

УДК 523.3:523.4

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ АТМОСФЕРЫ СО ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ ВОКРУГ ЭКЗОПЛАНЕТЫ GLIESE 436 B

© 2019 г. А. Г. Березуцкий^{a, *}, И. Ф. Шайхисламов^a, И. Б. Мирошниченко^a,
М. С. Руменских^a, М. Л. Ходаченко^b

^aФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, 630090 Россия

^bИнститут космических исследований Австрийской Академии Наук, Грац, 8042 Австрия

*e-mail: a.berezuckiy@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.07.2018 г.

После доработки 06.11.2018 г.

Принята к публикации 08.11.2018 г.

В работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия планетарной атмосферы экзопланеты Gliese 436 b с ионизирующим излучением и плазменным ветром звезды спектрального класса M. Используется самосогласованная газодинамическая 2D-модель, описывающая процессы радиационного нагрева и ионизации, реакций водородной фотохимии. Показано, данная планета должна обладать обширной, в десятки радиусов планеты, экзосферой из частично ионизованного газа с примесью молекулярных компонент, истекающей со сверхзвуковой скоростью. Рассмотрено влияние таких факторов, как интенсивность XUV-излучения, температура нижней атмосферы на скорость потери массы.

Ключевые слова: экзопланеты, планетарная атмосфера, аэрономия, звездный ветер, численное моделирование

DOI: 10.1134/S0320930X19020014

Более чем 40% известных на сегодняшний день экзопланет вращаются экстремально близко ≤ 0.1 а. е. вокруг своих звезд. Предполагается, что атмосфера нептуну-подобных экзопланет, таких как Gliese 436 b, аналогична атмосферам планет солнечной системы с преобладанием водорода и гелия (Linei др., 2014; Nettelmann и др., 2010). Планеты, вращающиеся экстремально близко вокруг звезд, могут претерпевать значительную эволюцию атмосферы из-за воздействия звездного излучения (Lopez и др., 2012; Owen и др., 2013). Уже первые транзитные наблюдения привели к обнаружению обширных экзосфер вокруг горячих юпитеров, например, HD 209458b и HD 189733b (Vidal-Madjar и др., 2004; Lecavelier des Etangs и др., 2010). Теплый Нептун Gliese 436 b показал наличие необычно большой экзосферы $(5-15) \times 10^6$ км, сопоставимой с диском родительской звезды с протяженным хвостом (Kulow и др., 2014). Два независимые серии транзитных наблюдения с помощью HST COS показали 50% поглощение в линии Ly α в диапазоне Доплеровского смещения скорости $(-120, -40)$ км/с (Ehrenreich и др., 2013, 2015; Lavie и др., 2017). Помимо протяженного хвоста, поглощение водородом показывает ранний ингресс, т.е. наличие плотного облака простирающегося перед планетой на рас-

стояние сопоставимое с размером диска звезды. Помимо Ly α , в работе (Lloyd и др., 2017) на основе тех же данных HST COS анализировалось поглощение в линиях тяжелых элементов C II (1334 Å) и Si III (1206 Å), которое обнаружено не было.

Теоретическое изучение верхних атмосфер горячих экзопланет развивалось на основе гидродинамического описания. Lammer и др., (2003) показали, что звездное УФ- и рентгеновское излучение, проникающее в обогащенную водородом термосферу должно приводить к газодинамическому истечению. Начиная с первого численного моделирования (Yelle, 2004), были изучены различные аспекты явлений, таких как гидродинамическое ускорение планетарного ветра до сверхзвуковых скоростей за счет поглощения XUV-излучения нагрева газа (Penz, Micela, 2008), аэрономия верхней атмосферы, включающая кроме водорода и гелия другие элементы, такие как N, O, C (Koskinen и др., 2010). Эффекты приливных сил изучались в (Erkaev и др., 2007). Murray-Clay и др., (2009) показали, что охлаждение через излучение Ly α имеет важное значение, также как реабсорбция Ly α -фотонов (Shaikhislamov и др., 2014), а в (Yelle, 2004; Koskinen и др., 2013; Shaikhislamov и др., 2014) было продемонстрировано, что энергетический баланс планетарного

выхода также зависит от инфракрасного охлаждения термосферы молекулой H^3+ . Взаимодействие планетарного течения газового гиганта HD 209458 b со звездным ветром подробно изучалось в работах (Shaikhislamov и др., 2014; 2016), где показана возможность наблюдения двух режимом. Режим “blownbythewind”, где достаточно сильный звездный ветер ограничивает планетарное вещество с дневной стороны, направляя его от звезды в хвост, тем самым образуя на дневной стороне планетарную плазмосферу с головной ударной волной. Режим “capturedbythestar” проявляется, когда приливные силы превышают давление звездного ветра, что приводит к формированию потока планетарного вещества, ускоряющегося в направлении к звезде.

Единственное до настоящего времени газодинамическое моделирование Gliese 436 b выполнено в работе (Loyd и др., 2017). На основе одномерной аэрономической модели с учетом таких элементов как C, O, Si было показано, что термосфера этой экзопланеты относительно холодная (<5000 K), а истечение сверхзвуковое и не превышает скорости 10 км/с. Было обнаружено, что молекулярный водород не диссоциирует полностью в верхней атмосфере Gliese 436 b и распространяется с течением далеко от планеты. Результаты (Loyd и др., 2017) показывают, что, хотя экзосфера Gliese 436 b достаточно плотная, слабоионизованная и обширная, температура и скорость атомов водорода слишком низки для объяснения наблюдаемого поглощения в линии $\text{Ly}\alpha$ в диапазоне скоростей (–120, –40) км/с.

Помимо газодинамического моделирования, для описания экзосферы горячих экзопланет применяется моделированием методом частиц. Нейтральные атомы запускаются с условной границы плотной термосферы (обычно, полости Роша), и вычисляются их трехмерные траектории с учетом сил гравитации и радиационного давления, а также столкновительных процессов с протонами звездного ветра. Ускорение медленных планетарных атомов давлением $\text{Ly}\alpha$ -излучения звезды (Vidal-Madjar и др., 2004), а также перезарядка на протонах с образованием энергичных нейтральных атомов (Holmstrom, 2007) являются двумя механизмами, которые могут объяснить поглощения в линии $\text{Ly}\alpha$. В работах (Ehrenreich и др., 2015; Bourrier и др., 2016) было установлено, что для получения наблюдаемого поглощения на уровне 50% необходимо действие обоих процессов. Для условий Gliese 436 b требуется планетарный ветер с относительно низкой интегральной потерей массы 5×10^8 гр/с, но с очень большой скоростью (~70 км/с) истечения

В настоящей работе для моделирования планетарной атмосферы экзопланеты Gliese 436 b используется полностью самосогласованная многожидкостная 2D-модель, которая включает в себя водородную аэрономию и реакции водородной фотохимии (Shaikhislamov и др., 2014, 2016; Kho-

dachenko и др., 2015; 2017). Варьируя начальную температуру атмосферы и интенсивность звездного XUV излучения, исследуются физические процессы, протекающие в термосфере. Целью является исследование структуры течения, состава, плотности и температуры как вблизи планеты, так и на относительно больших расстояниях ($>10R_p$). 2D-модель позволяет учесть зональные течения, которые перераспределяют энергию нагрева верхней атмосферы XUV-излучением с дневной стороны на ночную, а также более точно вычислять приливные силы. Фактически, данная работа продолжает аэрономическое моделирование горячих экзопланет (Koskinen и др., 2010; Loyd и др., 2017), но в более адекватной двухмерной постановке. Учитывая значительную неопределенность с параметрами возможного плазменного ветра звезд класса M и F (Wood, 2004), мы берем в модели очень разреженный поток звездной плазмы, который обтекает и взаимодействует с планетарным ветром. Отметим, что первые попытки определить параметры звездного ветра были основаны на теории теплового радиоизлучения (Panagia, Felli, 1975). Другой предложенный метод для детектирования звездных ветров, состоял в обнаружении рентгеновского излучения, когда ионизированные частицы звездного ветра перезаряжаются с нейтральными атомами в межзвездной среде (Wargelin, Drake, 2002). Дальнейшее развитие моделей атмосфер горячих экзопланет и более качественные и регулярные данные наблюдений позволят в будущем разработать новые методы оценки звездного ветра по его взаимодействию с планетарным ветром. Такие попытки уже делаются, и в работе (Vidotto, Bourrier, 2017), на основе метода частиц, где локальная плотность, температура и скорость звездного ветра на орбите Gliese 436 b оценены как $n_{sw} = 100 \text{ см}^{-3}$, $T_{sw} = 1 \text{ МК}$, $V_{sw} = 70 \text{ км/с}$.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Взаимодействие расширяющейся атмосферы Gliese 436 b с потоком плазмы звездного ветра моделируется с помощью двумерной осесимметричной газодинамической модели, которая подробно описана в работах (Shaikhislamov и др., 2014; 2016; Khodachenko и др., 2015Ф; 2017). Используется цилиндрическая система координат с осью симметрии направленной от планеты к звезде. Такая геометрия хорошо подходит для приливно захваченных планет, ориентированных относительно звезды одной фиксированной стороной. Учитываются гравитационные силы и инерционные силы в системе отчета планеты. При этом центробежная сила орбитального вращения планеты берется в двумерном приближении с усреднением вокруг оси симметрии (Khodachenko и др., 2015). Так же, в используемой геометрии пренебрегается силой Кориолиса. Плазма рассматривается как квазинейтральная жидкость с

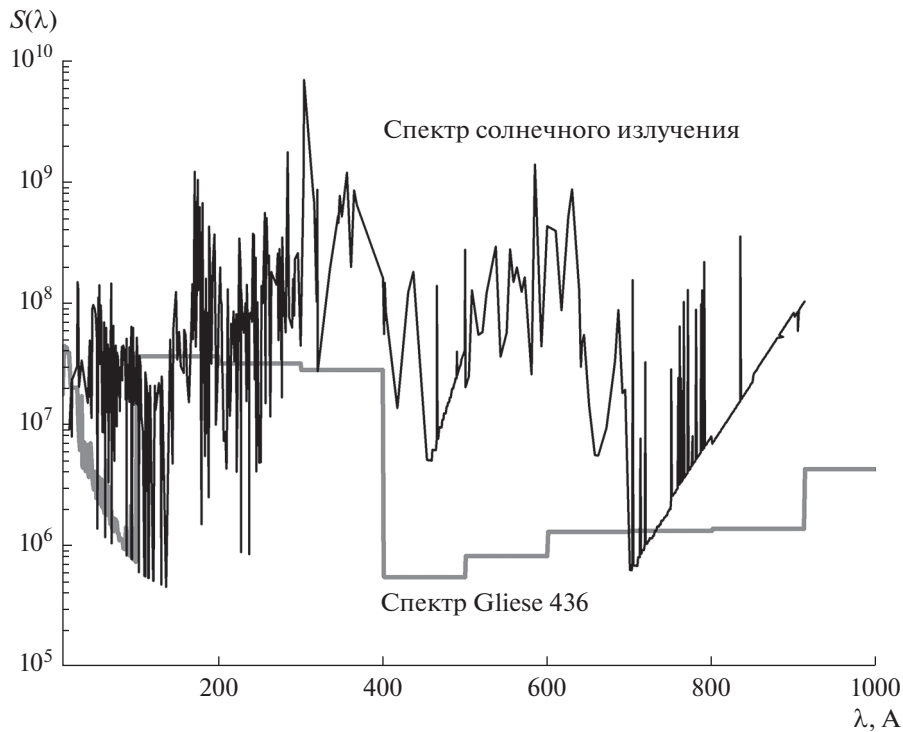


Рис. 1. Сравнение солнечного спектра с модельным спектром Gliese 436 в диапазоне длин волн 10–912 Å.

тепловым равновесием $T_i = T_e$. В начальном состоянии рассматривается полностью нейтральная атмосфера в барометрическом равновесии при температуре 750 К, состоящая из молекулярного водорода и нейтрального гелия в соотношении $n_{\text{H}_2}/n_{\text{He}} = 1/5$. Применение многожидкостного подхода, включающего раздельное описание H , H^+ , He , He^+ , H_2^+ , H_3^+ позволяет более точно описать динамику истечения атмосферы. Модель учитывает основные фотохимические процессы в водородной-гелиевой атмосфере экзопланеты, что позволяет самосогласованным образом описать ее нагрев и ионизацию за счет поглощения XUV излучения звезды, приводящие к разлету вещества, в виде частично ионизованного планетарного ветра. Фотоионизация приводит к сильному нагреву планетарного материала и является основной движущей силой планетарного ветра. Для Gliese 436 использовался аппроксимированный спектр (рис. 1) в спектральном диапазоне 10–912 Å, полученный по результатам наблюдений MUSCLES (France и др., 2016). Из-за малого размера звезды, интегрированный XUV поток на расстоянии 1 а. е. для данного спектра равен $F_{\text{XUV}} = 0.86 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Интенсивность излучения Ly α в центре линии равна $F_{\text{Ly}\alpha} = 1.6 \times 10^{13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Исследуемая система, состоит из планеты Gliese 436 b с массой $M_p = 0.07 M_J$ и радиусом $R = 0.38 R_J$, вращающаяся на расстоянии $D = 0.028$ а. е. вокруг красного карлика Gliese 436 спектрального класса M 2.5, имеющего массу $M_{\text{St}} = 0.45 M_S$ и

радиус $R_{\text{St}} = 0.46 R_S$. В качестве характерных значений численной задачи используется радиус планеты R_p , температура 10^4 К и соответствующая скорость протонов $V_0 = 9.07$ км/с. Число Кнудсена в потоке планетарной плазмы на расстояниях $Z = 10 R_p$ и $40 R_p$ равно $\text{Kn} = 0.1$ и $\text{Kn} = 1.2$ соответственно. Это указывает на то, что течение является столкновительным и применение газодинамического моделирования обоснованным. Все результаты, представленные в настоящей работе, выполнены без учета внешнего или планетарного магнитного поля.

В настоящее время достоверные данные о параметрах плазменного ветра других звезд, включая красных карликов, отсутствуют. С целью рассмотреть экзосферу Gliese 436 b в условиях, когда звездный ветер практически не влияет на ее динамику вблизи планеты, мы взяли очень разреженную и относительно холодную плазму на орбите планеты ($n_{\text{sw}} = 100 \text{ см}^{-3}$, $T_{\text{sw}} = 1 \text{ МК}$, $V_{\text{sw}} = 70 \text{ км/с}$). По этой причине в задаче также не рассматривается генерация Энергичных Нейтральных Атомов, образующиеся при перезарядки планетарных атомов со звездными протонами. Цель данного исследования состоит в аэрономическом моделировании экзосферы Gliese 436 b и определение основных параметров важных для наблюдательных проявлений — максимальную температуру, скорость, протяженность, степень ионизации. По сравнению с первой такой работой (Loyd и др., 2017), данная работа рассматривает проблему в двух измерениях, что позволяет смоделиро-

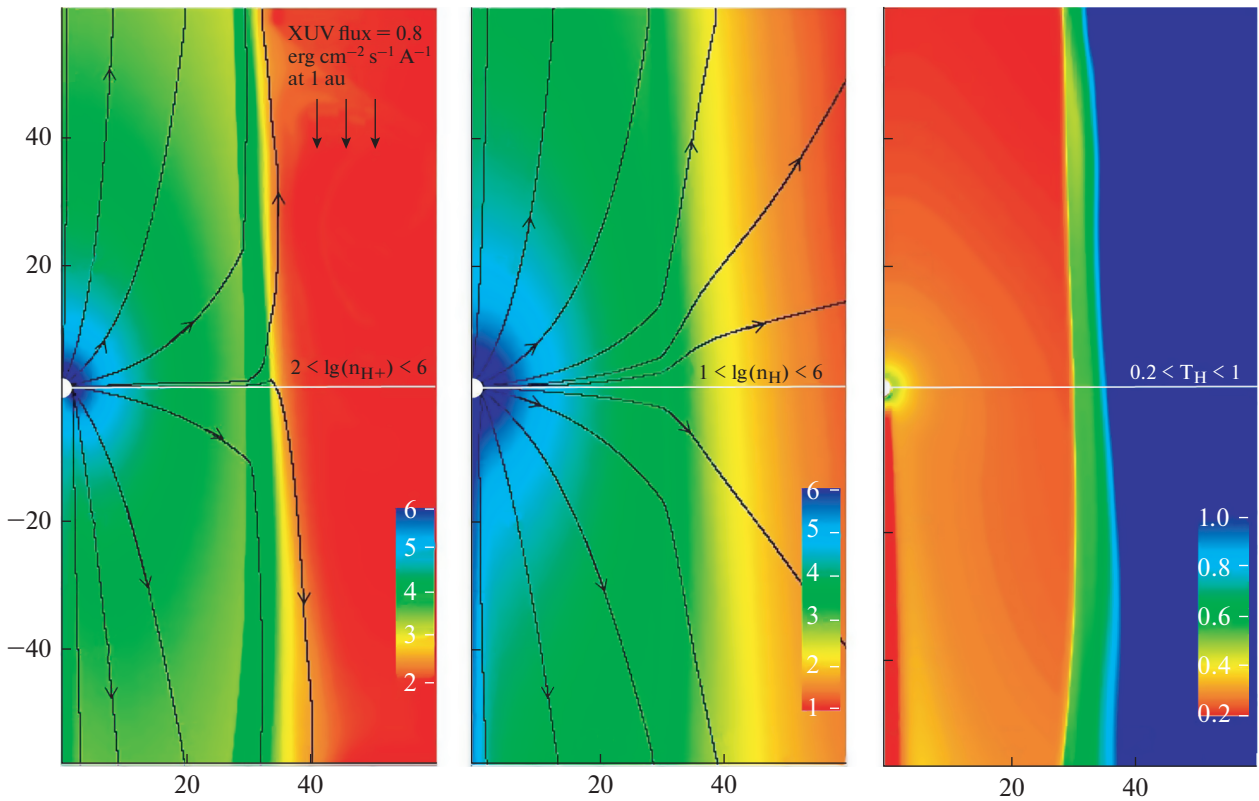


Рис. 2. Пространственные распределения концентрации протонов (n_{H^+}), атомов (n_H) и температуры (T_H) вокруг планеты Gliese 436 b в потоке разреженно звездной плазмы. Значения представлены в логарифмической шкале в цветовом диапазоне от красного до синего с указанными значениями. Белый круг $R = 0$, $Z = 0$, обозначает планету. Черные линии показывают линии течения соответствующих компонент. Параметры расчета: интенсивность ионизирующей радиации $F_{XUV} = 0.8 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ на расстоянии 1 а. е., температура нижней атмосферы 750 К.

вать пространственную структуру экзосферы гораздо более адекватно. Такая постановка задачи и диктует выбор очень слабого звездного ветра.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Пространственная структура основных компонент планетарной атмосферы (атомы водорода и протоны), взаимодействующих со звездным ветром, показана на рис. 2. Также представлены линии течения соответствующих компонент. Как видно, планетарное вещество выходит за пределы полости Роша ($6R_p$) и ускоряется приливными силами, формируя течение к звезде и в хвост. Далеко от планеты на расстоянии $\sim 30R_p$ боковое расширение планетарного вещества ограничивается давлением звездного ветра. В результате возникает граница (ионопауза), разделяющая экзосферу от звездного ветра, на которой планетарные протоны останавливаются. Поскольку на этих расстояниях скорость расширения планетарного ветра уже сверхзвуковая, то на границе образуется ударная волна. В тоже время, планетарные атомы относительно свободно пролетают через ударную волну, так как длина их свободного

пробега по столкновениям в этой области уже достаточно большая.

Более детально распределения плотности, скорости и температуры компонент расширяющейся атмосферы Gliese 436 b иллюстрирует рис. 3. Профили скорости и температуры подтверждают, что планетарные атомами и протоны эффективно обмениваются импульсом и энергией в первую очередь через реакцию перезарядки, которая при низких энергиях имеет сечение в несколько раз большее чем сечение упругих столкновений. На расстоянии порядка $10R_p$ скорость достигает примерно 10 км/с. За пределами полости Роша скорость продолжает увеличиваться за счет приливных сил, достигая значений ~ 60 км/с. Максимальная температура термосферы достигает всего 5000 К, что значительно меньше чем у таких горячих Юпитеров HD209458b или HD189733b. Это связано со значительно более низкой интенсивностью XUV излучения родительской звезды. После максимума температура плавно спадает за счет адиабатического охлаждения. Другая особенность состоит в том, что степень ионизации остается умеренной даже на больших расстояниях от планеты и концентрация атомов водорода превышает концентрацию протонов во всей рассматрива-

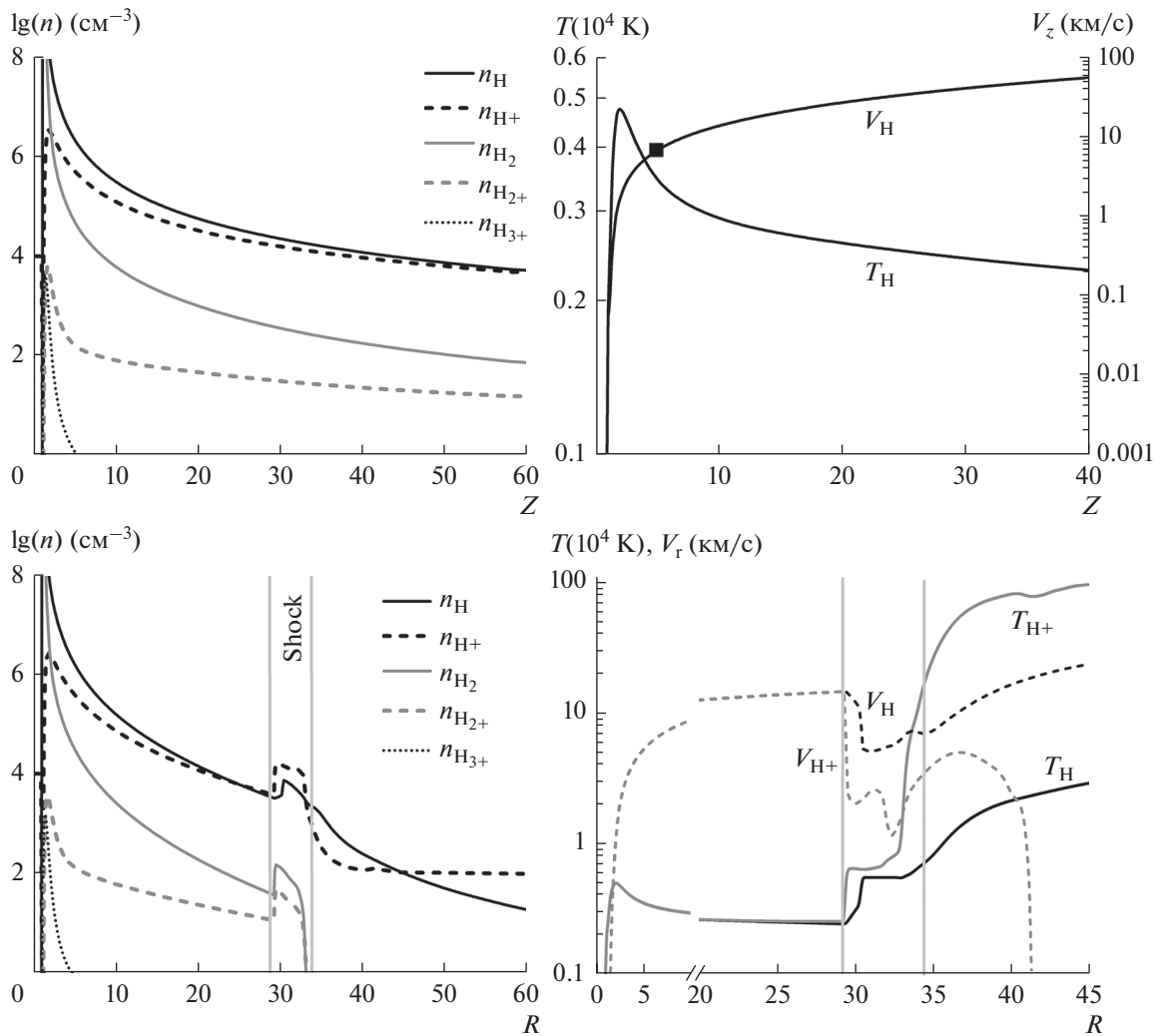


Рис. 3. Профили плотности, температуры и скорости компонент планетарного ветра вдоль оси планета-звезда (ось Z , $R = 0$; верхние панели) и в перпендикулярном направлении (ось R , $Z = 0$; нижние панели). Точкой, на верхнем рисунке справа, показана граница, локализованная на дистанции $5R_p$, после которой поток движется со сверхзвуковой скоростью.

емой экзосфере. Более того, в отличие от горячих Юпитеров, молекулярный водород полностью не диссоциирует и наблюдается также во всей экзосфере. Все эти черты качественно и количественно полностью соответствуют одномерному аэродинамическому расчету Gliese 436 b, выполненному в работе (Lloyd и др., 2017). В частности, в это работе максимальная температура достигала 4200 K на расстоянии $1.85 R_p$, а скорость 10 км/с на расстоянии $8R_p$.

На радиальных распределениях (нижние панели) четко просматривается область планетарного течения, звездного ветра и ударной волны. Скорость планетарных атомов и ионов в радиальном направлении достигает значений 14 км/с и становится сверхзвуковой. Именно поэтому торможение из-за давления звездного ветра образует в планетарном течении ударную волну. При концентрации протонов в области ударной волны, порядка 10^4 cm^{-3} , длина пробега атомов водорода

по перезарядке составляет примерно $2.5 \times 10^{10} \text{ cm}$, или примерно $10R_p$. Таким образом, планетарные атомы, вследствие относительно редких столкновений, проникают в звездный ветер, где их скорость и температура уже значительно отличается от звездных протонов. В целом, выбранные параметры разреженного звездного ветра ограничивают растекание планетарного вещества на очень больших расстояниях, превышающих размер звезды, и поэтому не могут влиять на процессы формирования и свойства экзосферы, а также ее наблюдательные проявления.

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость основных параметров планетарного ветра от интенсивности звездного XUV-излучения, поглощаемого атмосферой планеты. При варьировании F_{XUV} в три раза величина температурного максимума изменяется примерно на 700 K, а скорость истечения в 1.5 раза. Это приводит к значительному изменению теплового и кинетического давления

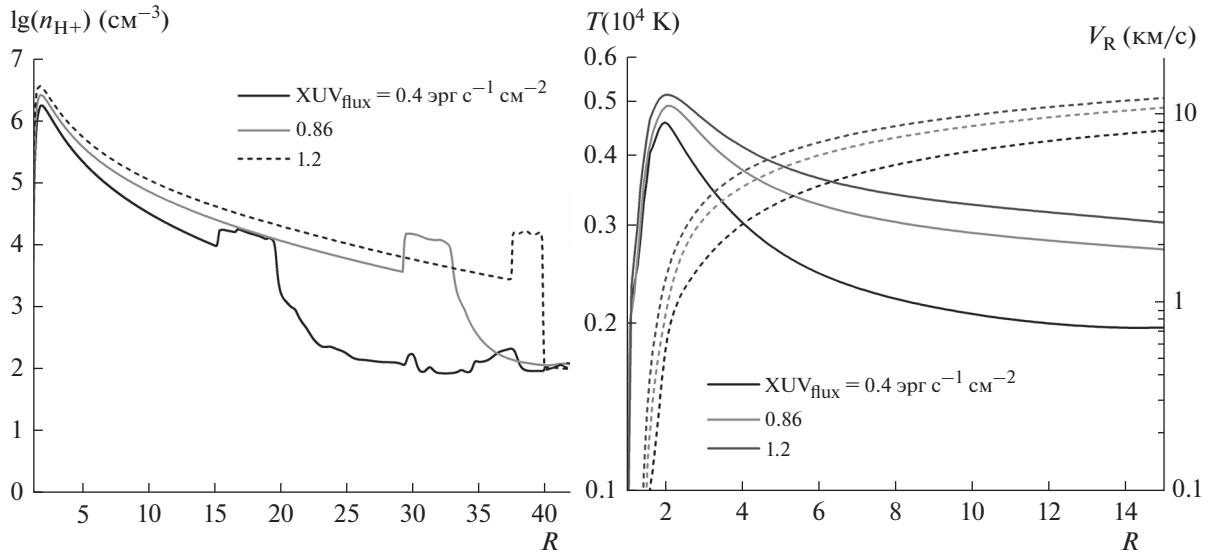


Рис. 4. Радиальные распределения профиля плотности, температур и скоростей планетарных протонов при значениях интенсивности ионизирующего излучения $F_{\text{XUV}} = 0.4, 0.86$ и $1.2 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

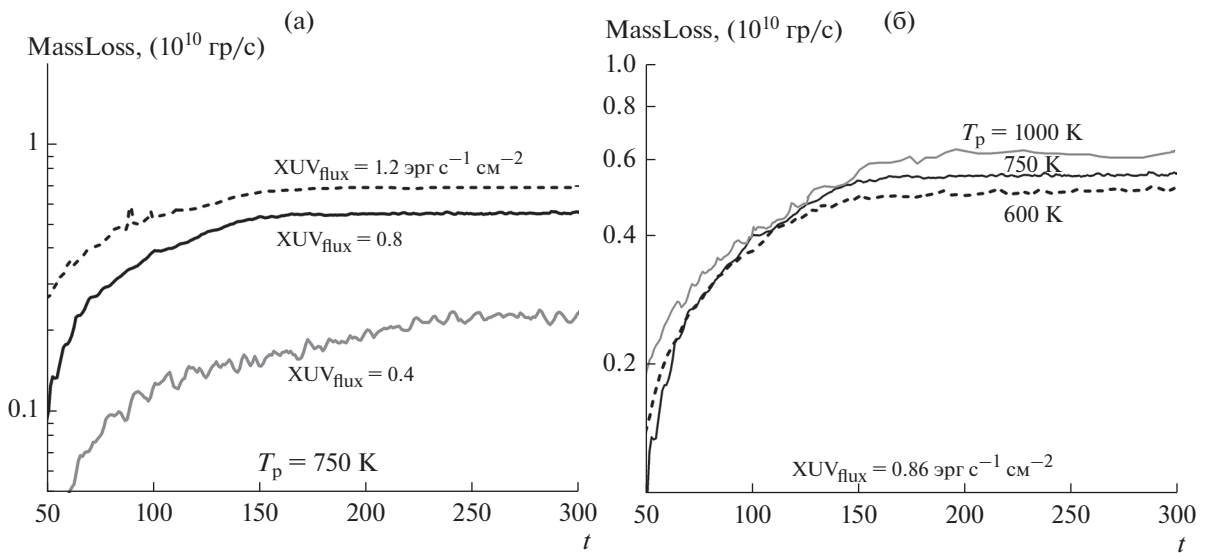


Рис. 5. Интегральный поток массы Gliese 436 b в зависимости от времени, при варьировании начальных параметров: (а) $F_{\text{XUV}} = 0.4, 0.86$ и $1.2 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$, $T_p = 750 \text{ K}$; (б) $T_p = 600, 750$ и 1000 K , $F_{\text{XUV}} = 0.86 \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Характерное время в расчетах определяется выражением $t = R_p/V_0$.

планетарного потока, и к значительному смещению положения ударной волны.

Рис. 5а иллюстрирует влияние XUV-излучения на интегральный поток массы от планеты, или потерю массы. Как видно, эта величина практически пропорциональна поглощаемой энергии, что свидетельствует о так называемом энергетическом ограниченном истечении, когда поглощаемая энергия уходит, в основном, на диссоциацию молекул H_2 (5.25 эВ), ионизацию атомов водорода (13.6 эВ) и преодоление гравитационного потен-

циала планеты (3.3 эВ). Это приводит к слабой зависимости потери массы от температуры или скорости истечения экзосферы, потому что вклад тепловой или кинетической энергии незначителен. На рис. 5б показано влияние температуры нижней атмосферы планеты. Эта величина влияет на потерю массы через барометрическую шкалу высот, от которой сильно зависит концентрация вещества вблизи поверхности планеты. Как видно, изменение температуры в предполагаемом диапазоне 600–1000 К отражается на потере мас-

сы также относительно незначительно. Отметим, что решение выходит на стационарный уровень через достаточно большой промежуток времени, соответствующий примерно 10 сут.

Скорость потери массы одна из главных характеристик планетарной атмосферы рассматривается в контексте эволюции планет. Для случая Gliese 436 b, Ehrenreich 2015 и Bourcier и др., 2016 оценили, на основе моделирования методом частиц и фитирования наблюдательным данным по поглощению в $\text{Ly}\alpha$, это величину в $\sim(2.5-5) \times 10^8$ г/с для водорода, при этом скорость истечения должна составлять 70 км/с. В прямом 1D аэрономическом расчете (Lloyd и др., 2017) получена существенно большая величина – 1.6×10^9 г/с для атомов водорода и 3.1×10^9 г/с для всех частиц. Наша модель дает 1.8×10^9 г/с для HI, 1.8×10^9 г/с для HII и 5×10^9 г/с для всех частиц. Как видно, аэрономические расчеты хорошо согласуются между собой, а по темпу потери массы и скорости течения дают значения, которые отличаются от предложенных в работах (Ehrenreich, Bourcier 2015 и Bourcier и др., 2016) практически на порядок величины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе, используя осесимметричную многожидкостную газодинамическую 2D-модель, проведено численное моделирование экзосферы Gliese 436 b. Показано, что истечение атмосферы данного теплого Нептуна качественно и количественно отличается от ранее изученных горячих юпитеров, например, HD209458b и HD189733b. Максимальная температура термосферы не превышает 5000 К, а скорость истечения 10 км/с. Водород остается относительно слабо ионизованным даже на значительных расстояниях от планеты. Также, молекулярный водород не полностью диссоциирует и присутствует в обширной области в несколько десятков радиусов планеты. Интегральная потеря массы составляет $\sim 5 \times 10^9$ г/с, что примерно на порядок меньше чем численные модели дают для горячего юпитера HD209458b. Однако, учитывая в пять раз меньший поток XUV-излучения и в 12 раз меньшую площадь, скорость потери массы весьма значительна в относительном выражении. Практически линейная зависимость потери массы от интенсивности XUV-излучения показывает, что, как и для горячих юпитеров, истечение формируется в энергетически ограниченном режиме, когда поглощаемая энергия уходит на диссоциацию и ионизацию водорода.

Полученные результаты хорошо согласуются с одномерным аэрономическим расчетом Gliese 436 b, выполненным в работе (Lloyd и др., 2017). Там получена скорость потери массы 3×10^9 г/с, максимальная температура 4200 К достигаемая на расстоянии $1.85R_p$, точка половинной диссоциации H_2 на расстоянии $1.35R_p$ и скорость истече-

ния 10 км/с на $8R_p$. Также, как и в нашей работе (Lloyd и др., 2017) отмечается отсутствие полной диссоциации молекулярного водорода и значительной ионизации атомарного водорода. Настоящий двухмерный расчет учитывает неоднородность нагрева атмосферы лишь с одной освещенной стороны планеты и перераспределение выделяемой энергии на ночную сторону зональными течениями. Другое важное отличие настоящего исследования – более реалистичная пространственная структура планетарного течения на расстояниях в несколько планетарных радиусов в которой учитывается действие приливных сил и, в определенной степени, звездного ветра.

Несмотря на достаточно низкую скорость, истечение атмосферы является сверхзвуковым. В присутствии звездной плазмы, даже весьма разреженной, давление планетарного вещества на достаточно большом расстоянии уравнивается тепловым давлением звездного ветра и образуется ударная волна. В силу специфики используемой двухмерной геометрии ударная волна формируется только в планетарном течении, в то время как звездный ветер движется вдоль границы раздела с планетарной средой. В реальной 3D-геометрии можно ожидать более сложной конфигурации. Так же, как и для горячего юпитера HD209458b мы обнаружили, что атомы водорода проникают через область ударной волны и практически беспрепятственно распространяются в разреженном звездном ветре.

В целом, численное моделирование газодинамическими моделями показывает, что экзопланта Gliese 436 b должна быть окружена обширной относительно холодной, плотной частично ионизованной газовой оболочкой с присутствием молекулярного водорода, охватывающей весь диск звезды. Это несомненно должно отразиться на транзитных спектральных измерениях. В тоже время, объяснение измеренного поглощения в линии $\text{Ly}\alpha$ в интервале Допплеровских скоростей $-70, -120$ км/с требует дальнейшего моделирования трехмерными моделями в присутствии реалистичного звездного ветра. Интерпретация, предложенная на основе моделирования траекторий частиц в работах (Bourcier и др., 2013, 2016), основывается на предположении о том, что планетарное истечение Gliese 436 b должно быть очень разреженным с потерей массы порядка $\sim 5 \times 10^8$ г/с, но при этом очень быстрым, со скоростью примерно 70 км/с. Это полностью противоречит результатам газодинамического моделирования как настоящей работы, так и работы (Lloyd и др., 2017).

Работа выполнена в рамках Российского научного фонда, проект № 18-12-00080, Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-52-14006, Программы фундаментальных исследований СО РАН (проект П.10 № 0307-2017-0015) и Австрийского научного фонда, проекты I2939-N27, S11606-N16, S11607-N16. Параллельное компьютерное моделирование было выпол-

нено при помощи суперкомпьютерного центра Московского государственного университета, Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН и суперкомпьютерного центра Новосибирского государственного университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bourrier V., Lecavelier des Etangs A.L.* 3D-model of hydrogen atmospheric escape from HD 209458b and HD 189733b: radiative blow-out and stellar wind interactions // *Astronomy & Astrophysics*, 2013. V. 557. A124.
- Bourrier V., des Etangs A.L., Ehrenreich D., Tanaka Y.A., Vidotto A.A.* An evaporating planet in the wind: stellar wind interactions with the radiatively braked exosphere of GJ 436 b // *Astronomy & Astrophysics*, 2016. V. 591. A121.
- Des Etangs A.L., Ehrenreich D., Vidal-Madjar A., Ballester G.E., Désert J.M., Ferlet R., Hebrard G., Sing D.K., Tchakoumegni K.O., Udry S.* Evaporation of the planet HD 189733b observed in H I Lyman- α // *Astronomy & Astrophysics*. 2010. V. 514. A72.
- Ehrenreich D., Bourrier V., Wheatley P.J., Des Etangs A.L., Hébrard G., Udry S., Bonfils X., Delfosse X., Désert J.M., Sing D.K., Vidal-Madjar A.* A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436 b // *Nature*. 2015. V. 522. P. 459–461.
- Erkaev N.V., Kulikov Y.N., Lammer H., Selsis F., Langmayr D., Jaritz G.F., Biernat H.K.* Roche lobe effects on the atmospheric loss from “Hot Jupiters” // *Astronomy & Astrophysics*. 2007. V. 472. № 1. P. 329–334.
- France K., Loyd R.O.P., Youngblood A., Brown A., Schneider P.C., Hawley S.L., Froning C.S., Linsky J.L., Roberge A., Buccino A.P., Davenport J.R.A., Fontenla J.M., Kaltenegger L., Kowalski A.F., Mauas P.J.D., Miguel Y., Redfield S., Rugheimer S., Tian F., Vieytes M.C., Walkowicz L.M., Weisenburger K.L.* The MUSCLES treasury survey. I. Motivation and overview // *Astrophys. J.* 2016. V. 820. № 2. P. 89–113
- Khodachenko M.L., Ribas I., Lammer H., Grießmeier J.M., Leitner M., Selsis F., Arnold E., Helfried H., Charles J., Helmut F., Rucker H.O.* Coronal mass ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. II. CME impact on expected magnetospheres of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones // *Astrobiology*. 2007. V. 7. № 1. P. 167–184.
- Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., Prokopov P.A.* Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar Xuv. II. Effects of planetary magnetic field; structuring of inner magnetosphere // *The Astrophysical J.* 2015. V. 813. № 1. P. 50–67.
- Koskinen T.T., Yelle R.V., Lavvas P., Lewis N.K.* Characterizing the thermosphere of HD209458b with UV transit observations // *The Astrophysical J.* 2010. V. 723. № 1. P. 116–128.
- Koskinen T.T., Harris M.J., Yelle R.V., Lavvas P.* The escape of heavy atoms from the ionosphere of HD209458b. I. A photochemical–dynamical model of the thermosphere // *Icarus*. 2013. V. 226. № 2. P. 1678–1694.
- Kulow J.R., France K., Linsky J., Loyd R.O.P.* Ly α transit spectroscopy and the neutral hydrogen tail of the hot Neptune GJ 436b // *The Astrophysical J.* 2014. V. 786. P. 132–140.
- 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 // *The Astrophysical J. Letters*. 2003. V. 598. № 2. P. 121–124.
- Lavie B., Ehrenreich D., Bourrier V., des Etangs A.L., Vidal-Madjar A., Delfosse X., Garcia Berna A., Heng K., Thomas N., Udry S., Wheatley P.J.* The long egress of GJ 436b’s giant exosphere // *Astronomy and Astrophysics*. 2017. V. 605. L7.
- Line M.R., Knutson H., Wolf A.S., Yung Y.L.* A systematic retrieval analysis of secondary eclipse spectra. II. A uniform analysis of nine planets and their C to O ratios // *The Astrophysical J.* 2014. V. 783. № 2. P. 70–82.
- 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 // *The Astrophysical J.* 2012. V. 761. № 1. P. 59–71.
- Loyd R.P., Koskinen T.T., France K., Schneider C., Redfield S.* Ultraviolet C ii and Si iii Transit Spectroscopy and Modeling of the Evaporating Atmosphere of GJ436b // *The Astrophysical J. Letters*. 2017. V.834. № 2. L17.
- Murray-Clay R.A., Chiang E.I., Murray N.* Atmospheric escape from hot Jupiters // *The Astrophysical J.* 2009. V. 693. № 1. P. 23–42.
- Nettelmann N., Kramm U., Redmer R., Neuhäuser R.* Interior structure models of GJ436 b // *Astron. and Astrophys.* 2010. V. 523. A26.
- Owen J.E., Wu Y.* Kepler planets: a tale of evaporation // *The Astrophysical J.* 2013. V. 775. № 2. 105.
- Panagia N., Felli M.* The spectrum of the free-free radiation from extended envelopes // *Astronomy and Astrophysics*. 1975. V. 39. P. 1–5.
- Penz T., Micela G.* X-ray induced mass loss effects on exoplanets orbiting dM stars // *Astronomy & Astrophysics*. 2008. V. 479. № 2. P. 579–584.
- Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Sasunov Y.L., Lammer H., Kislyakova K.G., Erkaev N.V.* Atmosphere expansion and mass loss of close-orbit giant exoplanets heated by stellar XUV. I. Modeling of hydrodynamic escape of upper atmospheric material // *The Astrophysical J.* 2014. V. 795. № 2. P. 132–147.
- Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., Kislyakova K.G., Fossati L., Johnstone C.P., Prokopov P.A., Berezutsky A.G., Zakharov Yu.P., Posukh V.G.* Two regimes of interaction of a Hot Jupiter’s escaping atmosphere with the stellar wind and generation of energized atomic hydrogen corona // *The Astrophysical J.* 2016. V. 832. № 2. P. 173–193.
- Vidal-Madjar A., Désert J.M., Des Etangs A.L., Hébrard G., Ballester G.E., Ehrenreich D., Ferlet R., McConnell J.C., Mayor M., Parkinson C.D.* Detection of oxygen and carbon in the hydrodynamically escaping atmosphere of the extrasolar planet HD 209458b // *The Astrophysical J. Letters*. 2004. V. 604. № 1. L69.
- Vidotto A.A., Bourrier V.* Exoplanets as probes of the winds of host stars: the case of the M dwarf GJ 436 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. V. 470. № 4. P. 4026–4033.
- Wargelin B.J., Drake J.J.* Stringent X-ray constraints on mass loss from Proxima Centauri // *The Astrophysical J.* 2002. V. 578. № 1. P. 503–514.
- Wood B.E.* Astrospheres and solar-like stellar winds // *Living Reviews in Solar Physics*. 2004. V. 1. № 1. P. 2.
- Yelle R.V.* Aeronomy of extra-solar giant planets at small orbital distances // *Icarus*. 2004. V. 170. № 1. P. 167–179.