

УДК 524.3–44

АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ПОТЕРЮ АТМОСФЕРЫ ГОРЯЧИМИ ЭКЗОПЛАНЕТАМИ

© 2021 И. С. Саванов^{1*}, В. И. Шематович¹¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

Поступила в редакцию 11 августа 2021 года; после доработки 19 августа 2021 года; принята к публикации 19 августа 2021 года

В обзоре приводятся результаты широкого круга исследований по моделированию атмосфер и оболочек экзопланет и изучению процессов, связанных с активностью родительской звезды, выполняемых в Институте астрономии РАН в последние годы. Разработанные методики анализа супервспышек у звезд солнечного типа применяются к звездам с планетными системами и полученные оценки используются для детализации условий экстремальной звездной активности при исследовании атмосферных потерь для планет земного типа на низких орбитах — суперземель и субнептунов. Представлены результаты расчетов темпа потери атмосферы для экзопланет на близких к родительской звезде орбитах и показано, что в условиях высокого уровня жесткого звездного излучения, а тем более в условиях звездной вспышки, вклад процессов экзотермической фотохимии в образование потока убегающих из атмосферы надтепловых атомов водорода становится существенным и сравнимым с потоком гидродинамического оттока. Соответственно, данный источник надтепловых атомов водорода необходимо включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет. Учет вклада надтепловых частиц в аэрономической модели позволил уточнить скорости нагрева атмосферного газа за счет поглощения жесткого излучения родительской звезды. Это, в свою очередь, дало возможность более точно рассчитать значения темпа потери массы атмосферами и, соответственно, исследовать эволюционные свойства атмосфер горячих экзопланет. Важно также отметить, что представленные в обзоре кинетические и аэрономические модели, разработанные в последние годы в Институте астрономии РАН, будут использованы для анализа и интерпретации имеющихся и ожидаемых наблюдений атмосфер экзопланет земного типа. Такие работы позволят наложить дополнительные ограничения на модели и тем самым сделать их более надежными.

Ключевые слова: *звезды: активность*

1. ВВЕДЕНИЕ

Поиск жизни за пределами Солнечной системы является важной целью в изучении космоса. Быстрое развитие наук об экзопланетах от открытий планет до исследований их характеристик и в особенности обнаружения планет в зонах потенциальной обитаемости соседних звезд подчеркивает своевременность таких усилий. Шансы найти в недалеком будущем жизнь на экзопланетах резко возрастут с появлением больших (класса 30-м) телескопов наземных обсерваторий и 10-м космических телескопов, способных получать прямые изображения экзопланет. Космические телескопы Джеймса Вебба (JWST), который планируется запустить в 2021 г., и «Спектр-УФ» (WSO-UV), запуск которого намечен на 2025 г., предоставят

уникальные возможности характеризовать экзопланеты посредством наблюдений фазовых кривых, вторичных затмений и трансмиссионной спектроскопии транзитов (Batalha et al. 2018). В то же время получение характеристик прямых изображений экзопланет земного типа можно ожидать лишь при помощи специальных космических обсерваторий, таких как LUVOIR или HabEx (см., например, Gaudi et al. (2018)). Наблюдательные данные, полученные с космическим телескопом Кеплер, послужили материалом для многочисленных исследований как планет звездных систем, помимо Солнечной, так и самих звезд, имеющих планетные системы. Благодаря беспрецедентной точности фотометрических наблюдений с космическим телескопом стало возможным определение параметров орбит и свойств планет. Помимо того, фотометрические наблюдения позволяют с высокой точностью установить по периодической переменности блеска

*E-mail: isavanov@inasan.ru

звезды, вызванной ее вращательной модуляцией, наличие и свойства активных областей (пятен) на поверхности звезд, имеющих планетные системы, и таким образом получить характеристики их магнитной активности. Исследование магнитной активности таких звезд дает обширные возможности с одной стороны для проверки разрабатываемых моделей генерации магнитных полей, а с другой — для установления влияния магнитного поля звезды на окружающую ее планетную систему (аналог формирования космической погоды в Солнечной системе).

Первоначально большинство исследований вспышечной активности на основе наблюдений с телескопом Кеплер проводилось для звезд типа Солнца. Так, впервые при анализе таких данных для 148 звезд спектрального типа G были обнаружены (Maehara et al. 2012) 365 супервспышек¹, получены статистические оценки параметров супервспышек для G-карликов и установлено, что распределение возникновения супервспышек как функция их энергии подобно оценкам, полученным для Солнца. Кроме того, в работе Maehara et al. (2012) было найдено, что G-карлики имеют пятна на поверхности, наблюдаемые во вращательной модуляции звездной яркости. В среднем должна быть одна вспышка с энергиями около 10^{33} – 10^{38} эрг в упомянутых звездах (по всей выборке исследуемых объектов) на каждые 800–5000 лет.

В Институте астрономии РАН в последние годы проводится широкий круг исследований по моделированию атмосфер и оболочек экзопланет и изучению процессов, связанных с активностью родительской звезды, в том числе разнообразных явлений, сопутствующих магнитной активности объектов, включая вспышечную и пятенную активности. Мы добиваемся комплексного решения тесно связанных задач изучения звезд с планетными системами, исследования экзопланет и взаимодействия центральной звезды с планетной системой. Ведущиеся исследования позволяют плодотворно работать с материалами существующих (и будущих) наблюдений таких объектов с использованием космических и наземных телескопов, а их результаты в значительной мере улучшают наше понимание процессов образования и эволюции атмосфер экзопланет.

В обзоре приведена краткая информация о результатах наших работ по изучению проявлений активности звезд, имеющих планетные системы, и изучению структуры и эволюции атмосфер планет.

¹ Супервспышками обычно называют вспышки с энергиями 10^{33} – 10^{38} эрг.

Успехи в изучении сотрудниками Института астрономии РАН планетных систем открывают перспективы для дальнейших исследований, включая транзитную спектроскопию, как с помощью космического телескопа им. Хаббла и Космического телескопа Джеймса Уэбба, так и (в перспективе) космической миссии «Спектр-УФ». Планируемые работы предоставят возможность изучения атмосфер планет, которые, вероятно, все еще находятся в процессе своей эволюции. Рассмотренные системы могут сыграть важную роль в нашем понимании эволюции планетных систем в течение первого миллиарда (и даже нескольких сотен миллионов) лет после их образования.

2. АКТИВНОСТЬ ЗВЕЗД С ПЛАНЕТНЫМИ СИСТЕМАМИ

2.1. Проявления звездной активности

Свойства локальной окружающей среды экзопланеты во многом определяются ее родительской звездой. Отсюда следует такая хорошо известная характеристика как равновесная температура экзопланеты, в свою очередь определяющая зону потенциальной обитаемости планетной системы. Как известно, звезды холоднее Солнца имеют повышенную активность в сравнении с подобными Солнцу звездами, что выражается в увеличенной вспышечной и пятенной активности, в корональных выбросах массы (СМЕ), высоких потоках излучения в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, в повышенном магнетизме. Такие свойства повышенной активности как правило ослабевают с увеличением возраста звезды и замедлением скорости ее вращения. Все указанные выше эффекты имеют несомненное влияние на образование планет и их потенциальную обитаемость. Звездные вспышки связаны с повышенным уровнем УФ-излучения, а потоки заряженных частиц — с повышенным уровнем СМЕ, что в итоге может приводить к сжатию планетной магнитосферы и росту скорости эрозии атмосферы. УФ-поток от вспышки или фоновое излучение звезд могут повлиять на нагрев и химический состав атмосферы. Звездная активность также потенциально влияет на атмосферные биомаркеры и в некоторых экстремальных случаях может привести к разрушению в атмосфере озонового слоя, являющегося важным элементом защиты планеты от жесткой радиации. Планетная магнитосфера важна для защиты планеты от потенциальной эрозии атмосферы за счет заряженных частиц с высокими энергиями из звездного ветра. Размер магнитосферы планеты в значительной степени зависит от положения родительской звезды и, в частности, от ее звездного ветра и магнитных полей.

Широкий круг исследований вспышечной и пятенной активности звезд с планетными системами может быть выполнен на основе высокоточных фотометрических наблюдений, полученных с космическим телескопом Кеплер, миссиями TESS (Транзитный Спутник Наблюдения Экзопланет, the Transiting Exoplanet Survey Satellite) и GAIA. При оценке потенциальной обитаемости планет должен учитываться тип родительской звезды. В то время как радиационно-конвективные или более продвинутые модели позволяют предположить, что некая освещенность планеты подходит для поддержания на ее поверхности жидкой воды, другие факторы, которые влияют на обитаемость планеты, сильно зависят от звездной массы. Наиболее общим ограничением в этом случае является время жизни звезды, так как в настоящее время распространено предположение о том, что дистанционно обнаруживаемые биосферы, подобные земной, требуют от сотен миллионов до миллиардов лет для своего развития. В нижней части диапазона масс ($0.075\text{--}0.5 M_{\odot}$), М-карлики представляют собой наиболее распространенный и долгоживущий тип звезд в нашей Галактике, но также обладают свойствами, которые создают препятствия для обитаемости. К ним относятся катастрофические воздействия на атмосферы экзопланет ультрафиолетовой (УФ) и потоковой (вспышечной) активности этих звезд, в особенности на ранних стадиях их эволюции вплоть до прибытия на главную последовательность, и влияние приливного нагрева на планетный климат для экзопланет на тесных орбитах. Кроме того, низкий поток (без звездных вспышек) излучения в ближнем ультрафиолетовом (NUV) спектре М-карликов может также резко ограничить скорость пребиотических фотопроцессов, затрудняя возникновение жизни в таких мирах. Несмотря на эти опасения, предположение о возможности существования у карликовых звезд типа М обитаемых планет становится общепринятым.

Нами проводится исследование образования и эволюции атмосфер для планет земного типа, орбиты которых находятся в зонах потенциальной обитаемости родительских звезд FGKM-типов. Конкретными задачами изучения проявлений активности этих объектов являются: (а) оценка свойств пятенной и вспышечной активности звезд с планетными системами по спектральным и фотометрическим наблюдениям, включая высокоточные космические наблюдения с телескопом Кеплер и миссиями TESS и GALEX, (б) оценки вклада рентгеновского и УФ-излучения, вспышек и корональных выбросов массы родительской звезды на начальных стадиях формирования планет и последующего образования планетной атмосферы.

Решается также ряд задач по исследованию магнетизма и связанных с ним явлений для карликов спектральных классов К–М. По результатам наблюдений космического телескопа Кеплер и миссии TESS делаются оценки площадей пятен на поверхности этих звезд и устанавливаются свойства дифференциального вращения звезд. Наблюдательные оценки параметров дифференциального вращения являются исключительно ценными с точки зрения развития теории генерации магнитного поля в условиях возникновения неустойчивостей в дифференциально вращающихся звездах. Мы можем выполнить оценки пятнистости звезд на основе анализа вращательно модулированных кривых блеска, взятых из архива миссий Кеплер и TESS, и рассмотреть их эволюцию. Полученные результаты позволяют нам проанализировать возможные связи между пятнистостью и основными параметрами изучаемых объектов, а также провести сопоставление с запятненностью поверхности других звезд, не имеющих планетные системы. В дополнение к этому мы детально изучаем свойства отдельных уникальных звезд, как ранее нами было сделано для TRAPPIST-1, KOI 877, KOI 896 и др. (Savanov 2011, Savanov and Dmitrienko 2015, Dmitrienko and Savanov 2018).

Солнечные корональные выбросы масс (СМЕ) являются наиболее изученными и с наблюдательной, и с теоретической точек зрения. Характеристики СМЕ изменяются в зависимости от фазы активности солнечного цикла. Изучение звездных СМЕ более затруднено, оно может быть основано на анализе спектральных наблюдений звезд, анализе их вспышечной и пятенной активности, на исследованиях излучения объектов в рентгеновском, FUV-, UV- и радиодиапазонах. Наблюдения, выполненные с космическим телескопом Кеплер и миссией TESS, открыли возможность изучения вспышечной активности и фотометрической переменности блеска для десятков–сотен тысяч объектов.

2.2. Активность молодых звезд с экзопланетами

При анализе данных из архива наблюдений космической миссии Кеплер и ее продолжения K2 стали возможны высокоточные фотометрические исследования активности звезд с планетными системами в молодых скоплениях (возрастом до 1 млрд лет). В таких молодых системах на физические и химические свойства формирующихся планет в значительной мере могут влиять как продолжающийся процесс выпадения планетезималей, так и магнитная активность центральной молодой звезды (выражающаяся в ее избыточном УФ-, рентгеновском излучении, а также в корональных выбросах), которая может изменять физические свойства атмосфер близких планет и даже приводить к

разрушению этих атмосфер. В нашем современном понимании демографии экзопланет в значительной мере преобладают более старые планетные системы (старше 1 млрд. лет), в то время как механизмы формирования и эволюции, ответственные за возникновение планет, быстрее всего изменяются в первые несколько сотен миллионов лет после образования планетных систем. Обзор результатов программы поиска молодых планетных систем был опубликован Rizzuto et al. (2017). Чтобы в полной мере использовать набор данных миссии K2, Rizzuto et al. (2017) провели исследование, названное ими «Поиск «зодиакальных экзопланет во времени» (ZEIT), с целью выявления, характеристики и изучения статистических свойств близлежащих молодых скоплений, областей звездообразования и ассоциаций OB. В ходе анализа были рассмотрены объекты из скоплений Плеяды, Гиады, Ясли и ассоциации Sco—Cen (подгруппа Upper Scorpius). Применение специально разработанной методики позволило выявить новые планетные системы, принадлежащие членам указанных скоплений. Данные таблицы 3 из Rizzuto et al. (2017) послужили основой для формирования списка объектов нашего исследования. По мере доступности данных архива наблюдений миссии TESS список пополняется новыми объектами. Для исследования ранней эволюции планетных систем в рамках сотрудничества TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets (THUME) проводится поиск и определение характеристик молодых транзитных планет в молодых звездных ассоциациях (около 10–20 млн. лет) и в близлежащих молодых движущихся группах (моложе 200 млн. лет). Эта программа является естественным продолжением ZEIT. Результаты наших исследований активности звезд из данного списка опубликованы в ряде статей. Работа Dmitrienko and Savanov (2017) была посвящена изучению M-карлика EPIC 210490365 (K2-25, 2MASS J04130560+1514520), расположенного в скоплении Гиады (650–800 млн. лет). Мы проследили непрерывную эволюцию активных областей на поверхности звезды в течение 70 суток и определили период вращения (1.878 суток). Для 37 наборов наблюдений были построены карты температурных неоднородностей на поверхности K2-25. Площадь полной запятненной поверхности K2-25 (параметр S) в среднем составляет 2.6% от полной видимой поверхности звезды. Получена оценка параметра дифференциального вращения звезды: $\Delta\Omega = 0.0071 \pm 0.002$ рад/сут.

С целью дальнейшего исследования молодых звезд с планетными системами были выбраны звезды EPIC 211901114 в скоплении Ясли и EPIC 205117205 (K2-33 из подгруппы Upper Scorpius ассоциации Sco—Cen (Savanov et al. 2018a)). В итоге были установлены периоды

вращения EPIC 211901114 (8.56 суток) и K2-33 (6.29 суток) и построены карты температурных неоднородностей на поверхности этих звезд. Для K2-33 получена оценка параметра дифференциального вращения $\Delta\Omega = 0.0039$ рад/сут. Занимаемая пятнами площадь поверхности S для EPIC 211901114 составляет около 5%, а в случае K2-33 — в среднем 3.8% от полной видимой поверхности этих звезд. Проведено изучение вспышечной активности EPIC 211901114 и K2-33. В результате анализа для EPIC 211901114 нами было зарегистрировано 32 вспышки, а для K2-33 — семь вспышек. Сделаны оценки частоты и амплитуды этих вспышек, а также определены времена их возгорания и угасания. Получены оценки энергии вспышек: $10^{32.1}–10^{33.4}$ эрг и $10^{32.2}–10^{33.3}$ эрг для EPIC 211901114 и K2-33 соответственно.

В работе Savanov and Dmitrienko (2019) проведено исследование активности пяти молодых звезд, имеющих планетные системы: K2-231, EPIC 219388192, K2-136, Kepler-66 и Kepler-67. Возраст этих объектов был установлен по их принадлежности к скоплениям. Мы представили заключения о характере изменений блеска изучаемых звезд, и, кроме того, нашли или уточнили периоды их вращения, которые лежат в интервале 9–15 суток. Для Kepler-66 и Kepler-67 были получены оценки параметра дифференциального вращения, по фотометрическим данным построены карты температурных неоднородностей на поверхности пяти изученных звезд и сделано заключение о характере эволюции изменений положений активных областей. При этом были определены величины параметра S , который составляет примерно 0.7% от площади их полной видимой поверхности. Мы изучили положение объектов на диаграммах « S –возраст», « S –период вращения» и « S –числа Россби» и сделали вывод о его соответствии общему характеру зависимостей, установленных нами ранее для 1570 M-карликов.

На основе доступного материала из архива космического телескопа Кеплер мы исследовали активность звезд с планетными системами EPIC 211916756 и EPIC 211964830 (Savanov and Dmitrienko 2020b). Оба объекта принадлежат к молодому скоплению Ясли возрастном 650–800 млн. лет (Savanov et al. 2018b, Savanov and Dmitrienko 2020b). Найденны величины периодов вращения звезд: $P = 21.2$ суток для EPIC 211964830 и $P = 23.9$ суток для EPIC 211964830. По оценкам амплитуд переменности блеска R_{var} этих объектов мы получили значения параметров запятненности (относительного параметра S и абсолютного A). Две звезды с планетными системами имеют несколько более высокие значения параметров запятненности, чем

средние величины S и A для остальных объектов с сопоставимыми температурами (Savanov et al. 2018b), но находящиеся в рамках погрешностей определения этих величин, подтверждая вывод об одинаковой магнитной активности звезд с экзопланетами и звезд без планетных систем.

Космическая миссия TESS предоставляет уникальную возможность для исследования фотометрической переменности блеска звезд (в том числе с планетными системами) в молодых движущихся группах (YMG). YMG являются динамически несвязанными ассоциациями звезд, которые идентифицированы на основе их общего движения. Возраст YMG достигает 300 млн. лет и исследование их позволяет изучать объекты в непрерывном диапазоне возрастов в отличие от анализа молодых звездных скоплений. По плотности звезд YMG также отличаются от высокоплотных звездных скоплений, таких как Ясли или Плеяды. Кластеры YMG менее компактны, и поэтому звездные динамические взаимодействия в них встречаются реже. Как следствие их свойства могут быть более характерными для предшественников экзопланетных систем, вращающихся вокруг типичных звезд поля. Динамические исследования показывают, что звездные взаимодействия в открытых скоплениях вряд ли разрушают планетные системы, но более мягкие воздействия, такие как изменения эксцентриситета планетных орбит, вполне возможны. Наконец, большинство известных YMG находятся значительно ближе, чем звездные скопления, что обеспечивает дополнительные преимущества для определения детальных характеристик экзопланетных систем в них с помощью таких методов, как транзитная спектроскопия и измерения лучевой скорости. Savanov and Dmitrienko (2020a) исследовали звезду DS Tuc, члена YMG Tuc–Nog с близкой экзопланетой с радиусом между радиусами Нептуна и Сатурна. По нашей оценке, период вращения звезды равен 2.85 суток. Методом решения обратной задачи восстановления карт поверхностных температурных неоднородностей проведен детальный анализ кривой блеска. На поверхностных картах имеются концентрации пятен на двух долготах. Положения и размеры пятен претерпевают изменения и временами нестабильны. Доля запятненной поверхности звезды S составляет примерно 3.3%. По наблюдениям All Sky Automated Survey впервые получена оценка возможного цикла активности DS Tuc в 1610 суток (4.4 года).

На основе высокоточных данных из архива космической миссии TESS Savanov (2021a) провел исследование фотометрической переменности карлика спектрального класса K1 AB Pic (HD 44627), имеющего удаленную планету-гиганта с массой 13.5 масс Юпитера, также члена

Tuc–Nog-ассоциации. За время наблюдений с миссией TESS на звезде было зарегистрировано 48 вспышек с энергией 6.1×10^{32} – 3.4×10^{35} эрг. Выполнены оценки периода вращения звезды $P = 3.860 \pm 0.020$ суток, амплитуды переменности блеска и параметра запятненности. Площадь пятен на поверхности AB Pic существенно превосходит площадь пятен на Солнце. Высказано предположение о том, что в течение интервала наблюдений площадь пятен на поверхности звезды испытывала циклические изменения длительностью 233 суток, аналогом которых может быть цикл Ригера на Солнце. Оценки более длительных циклов активности AB Pic указали на возможные циклы активности в 3.1 года и 7.2 года (рис. 1).

Savanov (2021b) изучил фотометрическую переменность еще двух молодых аналогов Солнца, имеющих планетные системы — HD 63433 (TOI 1726), члена движущейся группы звезд Ursa Major возрастом 410 млн. лет, и TOI 451 (CD-38 1467) из звездного потока Рыбы–Эридан (Psc–Eri) возрастом 120 млн. лет. По всем доступным наблюдениям были выполнены оценки периодов вращения звезд и амплитуд переменности блеска, а также оценки величины параметра запятненности A в абсолютной мере. Площадь пятен на поверхности HD 63433 и TOI 451 существенно превосходит площадь пятен на Солнце и составляет 24 500 м.д.п. (миллионных долей площади видимой поверхности Солнца) и 12 600–33 200 м.д.п. соответственно. Оценки величин циклов активности TOI 451 были проведены по данным из архива наблюдений обзора All Sky Automated Survey и указали на возможные циклы активности в 125 и 1280 суток. Данные для HD 63433 свидетельствуют о наличии долговременных изменений блеска, но их недостаточно для количественных оценок (рис. 2). Полученные результаты были сопоставлены с данными об изученных нами ранее звездах солнечного типа с планетными системами DS Tuc и AB Pic из молодой ассоциации Tuc–Nog.

2.3. Пятна на звездах с экзопланетами

Savanov (2021c) выполнил сравнительный анализ фотометрических наблюдений звезд с помощью миссии Кеплер и ее продолжения K2. Оценка сопоставимости данных была проведена косвенным методом на базе вычисленных нами значений параметра запятненности звездной поверхности S , которые определялись по амплитудам переменности блеска объектов R_{var} по наблюдениям основной миссии и K2. Было показано, что рассмотренные данные образуют единый массив, который может быть использован в дальнейших исследованиях. Автором были сделаны заключения об изменениях активности у звезд с различными температурами и

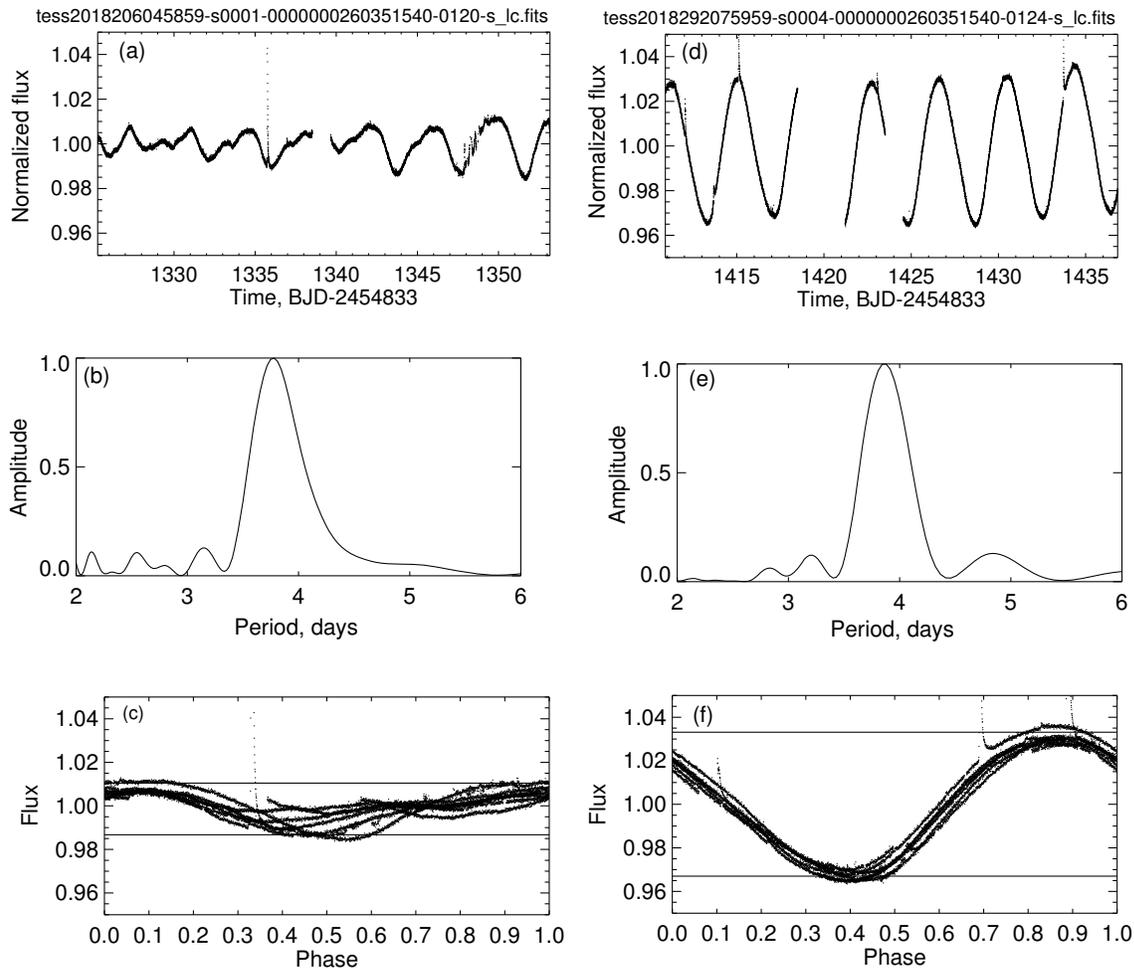


Рис. 1. (a), (d) — кривая блеска для AB Pic; (b), (e) — спектр мощности переменности блеска; (c), (f) — фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторах 1 и 4.

о том, как активность связана с вращением. Вывод о том, что рассматриваемые данные образуют единый массив, позволил провести обобщенный анализ двух независимых выборок звезд с планетными системами. На основе данных Mayo et al. (2018) и McQuillan et al. (2013) для звезд с планетными системами Savanov and Dmitrienko (2020c) сопоставили величины параметров, характеризующих площадь пятен (в относительных единицах S и абсолютных A (в миллионных долях площади поверхности Солнца)) с эффективной температурой и с периодами вращения объектов (рис. 3). По разработанной нами ранее методике переопределены величины S для звезд, изученных McQuillan et al. (2013), и найдены параметры запятненности для 67 звезд из работы Mayo et al. (2018). Сделаны заключения об изменениях активности у этих звезд с различными температурами и о связи активности с вращением. Показано, что площади пятен на поверхности звезд с экзопланетами существенно

превосходят площади самых больших групп пятен на Солнце и находятся в пределах от 8000 м.д.п. до 60000 м.д.п. Имеется хорошее согласие результатов, полученных по данным выборок Mayo et al. (2018) и McQuillan et al. (2013). Используя оценку радиусов звезд (данные архива телескопа Кеплер), мы определили величины A площади пятен на поверхности звезд в миллионных долях видимой полусферы Солнца. Найдено хорошее согласие оценок характеристик пятен на поверхности звезд с экзопланетами по данным наблюдений основной миссии Кеплер и ее продолжения K2. Из нашего списка, содержащего более 700 объектов с планетными системами, для дальнейшего рассмотрения были отобраны 76 звезд с эффективными температурами, отличающимися от T_{eff} Солнца на 100 К. Было сделано заключение об уменьшении активности объектов, периоды вращения которых превышают 10–12 суток. Из рассмотрения соотношения запятненности объектов A и их возраста t

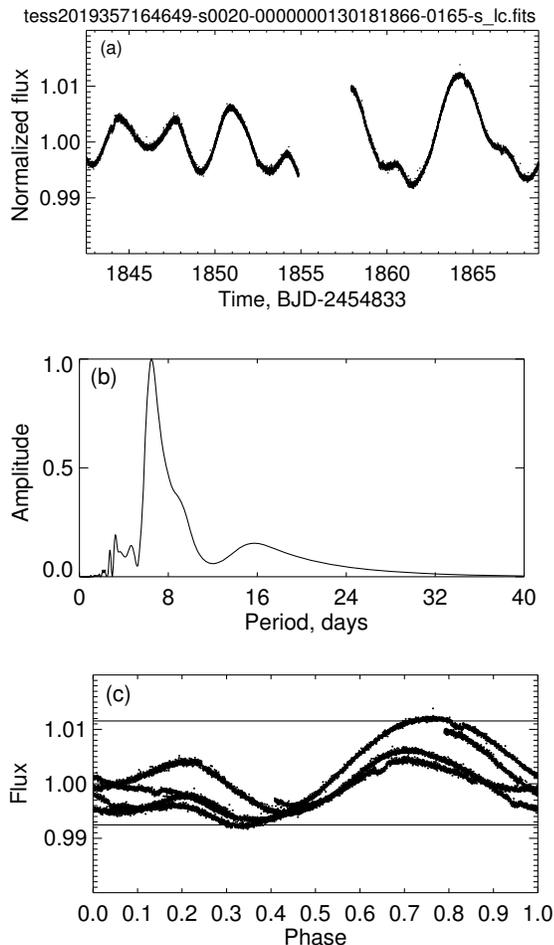


Рис. 2. (a) — кривая блеска для HD 63433, (b) — спектр мощности переменности блеска, (c) — фазовая диаграмма переменности блеска (горизонтальные линии характеризуют величину амплитуды переменности блеска). Данные приведены для наблюдений в секторе 20.

(установленного по гирохронологическому соотношению) сделан вывод о том, что звезды возрастом менее 1 млрд. лет являются самыми активными. Для одного сета наблюдений (Q3) миссии Кеплер выполнен предварительный анализ фотометрических данных девяти объектов, имеющих наибольшие значения параметра запятненности A (более 10 000 м.д.п). Отмечены переменность их кривых блеска на временах, сопоставимых с периодами вращения, и заметная амплитуда переменности, указывающая на повышенную площадь пятен на поверхности.

2.4. Звездные вспышки

Наблюдения с космическим телескопом Кеплер открыли совершенно новые возможности в области исследования вспышечной активности звезд спектральных классов G–M благодаря высокой

чувствительности и точности, непрерывности наблюдений с достаточно высоким временным разрешением для анализа вспышек и возможностью исследования десятков тысяч объектов. Например, Davenport et al. (2014), используя данные телескопа Кеплер за 11 месяцев, собрали самую большую выборку вспышек для отдельной звезды (кроме Солнца), а именно для холодного карлика GJ 1243, пятенная активность и уникальность которого были нами отмечены еще в 2011 г. (Savonov and Dmitrienko 2011). Эта однородная выборка послужила основой для разработки эмпирического шаблона для определения морфологии одиночных вспышек (см. Davenport et al. (2014)).

Один из первых однородных поисков звездных вспышек был осуществлен Davenport (2016), который использовал все доступные на то время кривые блеска из архива телескопа Кеплер LC² DR24 и разработал автоматизированные методы обнаружения вспышек и оценки их энергий. Окончательная выборка содержит 851 168 событий — вспышек, которые были найдены у 4041 звезды, что составляет около 2% звезд в базе данных архива. Каталог открыл возможность проведения статистических исследований свойств вспышечной активности. Например, было показано, что средняя обнаруженная энергия вспышки составляет порядка 10^{35} эрг; доля вспыхивающих звезд увеличивается с уменьшением массы звезды. Наконец, для звезд этой выборки с ранее измеренными периодами вращения стало возможным изучение зависимости энергии вспышек от чисел Россби.

Особого упоминания заслуживает каталог вспышек, зарегистрированных миссией Кеплер, опубликованный Yang and Liu (2019). Он включает сведения о 162 262 вспышках для 3420 звезд. Тщательный анализ, проведенный авторами каталога, показал, что, к сожалению, каталоги вспышек ряда предыдущих исследований серьезно отягощены различными ложными сигналами и артефактами. Авторы показали, что частота вспышек звезд возрастает с уменьшением температуры, что согласуется с теоретическими представлениями. Распределение частот вспышек (Flare Frequency Distribution, FFD) от звезд F-типа до звезд M-типа подчиняется степенному соотношению с $\alpha \sim 2$, что указывает на одинаковый для всех звезд механизм генерации вспышек. Установлено, что около 70% звезд со вспышками имеют период вращения менее 10 суток. Получена оценка того, что супервспышка с энергией порядка 10^{34} эрг может происходить на Солнце по крайней мере один раз в 5500 лет.

²LC — Long Cadence — длинная каденция.

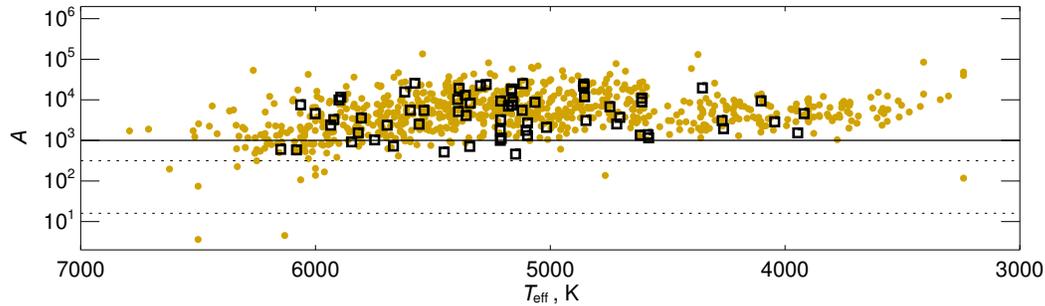


Рис. 3. Зависимость площади пятен A на поверхности звезд с экзопланетами, выраженной в долях видимой полусферы Солнца (миллионные доли, м.д.п.), от эффективной температуры. Светлые кружки — данные McQuillan et al. (2013), темные квадраты — Mayo et al. (2018). Штриховые линии соответствуют максимумам бимодального распределения параметра A для Солнца, а максимальное солнечное значение параметра A представлено сплошной линией.

Yang and Liu (2019) выполнили анализ достоверности и полноты данных своего каталога, сравнивая его с предыдущими исследованиями. Однако существуют лишь несколько исследований вспышек, в которых использован весь набор данных миссии Кеплер, при этом отсутствие конкретной информации о каждом событии вспышки увеличивает сложность сравнения. Davenport (2016) искал вспышки по данным LC DR24 с помощью полностью автоматизированных процедур. Он включил в свой каталог 4041 вспыхивающую звезду без подробной информации о каждом событии вспышки. Совпадения двух каталогов составляют всего 396 объектов, что означает, что 3645 звезд каталога Davenport (2016) отсутствуют в выборке Yang and Liu (2019). На самом деле каталог Davenport (2016) включает различные пульсирующие звезды, быстро вращающиеся звезды и звезды с транзитной активностью. Эти события были интерпретированы как вспышки, являясь ложными сигналами. С другой стороны, столь драматические различия в данных каталога вызваны также критериями отбора объектов, поскольку Davenport (2016) рассматривал лишь звезды с более чем 100 зарегистрированными вспышками.

Van Doorselaere et al. (2017) использовали для поиска вспышек данные в длинной каденции (LC) только из сета наблюдений Q15. В общей сложности авторы обнаружили 16 850 вспышек на 6662 звездах. Данные LC за сет Q15 имеют 3028 вспыхивающих звезд выборки (Yang and Liu 2019). Общими являются 2223 объекта, 4439 звезд остаются вне выборки (Yang and Liu 2019). Форма большинства кривых блеска последних из упомянутых объектов искажена по той же причине, о которой говорилось выше. В приложении к каталогу Yang and Liu (2019) представлены типичные случаи подробного сравнения данных для 805 объектов. Можно заключить, что даже для данных высокой фотометрической точности архива телескопа Кеплер остаются большие возможности

дальнейших исследований, связанных с совершенствованием процедур автоматизированного выделения вспышек и измерения их параметров, выработкой критериев поиска вспышек, исключения артефактов и проч.

Одним из удивительнейших открытий, сделанных на основе данных космического телескопа Кеплер, является обнаружение звездных супервспышек в диапазоне 10^{33} – 10^{38} эрг. Энергия супервспышки столь высока, что она, несомненно, может драматически влиять на атмосферы близлежащих экзопланет. Результаты широкого круга исследований, затрагивающих вопросы свойств вспышек у быстровращающихся и медленно вращающихся звезд, связи площади пятен на звездах с энергиями вспышек, возможности супервспышки у Солнца и проч. можно найти в сериях статей Н. Maehara, Y. Notsu, N. Shibayama.

Для того чтобы оценить влияние вспышечной активности на происхождение и эволюцию экзопланет, многие группы исследователей приступили к анализу частоты и амплитуд вспышек для звезд с планетными системами. Например, чтобы охарактеризовать свойства окружающей планету среды, Armstrong et al. (2016) по наблюдениям с космическим телескопом Кеплер выполнили исследование вспышек для десятка звезд, у которых есть планеты вблизи их обитаемых зон. Авторы провели детальное изучение кривых блеска максимальной продолжительности наблюдений с космическим телескопом и установили периоды вращения, фотометрические индексы активности, энергии вспышек, скорости потери массы вещества, светимости в рентгеновском диапазоне и возраст звезд с планетами, похожими на Землю, а также оценили влияние их активности на планетные магнитосферы. Рассмотрен случай наличия супервспышек у звезды Kepler-438 с планетой с высоким индексом подобия Земле.

Основная цель космической миссии TESS состоит в обнаружении планет вокруг ярких близ-

лежащих звезд, для того чтобы обеспечить возможность дальнейших наземных и космических наблюдений. Миссия TESS обладает тремя преимуществами для изучения звездных вспышек. Во-первых, звезды, наблюдаемые TESS, достаточно яркие, что позволяет достичь высокого отношения S/N . Во-вторых, двухминутная каденция дает возможность изучать такие свойства вспышки, как продолжительность и энергия. Кроме того, для получения более достоверных параметров звезд входной каталог TESS (TIC) использовал данные других космических и наземных проектов, таких как Gaia DR1 и DR2 и LAMOST DR1 и DR3.

Tu et al. (2020) представили исследование супервспышек у звезд солнечного типа с использованием данных TESS. Наблюдения в течение первого года миссии TESS выполнялись в тридцати секторах и охватили южное полушарие неба, где обнаружено 25 000 звезд солнечного типа (по данным каталога TESS). С помощью программы автоматического поиска и последующего визуального контроля по данным наблюдений с двухминутным накоплением Tu et al. (2020) обнаружили 1216 супервспышек у 400 звезд солнечного типа. Получено свидетельство о более высокой частоте супервспышек по сравнению с результатами анализа данных телескопа Кеплер. Это может быть эффектом наблюдательной селекции и связано с тем, что большинство звезд солнечного типа в рассмотренном наборе данных TESS является быстровращающимися звездами. Степенной индекс γ распределения частоты супервспышек ($dN/dE \propto E^{-\gamma}$) оказывается равным $\gamma = 2.16 \pm 0.10$, что немного больше, чем у солнечных вспышек, но согласуется с результатами по данным телескопа Кеплер. Поскольку всего четыре звезды из изученных, возможно, имеют планетные системы, напрашивается предположение, что супервспышки, скорее всего, могут быть вызваны особенностями магнитной активности звезд, а не взаимодействием планет и звезд. Обнаружена и исследована уникальная звезда TIC 43472154, у которой наблюдалось около 200 супервспышек в год. Кроме того, авторы исследования проанализировали корреляцию между энергией и длительностью сверхсветовых вспышек (длительность $T \propto E^\beta$). Получена величина степенного индекса $\beta = 0.42 \pm 0.01$, что немного больше, чем теоретически предсказанная $\beta = 1/3$.

Во второй части своего исследования Tu et al. (2021) провели анализ данных второго года работы миссии TESS и представили результаты анализа 1272 супервспышек у 311 звезд солнечного типа по общим данным для 22539 объектов. В рассматриваемой выборке планетные системы есть у трех звезд. Имеется согласие между полученными авторами и установленными ранее величинами статистических распределений β и γ . Кроме

того, были сделаны оценки амплитуд переменности блеска R_{var} и высказано предположение о том, что $E \propto R_{\text{var}}^{3/2}$. Для 7454 звезд солнечного типа соответствующий индикатор хромосферной активности (S -index) был получен по данным Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope (LAMOST). Авторы еще одного исследования (Doyle et al. 2020) представили результаты независимого статистического анализа вспышек звезд солнечного типа по наблюдениям в секторах 1–13. Для всех объектов были установлены периоды вращения, идентифицированы 1980 вспышек для 209 звезд с энергиями в диапазоне 10^{31} – 10^{36} эрг, был выполнен анализ свойств вспышек. Исследована зависимость частоты вспышек от фазы вращения звезды и сделан вывод о том, что в рассматриваемой выборке данных вспышки имеют случайное распределение по фазе. Проведено сопоставление площадей пятен на поверхности звезд с числом вспышек и их энергией. В рассматриваемой выборке из 209 звезд только у одного объекта — AB Pic (HD 44627, TIC 260351540) — есть планета, которая находится на достаточно большом расстоянии ($a = 275$ а.е.) с массой в 13.5 масс Юпитера (см. раздел 2.2).

2.5. Корональные выбросы массы

Активность Солнца, связанная с корональными выбросами массы (СМЕ), является важным фактором, влияющим на магнитосферы, атмосферы и поверхности планет Солнечной системы. Исходя из идеи солнечно-звездной аналогии, явления СМЕ можно ожидать и на других звездах. Основными факторами воздействия звездных СМЕ на экзопланеты являются ударные волны, сопутствующие им возмущения плотности, скорости и магнитного поля звездного ветра, ускорение и удержание энергичных заряженных частиц. Все эти факторы должны быть учтены при изучении эволюционных процессов на экзопланетах и в их атмосферных и плазменных средах. Влияние звездной активности СМЕ может варьироваться в зависимости от возраста звезды, ее спектрального типа и орбитального расстояния планеты (см. обсуждение большинства вопросов, например, в Schrijver et al. (2019)). Солнечные СМЕ являются наиболее изученными и с наблюдательной, и с теоретической точек зрения (см. обзор Kilpua et al. (2017)). Их основные характеристики таковы: частота от 0.5 до 6 СМЕ в сутки, характерные скорости 250 – 500 км с⁻¹ (вплоть до тысячи км с⁻¹), масса 10^{14} – 10^{16} г. Указанные величины изменяются в зависимости от фазы активности солнечного цикла. При изучении звездных СМЕ (их масс, скоростей, частоты появления) трудностей больше. Такая работа

может проводиться на основе анализа спектральных наблюдений звезд, их вспышечной и пятенной активности, на исследовании излучения объектов в рентгеновском, FUV-, UV- и радиодиапазонах.

Благодаря наблюдениям, выполненным с космическим телескопом Кеплер и миссией TESS, стало возможным изучение вспышечной активности и фотометрической переменности блеска, вызванной вращательной модуляцией запятенной поверхности, десятков тысяч объектов. В каталоге вспышек звезд Günther et al. (2020) на базе первого релиза архива миссии TESS были определены массы СМЕ. Оценить свойства СМЕ можно с помощью эмпирической зависимости, связывающей энергию вспышки с массой СМЕ (Agnio et al. 2012). Эта зависимость была установлена по данным для Солнца, но затем калибрована с использованием набора хорошо изученных активных звезд на стадии эволюции до главной последовательности. Зависимость может быть применима к объектам с энергией вспышек до 10^{38} эрг, что соответствует массе СМЕ до 10^{22} г. Отметим, что зависимость из работы Agnio et al. (2012) была установлена по измерениям энергии вспышек в рентгеновском диапазоне спектра, поэтому, аналогично Günther et al. (2020), часто используется скорректированное соотношение, в котором рассматривается болометрическая энергия вспышки. Данный метод имеет ограничения, вызванные прежде всего принципиальным распространением солнечной аналогии на звезды других спектральных классов. Применение зависимости к данным наблюдений 763 объектов по первым наблюдениям миссии TESS привело к выводу о том, что для них характерная величина массы СМЕ составляет 10^{19} г (медианное значение), диапазон изменений — от 10^{18} до 10^{32} г для наиболее массивного СМЕ.

Savanov (2020b) рассмотрел результаты исследования Yang and Liu (2019), содержащего сведения о 162 262 вспышках для 3420 звезд. По методике, представленной Günther et al. (2020) и упомянутой выше, на основе данных о средних энергиях вспышек было установлено, что для 3020 объектов из Yang and Liu (2019) диапазон изменений масс СМЕ составляет 10^{19} – 10^{22} г, при этом по мере перехода к более горячим (более массивным) звездам наблюдается рост массы СМЕ. Звезды солнечного типа, согласно оценке, основанной на использовании энергии вспышек, должны обладать СМЕ с массами от 3×10^{20} г до 10^{21} г, что существенно выше, чем наблюдается у Солнца. Возможно, это обусловлено эффектами наблюдательной селекции: наблюдения с телескопом Кеплер проводились для звезд с более высокой

вспышечной и пятенной активностью. Как указывалось в разделе 2.4, Van Doorselaere et al. (2017) на основе данных наблюдений телескопа Кеплер, выполненных только в моде LC seta Q15, провели исследования вспышечной активности 6662 звезд, для которых в общей сложности было зарегистрировано 16 850 вспышек. По этим данным были определены массы СМЕ для всех вспышек всех объектов. Было найдено, что для звезд с T_{eff} в диапазоне от 3500 до 6000 К массы СМЕ лежат в пределах от 10^{20} до 10^{21} г. Амплитуда изменений величин $\lg M$ для звезд солнечного типа составляет 19.5–21.3. В предположении о применимости калибровки из Agnio et al. (2012) в целом можно заключить, что оба каталога указывают на характерный диапазон изменений масс СМЕ от $10^{19.5}$ до $10^{21.5}$ г.

Кроме того, существует независимый метод оценки характеристик СМЕ по спектральным наблюдениям. Он основан на изучении абсорбционных и эмиссионных деталей профилей бальмеровских линий видимого и УФ спектральных диапазонов у звезд как солнечного типа, так и более холодных (см. серии публикаций, перечисленных в Vida et al. (2019) и Leitzinger et al. (2020)). Детальное обсуждение достигнутых результатов для карликов спектрального класса М приводятся Vida et al. (2019), а для звезд солнечного типа — Leitzinger et al. (2020). Исследования последних трех десятилетий, как правило, содержали результаты анализа одной или нескольких звезд и лишь нескольких событий (обзор литературы можно найти у Leitzinger et al. (2020)). Одно из первых обширных исследований было выполнено Fuhrmeister et al. (2018), которые рассмотрели 473 спектра, полученные для 28 М-карликов. Vida et al. (2019) изучили 5500 спектров М-карликов и установили, что для 25 звезд имеются асимметрии профилей бальмеровских линий водорода. Для этих объектов частота появления зарегистрированных событий находится в пределах от 1.2 до 19.6 событий в сутки. Измеренные по доплеровскому смещению скорости СМЕ соответствуют величинам 100–300 км с⁻¹. Получено, что массы СМЕ составляют 10^{15} – 10^{18} г. Имеются указания на более частую встречаемость событий у более холодных звезд с более высокой хромосферной активностью. Ценность метода определения характеристик СМЕ по спектральным наблюдениям состоит в том, что он дает возможность найти как кинематические характеристики, так и оценку частоты появления событий.

Leitzinger et al. (2020) из анализа спектров видимого диапазона 425 F–K-карликов, полученных в ходе 3700 часов наблюдательных программ, зарегистрировали лишь несколько вспышек и сделали вывод о малом числе проявлений СМЕ. Эти

авторы пришли к выводу, что столь низкий уровень обнаруженной активности исследованных объектов обусловлен двумя причинами: не только самой низкой активностью, но и наблюдательными ограничениями, вызванными недостаточной продолжительностью наблюдений. Leitzinger et al. (2020) также обсуждают возможность того, что области излучения в линии $H\alpha$ были слишком малы для регистрации в проведенных наблюдениях. При достигнутых отношениях S/N , по оценке Leitzinger et al. (2020), могли бы быть обнаружены СМЕ солнечного типа с массой 10^{16} – 10^{17} г и выше. Исследование Leitzinger et al. (2020) было основано на использовании архивных данных; для обнаружения СМЕ меньших масс нужны целенаправленные наблюдения достаточной продолжительности.

Наконец, исходя из аналогии солнечных СМЕ, Savanov (2020a) модернизировал зависимость из работы Cranmer (2017), связывающую число пятен (усредненное по месяцам) для Солнца с массой СМЕ так, чтобы она допускала использование суммарной площади звездных пятен. Это позволило по оценкам параметра запятненности для 34 тысяч звезд (рис. 4а), полученным по кривым блеска этих объектов из архива космического телескопа Кеплер, выполнить оценки вероятных масс их СМЕ (рис. 4б).

Следует признать, что оценки масс СМЕ, найденные по эмпирическим зависимостям для энергий вспышек, превосходят по величине данные о массах СМЕ, полученные по асимметрии профилей бальмеровских линий водорода. Согласно Vida et al. (2016), результаты для одного и того же объекта могут различаться. Исследование Vida et al. (2016) является примером того, как для одного объекта при изучении вспышечной активности и профилей бальмеровских линий водорода можно получить оценки масс СМЕ различными способами и сопоставить между собой. Исследования такого характера, распространенные на другие звезды спектральных классов G–M, крайне необходимы в будущем. Тем не менее несомненно, что развитые методы могут найти применение при оценке параметров СМЕ звезд с экзопланетами и позволят изучить эволюцию атмосфер экзопланет при воздействии внешних факторов.

3. ВЛИЯНИЕ ЗВЕЗДНОЙ АКТИВНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ И ЭВОЛЮЦИЮ АТМОСФЕР ЭКЗОПЛАНЕТ

В настоящее время происходит переход от эпохи открытий экзопланет и исследования их демографии к эпохе детальной характеристики атмосфер экзопланет и их поверхностей. В транзитных наблюдениях и измерениях радиальных скоростей

звезд подтверждено существование тысяч экзопланет (Batalha 2014, Morton et al. 2016), причем несколько десятков экзопланет находятся в зонах потенциальной обитаемости (ЗПО) их родительских звезд (Kane et al. 2016). Планеты с массами и радиусами, соответствующими скалистому составу, и, возможно, окруженные вторичными за счет вулканических извержений атмосферами, были обнаружены в близлежащих звездных системах, наиболее известными примерами которых являются недавно открытые экзопланеты, такие как Proxima Centauri b (Anglada-Escudé et al. 2016), TRAPPIST-1 e, f и g (Gillon et al. 2017) и LHS 1140b (Dittmann et al. 2017). После более чем пяти десятилетий космических исследований и накопления данных различными космическими аппаратами был разработан целый ряд вероятных гипотез для ответа на вопрос, почему Венера и Марс эволюционировали так по-разному по сравнению с Землей. Земля уникальна в том смысле, что она имеет атмосферу с преобладанием азота, сохранила свои водные океаны, на ней имеются континенты и планета проявляет геофизическую активность с момента своего образования (Sproß et al. 2021). Благодаря этим условиям приблизительно 3.5–3.8 млрд. лет назад простые микробные и более поздние сложные многоклеточные формы жизни смогли возникнуть и заселить гидросферу, подповерхностные слои и поверхность планеты. До сих пор Земля является единственным примером известной нам среды обитания, где возникло и существует такое большое разнообразие форм жизни. Один важный фактор в этой космической загадке, касающейся эволюции Земли и формирования на ней среды обитания, где смогли развиваться высшие формы жизни, связан с тем, что планета вращается вокруг Солнца, которое является звездой типа GV2, в так называемой зоне потенциальной обитаемости (ЗПО). Классическая концепция звездной зоны обитаемости представляет собой сферическую оболочку вокруг звезды главной последовательности, где есть каменистая планета, окруженная атмосферой, на которой может существовать вода в жидком состоянии в заданный момент времени (Kasting et al. 1993). Размер и расположение этой области зависят от звездной светимости, которая эволюционирует за время жизни звезды и, соответственно, ЗПО располагается ближе к родительской звезде, если звезда является более холодной (M- и K-типы) по сравнению со звездами G-типа, и дальше, если звезда более горячая (F-тип) (Corrigan et al. 2013; 2014). По мере распространения методов сравнительной планетологии, развитых для планет Солнечной системы, на внесолнечные планетные системы стало ясно, что классическая концепция обитаемой зоны и связанные с ней вопросы о том, что делает пла-

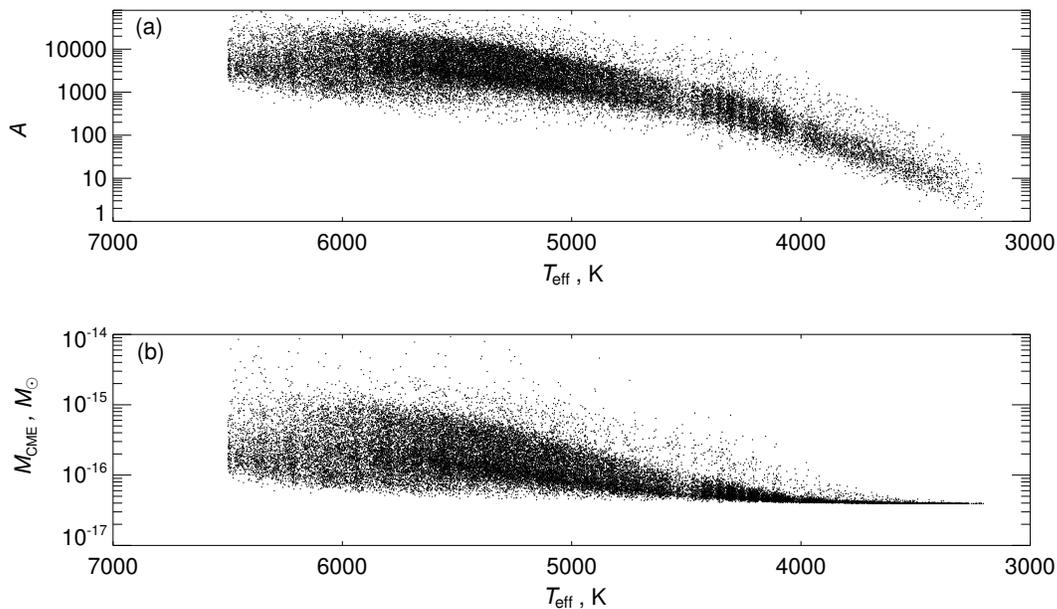


Рис. 4. Зависимости площади пятен A на поверхности звезд (выраженной в миллионных долях видимой полусферы Солнца, м.д.п.) (а) и массы СМЕ (в долях массы Солнца) (б) от эффективной температуры звезд.

нету пригодной для жизни, намного сложнее, чем наличие большого каменистого тела, расположенного на подходящем расстоянии от родительской звезды (Коррагару et al. 2013; 2014). Поскольку классическая концепция обитаемой зоны на самом деле не указывает, может ли жизнь развиваться на планете земного типа, возникла необходимость новой классификации потенциальных мест обитания (Lammer et al. 2009a). В соответствии с этой новой классификацией были определены четыре потенциальных класса среды обитания (Lammer 2013), которые представляют собой: (а) планетарные тела, которым звездные и геофизические условия позволяют эволюционировать в планету земного типа так, что сложные многоклеточные формы жизни могут возникнуть и обитать в гидросфере, на поверхности и в подповерхностных слоях планеты; (б) тела, на которых может возникнуть жизнь, но из-за астрофизических и геофизических условий эти планеты эволюционируют в пределах их обитаемых зон скорее по направлению к мирам, подобным Венере или Марсу, где сложные многоклеточные формы жизни могут и не появиться; (с) планетные тела, в которых под ледяной поверхностью находятся водные океаны, взаимодействующие непосредственно с обогащенными силикатами ядрами; (д) небесные тела, на которых имеются слои жидкой воды между двумя слоями льда или надо льдом. Однако по мере изучения экзопланетных систем и открытия экзопланет с низкими плотностями (Lissauer et al. 2013, Luger et al. 2015), стало ясно, что подобные планеты могут представлять собой дополнительный класс среды

обитания. Из соотношения «радиус—масса» планет типа «суперземли» следует ожидать, что у них каменистое ядро, скорее всего, покрыто толстым водным слоем, однако без континентов (Noack et al. 2016). Другими словами, в данный отдельный класс объединены экзопланеты, окруженные огромным слоем воды над каменистым ядром, но без твердой поверхности. Это так называемые планеты-океаны.

При оценке потенциальной обитаемости экзопланет помогает концепция зоны потенциальной обитаемости, определяемой как диапазон расстояний, или кольцевая зона, вокруг звезды, в которой для планеты с заданной атмосферой существует возможность поддержания на поверхности слоя жидкой воды. Это определение позволяет быстро оценить потенциальную пригодность для жизни, если наблюдаемые параметры системы «звезда—планета», такие как большая полуось и звездная светимость, могут быть адекватно оценены. Наиболее распространенное определение ЗПО предполагает наличие N_2 - CO_2 - H_2O -атмосферы с углеродно-кремниевым циклом обратной связи (Kasting et al. 1993, Коррагару et al. 2013; 2014), который действует как планетный термостат, подобно тому, как это происходит на Земле. В этой концепции ЗПО планетная температура в первую очередь контролируется поглощением тепла за счет парникового эффекта газов CO_2 и H_2O и общего планетного альбедо, определяемого массой и составом атмосферы, облачным покровом и его составом, а также альбедо поверхности планеты и звездной температурой. Границы ЗПО в терминах

звездной инсоляции будут изменяться как функция звездного типа, так как распределение спектральной энергии звезд разной температуры дает различные эффективные планетные альбедо даже для планетной атмосферы постоянного состава. Тип родительской звезды (или ее эффективная температура) также должен учитываться при оценке потенциальной обитаемости планет. Наиболее общим ограничением в этой области является время жизни звезды, так как в настоящее время распространено предположение о том, что дистанционно обнаруживаемым биосферам, подобным земной, для развития требуются от сотен миллионов до миллиардов лет. Если время жизни звезды короче, чем это рамочное время, то вряд ли какие-либо планеты, вращающиеся вокруг таких звезд, будут иметь необходимое время для возникновения и поддержания биомаркеров. Это требование сразу исключает звезды главной последовательности, более яркие, чем спектральный тип F, или со звездной массой более $1.4 M_{\odot}$. В нижней части диапазона масс (0.075 – $0.5 M_{\odot}$) звезды M-типа представляют собой наиболее распространенный и долгоживущий тип звезд в нашей Галактике, но также обладают свойствами, которые препятствуют обитаемости их планетных систем. К таким свойствам относятся катастрофические воздействия на атмосферы экзопланет за счет ультрафиолетовой (УФ) и потоковой (вспышечной) активности этих звезд (Davenport et al. 2016, Ribas et al. 2016, Airapetian et al. 2017, Bisikalo et al. 2018) в особенности на ранних стадиях их эволюции вплоть до прибытия на главную последовательность (Luger and Barnes 2015, Tian 2015b) и влияние приливного нагрева на планетный климат для экзопланет на тесных орбитах (Bolmont et al. 2017). Кроме того, низкий поток (без звездных вспышек) излучения в ближнем ультрафиолетовом (NUV) спектре M-карликов может также резко ограничить скорость пребиотических фотопроцессов, создавая препятствие на пути возникновения жизни в этих мирах (Ranjana et al. 2017). Несмотря на эти опасения, имеется предварительный консенсус, позволяющий заключить, что карликовые звезды типа M действительно могут иметь потенциально обитаемые планеты (см. Shields et al. (2016), где приведен недавний тщательный обзор пригодности для жизни планет вокруг звезд M-типа).

3.1. Задачи исследования атмосферных потерь и используемые подходы

Открытие экзопланет, обогащенных водородом и другими летучими веществами, на орбитальных расстояниях менее 1 а.е., привело к постановке фундаментальных вопросов, касающихся структуры и устойчивости относительно диссипации их

верхних атмосфер. Так как более 40% всех открытых экзопланет вращаются вокруг родительских звезд на расстояниях ближе, чем орбита Меркурия, то, соответственно, атмосферы этих небесных тел образуются и изменяются в гораздо более экстремальных условиях по сравнению с условиями, известными для планет в Солнечной системе. Более интенсивное звездное излучение в диапазонах мягкого рентгена и крайнего ультрафиолета³ и поток заряженных частиц на таких близких орбитальных расстояниях вызывают существенные (а в случае экстремальной звездной активности — и катастрофические) изменения структуры верхней атмосферы таких небесных тел — экзопланет на так называемых низких орбитах. При взаимодействии родительской звезды и экзопланеты возможны разные виды взаимодействия между магнитной активностью звезды и планеты, в частности, влияние звезды на эволюцию планетной атмосферы. Так, непрерывное облучение планетной атмосферы протонами с высокими энергиями от звезды приводит к ионизации, разогреву атмосферы и существенному росту скорости ее потери (Penz et al. 2008, Sanz-Forcada et al. 2011, Bisikalo et al. 2013, Ionov et al. 2017). Недавние открытия такого разнообразия планет, отсутствующих в Солнечной системе, полностью изменили наше нынешнее понимание происхождения, образования и эволюции различных классов планет. Сейчас мы находимся в начале новой эры экзопланетной науки. Все поле исследований быстро смещается в сторону обнаружения и характеристики потенциально обитаемых экзопланет вокруг звезд низкой массы (Seager and Bains 2015). Звезды с низкой массой (в особенности M-карлики) составляют около 70% галактической звездной популяции (Bochanski et al. 2010). Обитаемые планеты определяются как скалистые планеты, на поверхности которых может существовать вода в жидком состоянии в течение геологически длительного периода времени (свыше 1 млрд. лет, (Kasting et al. 1993)). Хотя было открыто более 4000 экзопланет, мы все еще не можем установить, какая экзопланета размером с Землю может считаться обитаемой, потому что наше понимание условий окружающей среды, необходимых для планет и удовлетворяющих определению обитаемости, далеко не полное, особенно для M-карликов.

Основные проблемы заключаются в том, что

- уровни активности звезд с низкой массой намного выше, чем у Солнца (Scalo et al. 2007, Stelzer et al. 2013), и, таким образом, стабильность планетных атмосфер под воздействиями

³Под жестким УФ будем понимать крайний ультрафиолет в диапазоне от 1 до 100 нм, включающий мягкие рентгеновские лучи.

высокого XUV-излучения (soft X-ray и EUV) и звездного ветра звезд низкой массы ставится под сомнение (Tian 2009, Bisikalo et al. 2018);

- эволюционное развитие звезд с низкой массой резко отличается от эволюции подобных Солнцу звезд, что может привести к быстрому обезвоживанию каменных планет в обитаемых зонах этих звезд (Tian and Ida 2015, Luger and Barnes 2015, Owen 2019).

Оба вопроса связаны с атмосферными потерями, которые касаются структуры, физики и химии верхних слоев атмосферы. Звездное XUV-излучение в основном влияет на верхние атмосферы и экзосферы планет. А физика и химия верхних атмосфер и экзосфер планет определяют эффективность атмосферного убегания для планет. Современные теории планетных экзосфер основаны главным образом на космических наблюдениях особенностей экзосферных свечений горячих атомов водорода и кислорода. Эти наблюдения позволили построить распределения плотности и температуры экзосфер. Измерения показывают, что планетные экзосферы содержат как фракцию тепловых нейтральных частиц со средней кинетической энергией, соответствующей экзосферной температуре, так и фракцию горячих нейтральных частиц со средней кинетической энергией, значительно превышающей энергию, соответствующую экзосферной температуре. Существование горячей экзосферной составляющей является проявлением значимости нетепловых процессов в планетных и спутниковых атмосферах (Marov et al. 1996). Эта новая область планетной астрономии — исследование роли надтепловых частиц (т.е. частиц с избытком кинетической энергии) — в физике и химии верхних атмосфер планет очень активно развивается в последние годы (Johnson et al. 2008, Shematovich et al. 2015, Shematovich and Marov 2018, Shematovich 2019). Фотолиз и радиолиз H_2 -, CH_4 -, CO_2 - и/или H_2O -доминантной атмосферы экзопланеты на низкой орбите за счет воздействия жесткого ультрафиолетового излучения и плазмы родительской звезды приводят к образованию надтепловых частиц — первичных надтепловых фотоэлектронов при ионизации основных молекулярных компонентов и надтепловых атомов водорода, углерода и кислорода при диссоциации и диссоциативной ионизации атмосферных молекул H_2 -, CH_4 -, CO_2 - и/или H_2O . Эти частицы с избытком кинетической энергии являются важным источником тепловой энергии в верхних слоях атмосферы экзопланеты, богатой летучими компонентами. В современных аэрономических моделях экзопланет (Yelle et al. 2008, Owen et al. 2020) кинетика атмосферных частиц при надтепловых энергиях практически не исследована, так как в

таких моделях обычно предполагается быстрая локальная термализация горячих атомов в упругих столкновениях с атмосферным газом. Кроме того, кинетика и перенос надтепловых атомов водорода и «свежих» фотоэлектронов не рассчитывались в деталях еще и потому, что для этого требуется решение кинетического уравнения Больцмана для нетепловой фракции этих частиц (Shematovich 2019). Это сложная задача как с физической, так и вычислительной точек зрения, решение которой позволит в полной мере оценить влияние на состояние атмосферы жесткого УФ-излучения и потока плазмы родительской звезды за счет образования и кинетики надтепловых частиц в верхних атмосферах экзопланет, обогащенных водородом и водяным паром.

Космические эксперименты по исследованию планетных корон показали, что физика и химия таких сред в значительной степени определяются влиянием надтепловых частиц, образующихся в результате воздействия солнечного УФ-излучения и плазмы солнечного ветра (см., например, Marov et al. (1996), Shematovich (2019), Shematovich and Bisikalo (2017)). Такие исследования проводятся с помощью кинетического метода Монте-Карло, который основан на решении нелинейной системы кинетических уравнений Больцмана и позволяет получать результаты мирового уровня, что подтверждается предыдущими исследованиями. В частности, следует отметить разработку и приложение к исследованиям атмосфер экзопланет следующих моделей:

а) Численные модели высыпания и переноса электронов, протонов и атомов водорода с высокими кинетическими энергиями в планетной атмосфере. В моделях использованы методы Монте-Карло, позволяющие учесть стохастическую природу процессов образования надтепловых частиц в состояниях внутреннего возбуждения, а также рассеяния высыпающихся частиц с высокими энергиями в упругих и неупругих столкновениях с окружающим атмосферным газом. В численной модели учитываются как локальная кинетика столкновений, так и перенос электронов, протонов и атомов водорода в атмосферах с доминантными компонентами: H_2 , He, H, и O (Shematovich et al. 2008; 2011; 2019; 2021).

б) Численная стохастическая модель, предназначенная для исследования как локальных процессов образования и кинетики надтепловых частиц в возбужденных состояниях, так и их переноса в переходной области между слоями планетных атмосфер со столкновениями и без них. Данная модель позволит рассчитать функции распределения надтепловых частиц по

кинетической энергии и, следовательно, оценить спектральные распределения источников УФ-свечений (Shematovich 2010, Avtaeva and Shematovich 2021).

с) Аэрономическая модель верхней атмосферы (Ionov et al. 2017; 2018), построенная на основе нашего понимания физических процессов, протекающих в верхних водородно-доминантных атмосферах экзопланет. Это одномерная модель, включающая перенос XUV-излучения, фотореакции с участием нейтральных частиц и ионов и одномерную газодинамику, предназначенная для моделирования возможного гидродинамического истечения. В нее включена численная модель на основе кинетического метода Монте-Карло для исследования переноса и потери энергии электронов с высокими энергиями в верхних атмосферах планет. Эта модель позволила ранее оценить темп тепловой потери атмосферы экзопланеты и, в частности, изучить механизмы образования так называемой «пустыни горячих нептун» (Ionov et al. 2018), открытой в распределении экзопланет по массе и радиусу. Также впервые были получены оценки дополнительных потерь атмосферы горячего юпитера HD 209458b под воздействием звездных супервспышек (Bisikalo et al. 2018).

d) Трехмерные газодинамические и МГД-модели, при помощи которых была исследована структура протяженных оболочек горячих юпитеров (Bisikalo et al. 2019). Взаимодействие со звездным ветром может обеспечить стабильность протяженной оболочки, значительно превышающей размерами полость Роша планеты, — так называемой квази-замкнутой оболочки горячих юпитеров. Были исследованы свойства квази-замкнутых оболочек, в том числе, влияние на них магнитного поля планеты и давления излучения родительской звезды, а также их взаимодействие с излучением звезды.

3.2. Результаты исследований эволюции атмосфер горячих экзопланет

3.2.1. Кинетика надтепловых частиц в верхних атмосферах горячих экзопланет

Известно, что в протяженных водородных атмосферах горячих экзопланет, таких как субнептун, планеты-океаны, супер- и экзоземли, протекают как тепловые так и нетепловые процессы, приводящие к потере атмосферы (Massol et al. 2016). В частности, фотолиз богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты жестким излучением родительской звезды приводит к образованию надтепловых частиц — первичных фотоэлектронов при

фотоионизации основных компонентов H_2 , H и He и надтепловых атомов водорода в процессах диссоциации и диссоциативной ионизации H_2 , а также надтепловых атомов C и O в процессах диссоциации малых примесей H_2O и CO_2 (Shematovich et al. 2015). Эти частицы с избыточной кинетической энергией являются важным источником тепловой энергии в верхней атмосфере, богатой водородом. Исследование роли надтепловых частиц в современных аэрономических моделях планетных атмосфер является сложной вычислительной задачей, так как требует решения уравнения Больцмана для фракции надтепловых частиц (Shematovich and Magov 2018).

Были проведены исследования с целью оценки влияния XUV-излучения (мягкий рентген, soft X-rays, и жесткий ультрафиолет, Extreme UltraViolet) родительской звезды и сопутствующего потока фотоэлектронов на образование надтепловых атомов водорода в переходной области $H_2 \rightarrow H$ богатых водородом атмосфер горячих нептун GJ 436b, GJ 3470b, а также суперземли π Men c. Для этого в модели рассчитываются скорость производства и энергетический спектр атомов водорода, образующихся с избытком кинетической энергии в процессах экзотермической фотохимии, в которых важнейшая роль принадлежит диссоциации H_2 как под воздействием жесткого звездного излучения, так и при ударном воздействии сопутствующего потока фотоэлектронов. Затем применяется кинетическая Монте-Карло-модель горячей планетарной короны (Shematovich 2010) для изучения кинетики и переноса надтепловых атомов водорода в протяженных верхних слоях атмосферы и расчета скорости потери атмосферы. Из лабораторных исследований (Huebner et al. 1992) известно, что избыточные кинетические энергии атомов водорода, образующихся при фото- и ударной электронной диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода, характеризуются двумя пиками по энергии фрагментов: в области низких энергий 0–1 эВ (медленные продукты диссоциации) и в области относительно высоких энергий 4–6 эВ (быстрые продукты диссоциации). Данные избыточные энергии в модели рассчитывались как разница между энергией поглощенного УФ-фотона, энергией возбужденного электронного состояния и энергией диссоциации или диссоциативной ионизации и выбирались из измеренных в лаборатории распределений (Huebner et al. 1992).

Так как атомы водорода образуются в процессах диссоциации с избытком кинетической энергии, их распределение в переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы горячей экзопланеты определяется из решения кинетического уравнения Больцмана с фотохимическим источником (Avtaeva and

Shematovich 2021). Используется микроскопическое описание надтепловых атомов водорода посредством функции распределения по скоростям и состояниям внутреннего возбуждения, включающее числовую плотность надтепловых частиц и одночастичную функцию распределения по скоростям. Функции источников в кинетическом уравнении Больцмана задают скорости образования надтепловых атомов водорода в фотохимических реакциях и записываются как произведение дифференциальной скорости образования надтепловых атомов водорода в фотохимическом источнике при заданной энергии сталкивающихся частиц, усредненной по функции распределения по скоростям окружающего атмосферного газа, и функции, задающей нормированное распределение по скорости образующихся в данном источнике частиц в состояниях внутреннего возбуждения и с избытком тепловой энергии. Функции распределения для атмосферных компонентов брались локально равновесными распределениями Максвелла со значениями плотности и температуры в соответствии с данными аэрономической модели верхней атмосферы исследуемой экзопланеты.

Для того чтобы определить функции источника надтепловых атомов водорода, были рассчитаны скорости диссоциации и ионизации атмосферного газа УФ-излучением звезды, скорости образования сопутствующего потока фотоэлектронов и, наконец, скорости диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода при переносе потока электронов в атмосфере (Avtaeva and Shematovich 2021). Жесткое XUV-излучение звезды поглощается атмосферным газом горячей экзопланеты. Этот процесс сопровождается возбуждением, диссоциацией и ионизацией атмосферных компонентов, а также образованием потока фотоэлектронов с энергиями, достаточными для последующего возбуждения и ионизации атомарного и молекулярного водорода. Энергия вызывающих диссоциацию фотонов обычно превышает потенциал диссоциации и ее избыток переходит в кинетическую энергию образующихся атомов водорода. Скорость образования «свежих» фотоэлектронов при фотоионизации и диссоциативной фотоионизации основных атмосферных компонентов рассчитывалась с использованием сечений фотоионизации из обзора Huebner et al. (1992). Кинетика и перенос фотоэлектронов в переходной области $H_2 \rightarrow H$ богатой водородом атмосферы горячей экзопланеты, а также скорость образования надтепловых атомов водорода при ударной диссоциации H_2 были изучены при помощи кинетической Монте-Карло-модели для расчета кинетики и переноса электронов с высокими энергиями, адаптированной для водородно-гелиевых атмосфер (Shematovich 2010). Разработанный ком-

плекс кинетических Монте-Карло-моделей позволил впервые детально рассчитать кинетику (на молекулярном уровне) процессов образования, излучения и релаксации в столкновениях тепловых и надтепловых атомов (H, C, O и т. д.) в возбужденных состояниях в верхних атмосферах горячих экзопланет. Расчеты функций распределения по кинетической энергии атомов H, C, O в протяженных атмосферах горячих экзопланет проводились в переходной $H_2 \rightarrow H$ области верхней атмосферы в интервале высот $1.3\text{--}2.0 \times R_p$ (здесь R_p — фотометрический радиус планеты), где наблюдается максимальное поглощение звездного XUV-излучения. На нижней границе выбранной области длина свободного пробега атомов водорода значительно меньше высоты однородной атмосферы по плотности и, соответственно, происходит локальная термализация надтепловых атомов водорода в упругих столкновениях с окружающим атмосферным газом. Распределение основных нейтральных компонентов выбиралось в соответствии с данными аэрономических моделей (например, для горячего непуна GJ 436b — из работы Berezutsky et al. (2019)). 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 порога энергии убегания.

В качестве примера приведем результаты расчетов функций распределения для надтепловых атомов водорода в верхней атмосфере экзопланеты GJ 436b с массой $M_p = 0.07 M_{Jup}$ и радиусом $R_p = 0.38 R_{Jup}$, которая вращается вокруг красного карлика Gliese 436 на орбите с большой полуосью 0.028 а.е. Детальный спектральный поток солнечного излучения был масштабирован для орбиты с большой полуосью 0.028 а.е. экзопланеты GJ 436b в соответствии с соотношениями, полученными из результатов наблюдений в рамках программы MUSCLES (Youngblood et al. 2016). Скорости образования надтепловых атомов водорода в фотоисточниках — процессах диссоциации и диссоциативной ионизации H_2 жестким УФ-излучением звезды — вычислялись при помощи кинетической Монте-Карло-модели. В расчетах 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 (см. рис. 5).

Расчетные скорости и энергетические спектры образования надтепловых атомов водорода за счет диссоциации H_2 использованы как функции источника в кинетическом уравнении Больцмана, которое решалось при помощи численной кинетической модели Монте-Карло (Shematovich 2010, Avtaeva

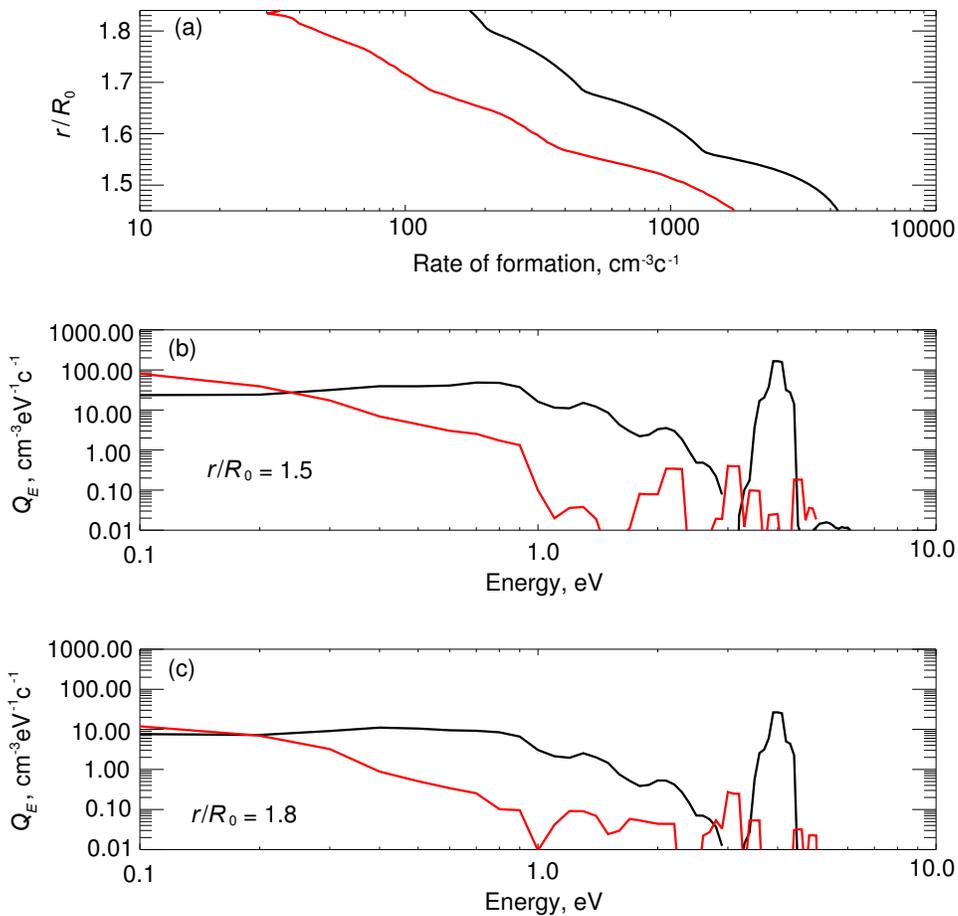


Рис. 5. Скорости образования надтепловых атомов водорода за счет диссоциации и диссоциативной ионизации молекулярного водорода XUV-излучением звезды (линия черного цвета) и сопутствующего потока фотоэлектронов (линия красного цвета) — панель (a); энергетические спектры атомов водорода, образующихся за счет диссоциации и диссоциативной ионизации XUV-фотонами (линии черного цвета) и сопутствующим потоком фотоэлектронов (линии красного цвета) на высотах $r = 1.5 R_p$ и $r = 1.8 R_p$ — панели (b) и (c) соответственно.

and Shematovich 2021). В модели рассматриваются кинетика и транспорт надтепловых атомов водорода на молекулярном уровне, и результатом расчетов являются функции распределения надтепловых атомов водорода в переходной области верхней атмосферы. Расчеты выполнены для стационарных условий в дневной верхней атмосфере в направлении «планета—звезда». В расчетах было установлено (см. рис. 6), что потоки надтепловых атомов водорода существенно неравновесны по сравнению с восходящими потоками для локально равновесных распределений тепловых атомов водорода в атмосфере GJ 436b. На высотах около $1.56 R_p$, где образование атомов водорода в процессе диссоциации H_2 велико, уже формируется значительная фракция атомов водорода с энергиями выше энергии убегания. На высоте $1.84 R_p$, близкой к верхней границе переходной $H_2 \rightarrow H$ области, значения расчетного потока выше значений потока

для локально равновесного распределения при кинетических энергиях больше 4 эВ, т.е. в области этих энергий заселенность надтепловыми атомами водорода, образующимися за счет диссоциации H_2 в протяженной верхней атмосфере экзопланеты GJ 436b, на порядок выше заселенности, рассчитанной по локально равновесному распределению. Другими словами, в расчетном восходящем потоке формируется избыток атомов водорода в области надтепловых энергий свыше 4 эВ, то есть в области быстрых атомов водорода, образующихся за счет механизма преддиссоциации высоковозбужденных электронных состояний молекулы H_2 .

Из расчетного энергетического спектра потока атомов водорода, убегающих из атмосферы через верхнюю границу переходной области на высоте порядка $1.84 R_p$ за счет процесса диссоциации H_2 , была получена следующая оценка: $3.0 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ — величина числового пото-

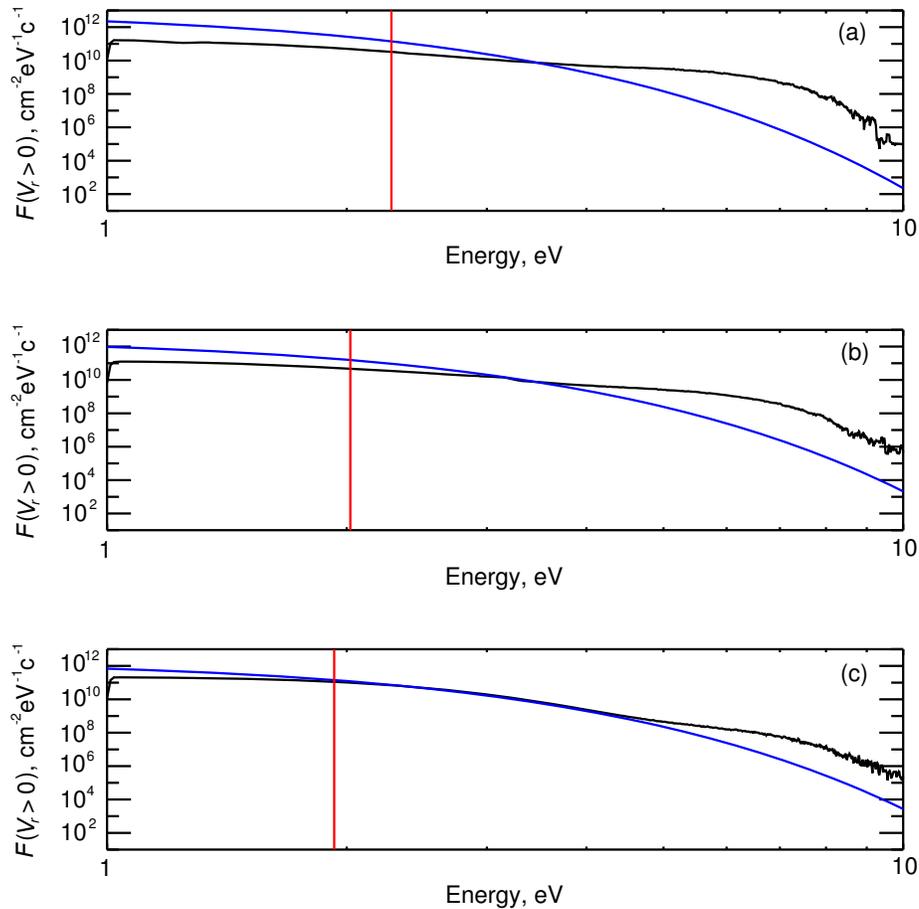


Рис. 6. Расчетные энергетические спектры потока движущихся вверх надтепловых атомов водорода на высотах $1.56 R_p$ (a), $1.75 R_p$ (b) и $1.84 R_p$ (c). Линиями синего цвета показаны потоки тепловых атомов H, рассчитанные для локально равновесного распределения атомарного водорода в соответствии с профилем температуры из модели Berezutsky et al. (2019). Вертикальными красными линиями показаны энергии убегания атомов водорода на приведенных высотах.

ка убегания в направлении «планета–звезда» в условиях умеренного уровня звездной активности в XUV-диапазоне излучения звезды. Полученное расчетное значение числового потока убегания надтепловых атомов водорода превышает значение $1.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, найденное по формуле Джинса для числового потока тепловых атомов водорода. Данная оценка скорости нетепловой потери атмосферы экзопланетой GJ 436b может рассматриваться как среднее значение (Shematovich 2010, Avtaeva and Shematovich 2021), так как расчеты проведены для условий умеренной звездной активности в УФ-излучении и для вероятностей преддиссоциации возбужденных электронных уровней использовались минимальные значения 0.1. Естественно, в условиях высокого уровня звездного XUV-излучения, а тем более в условиях звездной вспышки, вклад процессов диссоциации H_2 жестким излучением звезды и сопутствующим потоком

фотоэлектронов в образование потока убегających из атмосферы атомов водорода станет еще более существенным. Следовательно, данный источник надтепловых атомов водорода необходимо включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет.

3.2.2. Скорости потери атмосферы горячими экзопланетами

Благодаря космическому телескопу Кеплер стало возможным обнаружение горячих планет существенно меньших размеров, вплоть до суперземель — экзопланет с массой в несколько земных масс. Дальнейший анализ параметров открытых планет выявил интересную особенность. Несмотря на открытие большого количества подобных Юпитеру и Земле экзопланет на близких орбитах, количество горячих нептун — планет, масса которых в 0.6–18 раз отличается от массы планеты

Нептун в Солнечной системе, и с орбитальными периодами менее трех суток — оказалось очень малым. Соответствующая область в распределении экзопланет по массам и орбитальным периодам была обозначена как «пустыня непунов с короткими орбитальными периодами» (Mazeh et al. 2016). Существование такой области в распределении экзопланет не может быть объяснено эффектами селекции в наблюдениях. Действительно, принятые методы наблюдений экзопланет потенциально более чувствительны к более массивным планетам. Следовательно, такие методы, будучи результативными для идентификации суперземель, должны быть еще более эффективны для обнаружения короткопериодических непунов на тех же орбитах. Более детальный анализ эффектов селекции наблюдений и их связи с проблемой короткопериодических непунов можно найти в работе Mazeh et al. (2016), где приведено функциональное выражение для описания верхней и нижней границ «пустыни короткопериодических непунов», а также представлена диаграмма распределения экзопланет по массе и орбитальному периоду. Исходя из вышесказанного, разумно предположить, что наличие «пустыни непунов» с короткими орбитальными периодами имеет физические причины. В качестве возможных объяснений рассматриваются либо ограничения, налагаемые процессами миграции (см., например, недавние обзоры Mordasini et al. (2015), Paardekooper and Johansen (2018), Dawson and Johnson (2018)), либо предположение, что маломассивные газовые планеты не выживают в непосредственной близости от родительской звезды из-за интенсивного оттока атмосферы, вызванного ее нагревом звездным XUV-излучением (см., например, Kurokawa and Nakamoto (2014), Tian (2015a)).

Потеря атмосферы близкими к звезде планетами является очень важным эволюционным фактором, поэтому рассмотрим механизм формирования «пустыни короткопериодических непунов» подробнее. Явление фотоиспарения атмосферы чаще возникает для протяженных оболочек горячих экзопланет на близких орбитах, чем для планет на дальних орбитах (Lopez et al. 2012, Jin et al. 2014). Процессы потери первичной водородно-гелиевой атмосферы наблюдались как у планет с высокой массой, например, у горячего юпитера HD 209458b (Vidal-Madjar et al. 2003), так и у горячих непунов и субнепунов, например, у непуна GJ 436b (Kulow et al. 2014) и суперземли π Men c (King et al. 2019). Для планеты с достаточно низкой массой на близкой орбите начальная маломассивная водородно-гелиевая оболочка может быть даже полностью потеряна, оставляя у планеты только твердое ядро (Armstrong et al. 2020). Масса и плотность ядра играют важную роль в эволюции

атмосферы планеты, задавая скорость убегания (вторую космическую скорость) (Owen 2019).

Теория фотоиспарения (Owen 2019) очень полезна при изучении демографии экзопланет, так как позволяет сделать выводы об их различных популяциях. Например, эта теория предсказала существование «ущелья фотоиспарения» — области с низким уровнем заселения на диаграмме, характеризующей распределение обнаруженных экзопланет по радиусу и периоду обращения. Эта область разделяет те планеты, которые полностью потеряли первичную газовую оболочку, и те, вокруг которых сохранился примерно 1% массы их первичной оболочки. Существование «ущелья фотоиспарения» было впервые предсказано Owen and Wu (2013) с помощью численных эволюционных исследований для маломассивных планет с полностью силикатными ядрами и вскоре после этого Lopez and Fortney (2013) — для ядер с различными составами при использовании другой модели испарения. Это свойство может быть интерпретировано также как «деление по радиусу», то есть бимодальное распределение планет по радиусам, с суперземлями и субнепунами, разделенными «ущельем» примерно на $1.8 R_E$, где R_E — радиус Земли. Существование такого «ущелья» в распределении экзопланет подтверждено в недавних наблюдениях Fulton et al. (2017), Van Eylen et al. (2018) вследствие улучшения точности определения звездных радиусов и, следовательно, планетных радиусов. Таким образом, деление по радиусу является надежным предсказанием эволюции H-He-доминантных оболочек экзопланет на близких орбитах за счет процессов фотоиспарения атмосферы (Chen and Rogers 2016, Owen and Wu 2017, Owen 2019).

Гипотеза фотоиспарения полезна и для объяснения верхней границы пустыни непунов с короткими орбитальными периодами. Предполагая, что отток вызван нагревом атмосферы излучением в диапазоне длин волн 1–100 нм (Lammer et al. 2003; 2009b, Jin et al. 2014)), в работе Kurokawa and Nakamoto (2014) был смоделирован отток атмосферы при помощи 1D-полуаналитической эволюционной модели суб-юпитера. Для расчета скорости потери атмосферы за счет нагрева звездным излучением использовалось выражение из Lopez and Fortney (2014):

$$\frac{dM_p}{dt} = -\frac{\pi\eta F_{XUV} R_{XUV}^3}{GM_p K_t}, \quad (1)$$

где F_{XUV} — падающий звездный XUV-поток, R_{XUV} — радиус (вычисленный от центра планеты), на котором наблюдается максимум поглощения XUV-излучения, K_t — коэффициент для учета приливной силы от звезды и η — эффективность

нагрева. Используя полученные скорости оттока и соответствующие им времена жизни экзопланет, Kurokawa and Nakamoto (2014) вывели верхнюю границу «пустыни непутонов» с короткими орбитальными периодами на диаграмме «период–масса». С принятым значением эффективности нагрева 0.25 атмосферы планет ниже верхней границы должны испариться менее чем за 2 млрд. лет. Однако в нашем исследовании (Shematovich et al. 2014) было показано, что среднее значение эффективности нагрева равно 0.14, если учитывается вклад надтепловых фотоэлектронов.

Как было отмечено в работе Ribas et al. (2005), интенсивности XUV-излучения молодых звезд солнечного типа могут превышать существующую солнечную интенсивность в 10–100 раз. Это должно привести к увеличению соответствующих значений скорости потери массы, и данный эффект должен учитываться в аэрономической модели. Таким образом, при моделировании используется не только солнечный спектр, но спектры молодых звезд на основе данных из работы Ribas et al. (2005).

Расчеты были выполнены с применением численного кода для двух моделей подобных Нептуну планет (Ionov et al. 2018). Первая модель планеты, которую условно называют «тяжелой», соответствует верхней границе короткопериодической «пустыни горячих непутонов» с массой модельной планеты в шесть раз больше массы планеты Нептун в Солнечной системе, т. е. равной 6×10^{29} г. Во второй модели планеты, условно называемой «легкой» (с массой Нептуна), представлены планеты вблизи нижней границы «пустыни». Следует отметить, что в большинстве предыдущих исследований внимание было уделено преимущественно верхней границе «пустыни» (см., например, Kurokawa and Nakamoto (2014)). Радиусы обеих модельных планет были рассчитаны исходя из условия, что их средние плотности такие же, как и у Нептуна. Для орбитальных расстояний планет были выбраны следующие значения: 0.05, 0.04, 0.03 и 0.02 а.е.

Оценим скорость потери массы по приближенному уравнению (1). Одним из основных параметров в этом выражении является радиус R_{XUV} , на котором поглощается звездное XUV-излучение. Определить точное значение этого параметра довольно сложно, так как зона эффективного поглощения XUV-излучения является достаточно протяженной. Между тем скорость потери массы в уравнении (1) пропорциональна третьей степени R_{XUV} , что делает выбор радиуса R_{XUV} важным. Авторы работы Kurokawa and Kaltenegger (2013) предложили использовать радиус, на котором интенсивность падающего XUV-излучения уменьшается в e раз. Однако, делая этот выбор, следует

заметить, что интенсивность на радиусе R_{XUV} будет зависеть от падающего звездного XUV-потока. В качестве альтернативы было предложено применять отношение $R_{XUV} = 1.4 R_p$.

Скорости потери массы, оцененные с использованием аппроксимационного уравнения (1) и рассчитанные с применением аэрономической модели (Ionov et al. 2018), показаны на рис. 7. Левая и правая панели соответствуют «легким» и «тяжелым» подобным Нептуну планетам соответственно. Аппроксимационные скорости были рассчитаны исходя из предположения, что $R_{XUV} = 1.4 R_p$, и показаны пунктирными линиями. Сплошные линии соответствуют предположению, что R_{XUV} — это полученный в расчетах радиус, на котором оптическая толща для XUV-излучения равна единице. Оптическая толща определяется исходя из результатов расчетов при помощи аэрономической модели Ionov et al. (2018). Для случая «легкой» модели подобной Нептуну планеты расчетный радиус R_{XUV} превышает значение $R_{XUV} = 1.4 R_p$ (за исключением звезды с возрастом 4.5 млрд. лет, когда эти радиусы почти одинаковы). Таким образом, для «легкой» модели планеты приближенные скорости потери массы в случае использования значения радиуса $R_{XUV} = 1.4 R_p$ ниже, чем скорости, рассчитанные для $\tau(R_{XUV}) = 1$. Для «тяжелой» модели планеты ситуация обратная. Аппроксимационные оценки скорости потери массы были рассчитаны с значением эффективности нагрева $\eta = 0.25$, как и было предложено в работе Kurokawa and Nakamoto (2014).

Из сравнения аппроксимационных кривых и полученных модельных расчетов можно сделать следующий вывод. Для звезды с современным солнечным спектром уравнение (1) дает хорошее приближение к результатам численного моделирования. Однако в случае молодой звезды различие между приближенными и рассчитанными в нашей модели скоростями становится более заметным. Для заданного звездного возраста различие растет с уменьшением большой полуоси орбиты планеты. Следовательно, аппроксимационные оценки скорости потери массы, рассчитанные по формуле (1), сильнее всего завышены для молодых звезд и планет на более близких к звезде орбитах, то есть в тех случаях, когда скорость потери массы самая высокая. Этот вывод действителен для моделей как «легких», так и «тяжелых» непутоподобных планет.

Далее рассмотрим вопрос, могут ли рассчитанные скорости потери массы вызвать значительное изменение массы атмосферы планеты. Необходимо принять во внимание, что скорость потери массы атмосферы планеты изменяется во времени, следуя эволюции звездного спектра и светимости (Ionov et al. 2018).

Полученная в расчетах скорость оттока для «легкой» модели горячей подобной Нептуну экзопланеты ниже, чем оцененная по уравнению (1), но ее значения все еще достаточны для того, чтобы вызвать значительное изменение массы атмосферы планеты. Важный вопрос здесь о доле водородно-гелиевой оболочки в общей массе планеты. При условии, что водородно-гелиевая оболочка для легкой модели планеты имеет ту же массу, что и для Нептуна, все «легкие» планеты, помещенные в «пустыню горячих непунов», испытают полную потерю их газовой оболочки. Если предположить, что масса оболочки составляет 30% от массы планеты, то газовые оболочки полностью испарятся на орбитах с большой полуосью 0.02 и 0.03 а.е. Однако испарение водородно-гелиевой оболочки не означает, что планета «ускользает» из «пустыни короткопериодических (горячих) непунов». Планете еще следует избавиться от значительной доли массы, которая, скорее всего, запасена в водной мантии. Однако наша модель не позволяет исследовать эволюцию атмосферы планеты после испарения водородно-гелиевой оболочки. Поэтому вопрос, может ли горячий и «легкий» нептун выжить в «пустыне короткопериодических непунов», требует дальнейшего рассмотрения. В случае «тяжелой» модели горячей подобной Нептуну экзопланеты ситуация более определенная. Скорость оттока сопоставима с таковой для модели «легкой» планеты, так как влияние большей поверхности планеты компенсируется более сильным гравитационным притяжением. Будучи тяжелее, планеты теряют только 5% от начальной массы атмосферы за первые 1.5 миллиарда лет.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что существование «пустыни короткопериодических непунов» нельзя надежно объяснить только процессом фотоиспарения атмосферы планеты вследствие поглощения XUV-излучения родительской звезды. Хотя для случая «легкой» модельной подобной Нептуну планеты рассчитанная верхняя граница скорости оттока массы согласуется с оценками аппроксимационного уравнения (1), в случае «тяжелых» модельных планет данный механизм не обеспечивает потери значительной части массы планеты. Возможны другие физические механизмы, такие как миграция планет на орбитах с высоким значением эксцентриситета, которые прибывают в окрестности полости Роша, где их орбиты из-за приливного взаимодействия со звездой становятся круговыми. Подобный эволюционный механизм может быть применен для объяснения верхней границы «пустыни короткопериодических непунов» (Matsakos and Königl 2016). Необходимо отметить, что представленные в данном разделе расчеты скорости оттока являются не в полной мере

самосогласованными, так как в них не принималась во внимание эволюция внутренней структуры планеты. Необходимо учитывать изменения массы и радиуса планеты при интенсивном испарении атмосферы. Важным фактором является то обстоятельство, что молодая планета может иметь гораздо больший радиус, чем проэволюционировавшая планета. Следовательно, молодая планета будет подвержена фотоиспарению с более высокой скоростью. Эти и другие эволюционные эффекты особенно важно учитывать для суб-непунов, где скорости оттока могут быть значительными.

Важен также учет звездной активности, которая несомненно влияет на скорость оттока атмосферы планеты. Первый фактор — это вспышечная активность родительской звезды. Действительно, во время вспышек звезды интенсивность звездного XUV-излучения может быть на порядок выше, чем для звезды в спокойном состоянии. С учетом вспышек полная энергия XUV-излучения, поглощенная планетой, может быть в несколько раз выше по сравнению со случаем звезды в спокойных условиях (Bisikalo et al. 2018). Согласно выражению (1), скорость оттока прямо пропорциональна потоку XUV-излучения. Таким образом, эффект вспышек может быть ответственен за «чистку» нижней части «пустыни короткопериодических непунов». Однако он не может обеспечить достаточного потока XUV-излучения для испарения «тяжелых» подобных Нептуну планет (Cherenkov et al. 2019), то есть привести к обеднению (депопуляции) верхней части «пустыни». Другим важным фактором является корональная активность звезды. Влияние корональных выбросов массы на устойчивость атмосферы горячего юпитера недавно изучалась в работе Cherenkov et al. (2017), и было показано, что корональные выбросы массы могут привести к увеличению скорости потери атмосферы планеты.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С текущей и планируемой деятельностью космических и наземных телескопов в поисках экзопланет земного типа в обитаемых зонах ближайших звезд (TESS, PLATO, WSO-UV, ESPRESSO и др.) наступает новая эра знаний об эволюции и обитаемости планет, которые находятся рядом с нами. Исследование образования и эволюции первичных и вторичных атмосфер и потенциальной обитаемости экзопланет земного типа (суб-, экзо- и суперземель) и нового класса экзопланет, не имеющих аналогов в Солнечной системе (субнепунов и планет-океанов), имеет первостепенное значение для ряда современных естественнонаучных проблем, важнейшими из которых являются космогония Солнечной системы и происхождение жизни на Земле. Несмотря на то, что открыто

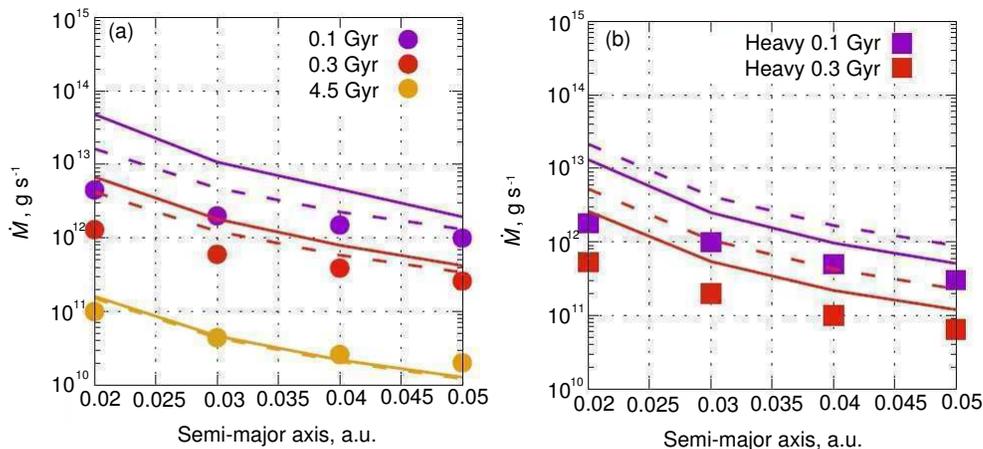


Рис. 7. Скорость потери массы в g s^{-1} как функция большой полуоси орбиты планеты в а.е. Скорости для разных возрастов родительской звезды показаны разными цветами. Результаты для «легких» и «тяжелых» модельных планет, подобных Нептуну, даны на панелях (а) и (б) соответственно. Полученные при моделировании скорости потери массы показаны заполненными кружками. Скорости, рассчитанные по аппроксимационной формуле (1), в предположении, что $R_{\text{XUV}} = 1.4 R_p$, показаны штриховыми линиями, а сплошные линии соответствуют случаю $\tau(R_{\text{XUV}}) = 1$.

около 4000 экзопланет, мы все еще не можем установить, пригодна ли какая-либо экзопланета земного типа для жизни. Решение этих проблем требует знания скорости потери массы атмосферы в ходе эволюции таких планет в направлении к обитаемым мирам. В обзоре представлены некоторые результаты проводимых в Институте астрономии РАН исследований, направленных на изучение пятенной и вспышечной активности родительской звезды, моделирование первичных и вторичных атмосфер экзопланет названных выше классов для оценки возможности их наблюдений современными космическими и наземными инструментами. Полученные результаты исследований позволят значительно улучшить наше понимание процессов формирования и эволюции атмосфер экзопланет и в особенности оценить важнейшие характеристики эволюционного статуса атмосферы — тепловые и нетепловые скорости потери атмосферы. В наших исследованиях показано, что в условиях высокого уровня жесткого звездного излучения, а тем более в условиях звездной вспышки, вклад процессов экзотермической фотохимии в образование потока убегающих из атмосферы надтепловых атомов водорода становится существенным и сравнимым с потоком гидродинамического оттока. Соответственно, данный источник надтепловых атомов водорода необходимо включить в современные аэрономические модели физических и химических процессов в верхних атмосферах горячих экзопланет. Представленные результаты убедительно свидетельствуют о целесообразности использования аэрономических и кинетических моделей атмосфер горячих экзопланет, разработанных в Институте астрономии РАН для исследования газовых обо-

лочек горячих юпитеров и нептун (Bisikalo et al. 2019, Shematovich 2020), для анализа наблюдений других типов экзопланет — субнептунов и супер-экзоземель. Учет вклада надтепловых частиц в аэрономической модели позволил уточнить скорости нагрева атмосферного газа за счет поглощения жесткого излучения родительской звезды. Это в свою очередь способствовало более точному определению значений темпа потери массы атмосферами экзопланет на близких к родительской звезде орбитах и, соответственно, эволюционных свойств атмосфер горячих экзопланет. Важно также отметить, что представленные в обзоре кинетические и аэрономические модели, разработанные в последние годы в Институте астрономии РАН, будут использованы для анализа и интерпретации имеющихся и ожидаемых наблюдений атмосфер экзопланет земного типа. Это позволит наложить дополнительные ограничения на модели и тем самым сделать их более надежными.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы признательны правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту № 075-15-2020-780 (№ 13.1902.21.0039).

5. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. N. Aarnio, S. P. Matt, and K. G. Stassun, *Astrophys. J.* **760** (1), 9 (2012).
2. V. S. Airapetian, A. Gloer, G. V. Khazanov, et al., *Astrophys. J.* **836** (1), L3 (2017).
3. G. Anglada-Escudé, P. J. Amado, J. Barnes, et al., *Nature* **536** (7617), 437 (2016).
4. D. J. Armstrong, T. A. Lopez, V. Adibekyan, et al., *Nature* **583** (7814), 39 (2020).
5. D. J. Armstrong, C. E. Pugh, A. M. Broomhall, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **455** (3), 3110 (2016).
6. A. A. Avtaeva and V. I. Shematovich, *Solar System Research* **55** (2), 150 (2021).
7. N. M. Batalha, *Proc. Nat. Academy of Science* **111** (35), 12647 (2014).
8. N. E. Batalha, N. K. Lewis, M. R. Line, et al., *Astrophys. J.* **856** (2), L34 (2018).
9. A. G. Berezutsky, I. F. Shaikhislamov, I. B. Miroshnichenko, et al., *Solar System Research* **53** (2), 138 (2019).
10. D. Bisikalo, P. Kaygorodov, D. Ionov, et al., *Astrophys. J.* **764** (1), 19 (2013).
11. D. V. Bisikalo, P. V. Kaygorodov, and V. I. Shematovich, in *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science* (Oxford Univ. Press, 2019), id. 103.
12. D. V. Bisikalo, V. I. Shematovich, A. A. Cherenkov, et al., *Astrophys. J.* **869** (2), 108 (2018).
13. J. J. Bochanski, S. L. Hawley, K. R. Covey, et al., *Astron. J.* **139** (6), 2679 (2010).
14. E. Bolmont, F. Selsis, J. E. Owen, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **464** (3), 3728 (2017).
15. H. Chen and L. A. Rogers, *Astrophys. J.* **831** (2), 180 (2016).
16. A. Cherenkov, D. Bisikalo, L. Fossati, and C. Möstl, *Astrophys. J.* **846** (1), id. 31 (2017).
17. A. A. Cherenkov, I. F. Shaikhislamov, D. V. Bisikalo, et al., *Astronomy Reports* **63** (2), 94 (2019).
18. S. R. Cranmer, *Astrophys. J.* **840** (2), 114 (2017).
19. J. R. A. Davenport, *Astrophys. J.* **829** (1), 23 (2016).
20. J. R. A. Davenport, S. L. Hawley, L. Hebb, et al., *Astrophys. J.* **797** (2), 122 (2014).
21. J. R. A. Davenport, D. M. Kipping, D. Sasselov, et al., *Astrophys. J.* **829** (2), L31 (2016).
22. R. I. Dawson and J. A. Johnson, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **56**, 175 (2018).
23. J. A. Dittmann, J. M. Irwin, D. Charbonneau, et al., *Nature* **544** (7650), 333 (2017).
24. E. S. Dmitrienko and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **61** (10), 871 (2017).
25. E. S. Dmitrienko and I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **62** (6), 412 (2018).
26. L. Doyle, G. Ramsay, and J. G. Doyle, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **494** (3), 3596 (2020).
27. B. Fuhrmeister, S. Czesla, J. H. M. M. Schmitt, et al., *Astron. and Astrophys.* **615**, A14 (2018).
28. B. J. Fulton, E. A. Petigura, A. W. Howard, et al., *Astron. J.* **154** (3), 109 (2017).
29. B. S. Gaudi, S. Seager, B. Mennesson, et al., *Nature Astronomy* **2**, 600 (2018).
30. M. Gillon, A. H. M. J. Triaud, B.-O. Demory, et al., *Nature* **542** (7642), 456 (2017).
31. M. N. Günther, Z. Zhan, S. Seager, et al., *Astron. J.* **159** (2), 60 (2020).
32. W. F. Huebner, J. J. Keady, and S. P. Lyon, *Astrophys. and Space Sci.* **195** (1), 1 (1992).
33. D. E. Ionov, Y. N. Pavlyuchenkov, and V. I. Shematovich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (4), 5639 (2018).
34. D. E. Ionov, V. I. Shematovich, and Y. N. Pavlyuchenkov, *Astronomy Reports* **61** (5), 387 (2017).
35. S. Jin, C. Mordasini, V. Parmentier, et al., *Astrophys. J.* **795** (1), 65 (2014).
36. R. E. Johnson, M. R. Combi, J. L. Fox, et al., *Space Sci. Rev.* **139** (1–4), 355 (2008).
37. S. R. Kane, M. L. Hill, J. F. Kasting, et al., *Astrophys. J.* **830** (1), 1 (2016).
38. J. F. Kasting, D. P. Whitmire, and R. T. Reynolds, *Icarus* **101** (1), 108 (1993).
39. E. Kilpua, H. E. J. Koskinen, and T. I. Pulkkinen, *Living Reviews in Solar Physics* **14** (1), id. 5 (2017).
40. G. W. King, P. J. Wheatley, V. Bourrier, and D. Ehrenreich, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (1), L49 (2019).
41. R. K. Kopparapu, R. Ramirez, J. F. Kasting, et al., *Astrophys. J.* **765** (2), 131 (2013).
42. R. K. Kopparapu, R. M. Ramirez, J. SchottelKotte, et al., *Astrophys. J.* **787** (2), L29 (2014).
43. J. R. Kulow, K. France, J. Linsky, and R. O. P. Loyd, *Astrophys. J.* **786** (2), 132 (2014).
44. H. Kurokawa and L. Kaltenegger, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433** (4), 3239 (2013).
45. H. Kurokawa and T. Nakamoto, *Astrophys. J.* **783** (1), 54 (2014).
46. H. Lammer, *Origin and Evolution of Planetary Atmospheres: Implications for Habitability* (Springer, 2013).
47. H. Lammer, J. H. Bredehöft, A. Coustenis, et al., *Astron. Astrophys. Rev.* **17** (2), 181 (2009a).
48. H. Lammer, P. Odert, M. Leitzinger, et al., *Astron. and Astrophys.* **506** (1), 399 (2009b).
49. H. Lammer, F. Selsis, I. Ribas, et al., *Astrophys. J.* **598** (2), L121 (2003).
50. M. Leitzinger, P. Odert, R. Greimel, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **493** (3), 4570 (2020).
51. J. J. Lissauer, D. Jontof-Hutter, J. F. Rowe, et al., *Astrophys. J.* **770** (2), 131 (2013).
52. E. D. Lopez and J. J. Fortney, *Astrophys. J.* **776** (1), 2 (2013).
53. E. D. Lopez and J. J. Fortney, *Astrophys. J.* **792** (1), 1 (2014).
54. E. D. Lopez, J. J. Fortney, and N. Miller, *Astrophys. J.* **761** (1), 59 (2012).
55. R. Luger and R. Barnes, *Astrobiology* **15** (2), 119 (2015).
56. R. Luger, R. Barnes, E. Lopez, et al., *Astrobiology* **15** (1), 57 (2015).

57. H. Maehara, T. Shibayama, S. Notsu, et al., *Nature* **485** (7399), 478 (2012).
58. M. Y. Marov, V. I. Shematovich, and D. V. Bisikalo, *Space Sci. Rev.* **76** (1–2), 1 (1996).
59. H. Massol, K. Hamano, F. Tian, et al., *Space Sci. Rev.* **205** (1–4), 153 (2016).
60. T. Matsakos and A. Königl, *Astrophys. J.* **820** (1), L8 (2016).
61. A. W. Mayo, A. Vanderburg, D. W. Latham, et al., *Astron. J.* **155** (3), 136 (2018).
62. T. Mazeh, T. Holczer, and S. Faigler, *Astron. and Astrophys.* **589**, id. A75 (2016).
63. A. McQuillan, T. Mazeh, and S. Aigrain, *Astrophys. J.* **775** (1), L11 (2013).
64. C. Mordasini, P. Mollière, K. M. Dittkrist, et al., *Int. J. Astrobiology* **14** (2), 201 (2015).
65. T. D. Morton, S. T. Bryson, J. L. Coughlin, et al., *Astrophys. J.* **822** (2), 86 (2016).
66. L. Noack, D. Höning, A. Rivoldini, et al., *Icarus* **277**, 215 (2016).
67. J. E. Owen, *Ann. Rev. Earth and Planetary Sciences* **47**, 67 (2019).
68. J. E. Owen and Y. Wu, *Astrophys. J.* **775** (2), 105 (2013).
69. J. E. Owen and Y. Wu, *Astrophys. J.* **847** (1), 29 (2017).
70. J. E. Owen, I. F. Shaikhislamov, H. Lammer, et al., *Space Sci. Rev.* **216** (8), 129 (2020).
71. S.-J. Paardekooper and A. Johansen, *Space Sci. Rev.* **214** (1), 38 (2018).
72. T. Penz, G. Micela, and H. Lammer, *Astron. and Astrophys.* **477** (1), 309 (2008).
73. S. Ranjan, R. Wordsworth, and D. D. Sasselov, *Astrophys. J.* **843** (2), 110 (2017).
74. I. Ribas, E. Bolmont, F. Selsis, et al., *Astron. and Astrophys.* **596**, id. A111 (2016).
75. I. Ribas, E. F. Guinan, M. Güdel, and M. Audard, *Astrophys. J.* **622** (1), 680 (2005).
76. A. C. Rizzuto, A. W. Mann, A. Vanderburg, et al., *Astron. J.* **154** (6), 224 (2017).
77. J. Sanz-Forcada, G. Micela, I. Ribas, et al., *Astron. and Astrophys.* **532**, id. A6 (2011).
78. I. S. Savanov, *Astronomy Reports* **55** (4), 341 (2011).
79. I. Savanov, in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (Spec. Astrophys. Obs. Russian Acad. Sci., Nizhnij Arkhyz, 2020a), pp. 236–237.
80. I. S. Savanov, *Astronomy Letters* **46** (12), 831 (2020b).
81. I. S. Savanov, *Astronomy Letters* **47** (3), 175 (2021a).
82. I. S. Savanov, *Astrophysics* **64** (2), 178 (2021b).
83. I. S. Savanov, *Astrophysical Bulletin* **76** (2), 157 (2021c).
84. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astrophysical Bulletin* **55** (10), 890 (2011).
85. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **59** (5), 397 (2015).
86. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **63** (7), 595 (2019).
87. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Letters* **46** (3), 177 (2020a).
88. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *INASAN Science Reports* **5**, 17 (2020b).
89. I. S. Savanov and E. S. Dmitrienko, *INASAN Science Reports* **5**, 272 (2020c).
90. I. S. Savanov, E. S. Dmitrienko, S. Karmakar, and J. C. Pandey, *Astronomy Reports* **62** (8), 532 (2018a).
91. I. S. Savanov, E. S. Kalinicheva, and E. S. Dmitrienko, *Astronomy Reports* **62** (5), 352 (2018b).
92. J. Scalo, L. Kaltenegger, A. G. Segura, et al., *Astrobiology* **7** (1), 85 (2007).
93. K. Schrijver, F. Bagenal, T. Bastian, et al., arXiv:1910.14022 (2019).
94. S. Seager and W. Bains, *Science Advances* **1** (2), e1500047 (2015).
95. V. I. Shematovich, *Solar System Research* **44** (2), 96 (2010).
96. V. I. Shematovich, *Russian Chemical Reviews* **88** (10), 1013 (2019).
97. V. I. Shematovich, in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, (Spec. Astrophys. Obs. Russian Acad. Sci., Nizhnij Arkhyz, 2020), pp. 224–230.
98. V. I. Shematovich and D. V. Bisikalo, *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science*, Ed. by P. Read, et al. (Oxford Univ. Press, 2017), id. 104.
99. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, C. Diéval, et al., *J. Geophysical Research (Space Physics)* **116** (A11), A11320 (2011).
100. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, J. C. Gérard, et al., *J. Geophysical Research (Planets)* **113** (E2), E02011 (2008).
101. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, J. C. Gérard, and B. Hubert, *Astronomy Reports* **63** (10), 835 (2019).
102. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and D. E. Ionov, *Astrophysics and Space Science Library*, **411**, p. 105 (2015).
103. V. I. Shematovich, D. V. Bisikalo, and A. G. Zhilkin, *Astronomy Reports* **65** (3), 203 (2021).
104. V. I. Shematovich, D. E. Ionov, and H. Lammer, *Astron. and Astrophys.* **571**, id. A94 (2014).
105. V. I. Shematovich and M. Y. Marov, *Physics Uspekhi* **61** (3), 217 (2018).
106. A. L. Shields, S. Ballard, and J. A. Johnson, *Physics Reports* **663**, 1 (2016).
107. L. Sproß, M. Scherf, V. I. Shematovich, et al., *Astronomy Reports* **65** (4), 275 (2021).
108. B. Stelzer, A. Marino, G. Micela, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **431** (3), 2063 (2013).
109. F. Tian, *Astrophys. J.* **703** (1), 905 (2009).
110. F. Tian, *Ann. Rev. of Earth and Planetary Sciences* **43**, 459 (2015a).
111. F. Tian, *Icarus* **258**, 50 (2015b).
112. F. Tian and S. Ida, *Nature Geoscience* **8** (3), 177 (2015).
113. Z.-L. Tu, M. Yang, H. F. Wang, and F. Y. Wang, *Astrophys. J. Suppl.* **253** (2), 35 (2021).

114. Z.-L. Tu, M. Yang, Z. J. Zhang, and F. Y. Wang, *Astrophys. J.* **890** (1), 46 (2020).
115. T. Van Doorselaere, H. Shariati, and J. Deboscher, *Astrophys. J. Suppl.* **232** (2), 26 (2017).
116. V. Van Eylen, C. Agentoft, M. S. Lundkvist, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **479** (4), 4786 (2018).
117. K. Vida, L. Kriskovics, K. Oláh, et al., *Astron. and Astrophys.* **590**, id. A11 (2016).
118. K. Vida, M. Leitzinger, L. Kriskovics, et al., *Astron. and Astrophys.* **623**, id. A49 (2019).
119. A. Vidal-Madjar, A. Lecavelier des Etangs, J. M. Désert, et al., *Nature* **422** (6928), 143 (2003).
120. H. Yang and J. Liu, *Astrophys. J. Suppl.* **241** (2), 29 (2019).
121. R. Yelle, H. Lammer, and W.-H. Ip, *Space Sci. Rev.* **139** (1–4), 437 (2008).
122. A. Youngblood, K. France, R. O. P. Loyd, et al., *Astrophys. J.* **824** (2), 101 (2016).

The Activity of Stars with Planetary Systems and Its Impact on the Loss of Atmosphere by Hot Exoplanets

I. S. Savanov¹ and V. I. Shematovich¹

¹Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

The review presents the results of a wide range of studies on modeling the atmospheres and shells of exoplanets and studying the processes associated with the activity of the parent star, performed at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences in recent years. The developed methods of analyzing superflares in solar-type stars are applied to stars with planetary systems and the obtained estimates are used to detail the conditions of extreme stellar activity in the study of atmospheric losses for Earth-type planets in low orbits—super-Earths and sub-Neptunes. The results of calculations of the rate of atmospheric loss for exoplanets in orbits close to the parent star (close-in exoplanets) are presented and it is shown that under conditions of a high level of stellar radiation rigidity, and even more so under conditions of a stellar flare, the contribution of exothermic photochemistry processes to the formation of a flow of supra-thermalhydrogen atoms escaping from the atmosphere becomes significant and comparable to the flow of hydrodynamic outflow. Accordingly, this source of supra-thermalhydrogen atoms should be included in modern aeronomic models of physical and chemical processes in the upper atmospheres of hot exoplanets. Taking into account the contribution of supra-thermal particles in the aeronomic model made it possible to clarify the heating rates of atmospheric gas due to the absorption of hard radiation from the parent star. This, in turn, made it possible to more accurately calculate the values of the rate of mass loss by atmospheres and, accordingly, to study the evolutionary properties of the atmospheres of hot exoplanets. It is also important to note that the kinetic and aeronomic models presented in the review, developed in recent years at the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, will be used to analyze and interpret existing and expected observations of the atmospheres of Earth-type exoplanets. Such work will allow to impose additional restrictions on the models and thereby make them more reliable.

Keywords: *stars: activity*