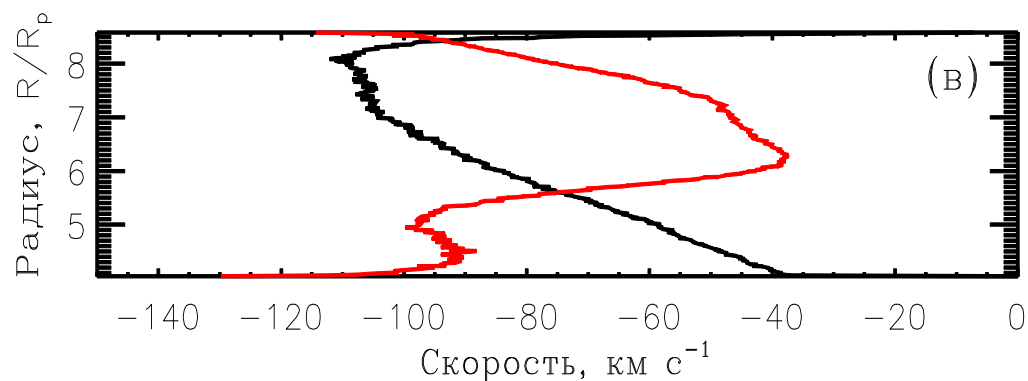
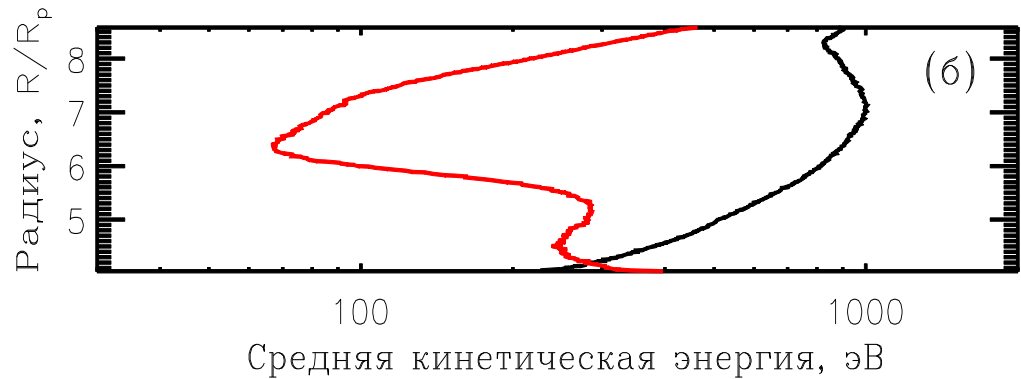
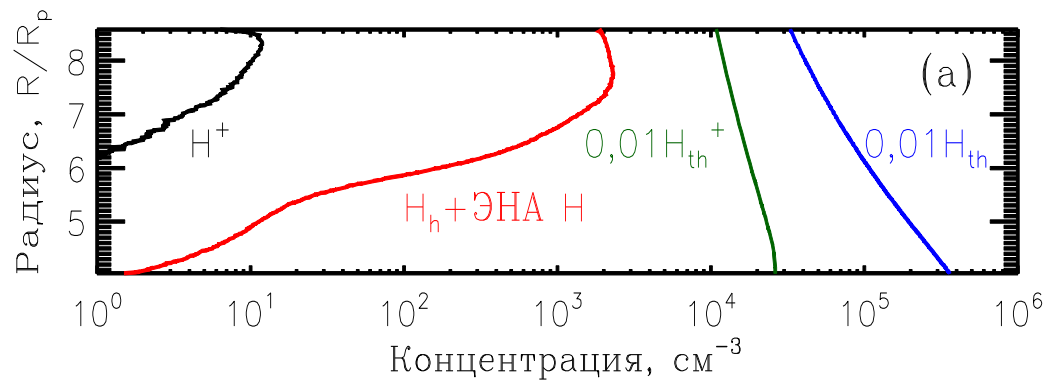
| (а) Расстояние от центра планеты, (R_p) | (б) Суммарный нисходящий поток энергии атомов H_h +ЭНА H , ($\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (в) Суммарный нисходящий поток атомов H_h +ЭНА H , ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (г) Остаток потока энергии ЭНА H , проникающих через верхнюю границу исследуемой области, (%) | (д) Суммарный восходящий поток энергии атомов H_h +ЭНА H , ($\text{эрг см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (е) Суммарный восходящий поток атомов H_h +ЭНА H , ($\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$) | (ж) Отраженная часть потока энергии ЭНА H , проникающих через верхнюю границу исследуемой области, (%) |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | 1.9×10^{-2} | 1.9×10^7 | 0.06 | 1.1×10^{-4} | 3.5×10^5 | 4.4×10^{-4} |
| 5 | 0.11 | 1.1×10^8 | 0.34 | 1.7×10^{-3} | 3.2×10^6 | 5.2×10^{-3} |
| 6 | 0.42 | 6.5×10^8 | 1.28 | 8.3×10^{-3} | 2.9×10^7 | 0.03 |
| 7 | 3.40 | 6.6×10^9 | 10.4 | 3.9×10^{-2} | 2.8×10^8 | 0.12 |
| 8 | 13.2 | 1.8×10^{10} | 40.4 | 0.18 | 8.6×10^8 | 0.55 |
| 8.5 | 19.4 | 2.1×10^{10} | 59.3 | 0.57 | 1.3×10^9 | 1.74 |
| 8.6 | 28.1 | 2.9×10^{10} | 85.9 | 0.76 | 1.5×10^9 | 2.32 |

Изменение потока атомов водорода и их энергий с высотой



Представлены нисходящий (синие линии) и восходящий (красные линии) потоки (энергетический – верхняя панель (а), числовой – нижняя панель (б)) надтепловых и сверхтепловых атомов водорода, с энергией превосходящей энергию убегания на этой высоте, в зависимости от расстояния от центра планеты в исследуемой области верхней атмосферы, лежащей в пределах от $4.0R_p$ до $8.6R_p$. Черной прерывистой линией показаны значения потока ЭНА H , проникающего в атмосферу на верхней границе исследуемой области.

Параметры атмосферы и высокоэнергетичной фракции атомов водорода



Представлены высотные профили компонентов атмосферы: синяя линия – тепловая фракция атомарного водорода, для удобства сравнения умноженная на коэффициент 0.01; зеленая линия – тепловая фракция ионизированного атмосферного водорода, для удобства сравнения умноженная на коэффициент 0.01; красная линия – надтепловая фракция водорода и ЭНА H (все атомы водорода с энергиями больше 1 эВ), черная линия – надтепловая фракция протонов (H^+). На верхней панели (a) представлены объёмные плотности компонентов атмосферы, на средней панели (б) – средняя кинетическая энергия разных фракций, тепловая фракция имеет температуру ~ 0.4 эВ, и на графике не представлена. На нижней панели (в) представлены массовые скорости надтепловых фракций протонов и атомов водорода. Информация для тепловой фракции водорода взята из модели Shaikhislamov и др., 2020.

Заключение и Выводы

- Через верхнюю границу исследуемой области атмосферы убегает поток атомов водорода, равный $1.5 \times 10^9 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что соответствует энергии $0.76 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, что составляет всего 2.3% от входящей в исследуемую область энергии от потока атомов ЭНА Н ($32.7 \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$). Остальная энергия ушла на кинетическую энергию атомов окружающего атмосферного газа, что приводит к общему нагреву атмосферы.
- Расчеты были проведены для условий спокойной звездной активности, но при сильном ветре или корональных выбросах массы эффект от воздействия звездного ветра станет сильнее, в то время как тепловое и нетепловое убегание существенно уменьшается из-за эффекта поджигания атмосферы из-за потока звездного ветра.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 22-22-00909.

Спасибо за внимание!