
НАБЛЮДЕНИЯ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОГНОЗА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

© 2023 г. В. И. Шематович^{1,*}, И. Ф. Шайхисламов², А. Г. Жилкин¹, И. С. Саванов¹,
Г. Н. Цуриков¹, Д. В. Бисикало^{3,1}

¹Институт астрономии РАН, Москва, Россия

²Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

³Национальный центр физики и математики, Саров, Россия

*e-mail: shematov@inasan.ru

Поступила в редакцию 16.08.2023 г.

После доработки 14.11.2023 г.

Принята к публикации 14.11.2023 г.

В статье рассмотрена взаимосвязь между космической погодой и атмосферами планет в Солнечной системе и в других звездных системах. Эта взаимосвязь имеет ряд аспектов, каждый из которых представляет собой фундаментальную проблему физики плазмы. Соединение всех составляющих в общую картину имеет исключительно важное практическое значение для современной цивилизации. Открытие экзопланет, и в особенности горячих газовых экзопланет, может проложить новые пути получения необходимых наблюдательных данных о воздействии вспышечной активности и корональных выбросов массы на околозвездное пространство и атмосферы планет, включая данные для прогноза экстремальных событий на Солнце и их воздействия на климат и космическую погоду Земли. Предложен новый инструмент для изучения и прогноза космической погоды в Солнечной системе и в других звездных системах посредством наблюдений за протяженными газовыми и плазменными оболочками горячих экзопланет. Данный подход требует совместного привлечения методов математического моделирования воздействия звездного ветра на атмосферы планет, новых данных лабораторной экспериментальной астрофизики, и наблюдений оболочек горячих экзопланет на космической обсерватории “Спектр-УФ”. Развитие данной тематики в Национальном центре физики и математики, в том числе в рамках направления “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика”, предполагает создание специализированного плазменного стенда для измерения скоростей реакций, важных для астрофизики, что позволит значительно обогатить научную программу планируемой к запуску российской космической обсерватории “Спектр-УФ”.

DOI: 10.56304/S2949609823010033, EDN: LCDISK

ВВЕДЕНИЕ

Физика космической плазмы прошла с началом космической эры невероятный путь развития. Наши экспериментальные и теоретические знания растут в геометрической прогрессии, стимулируя друг друга. Развитые концепции имеют общенаучный интерес и применяются в других областях физики.

Без понимания физики космической плазмы невозможно практическое освоение космического пространства. Одна из главных задач, имеющих концептуальное значение для человеческой цивилизации, состоит в создании надежных моделей прогноза космической погоды. Уже в настоящее время работа спутниковой инфраструктуры зависит от краткосрочного прогнозирования опасных перемен в состоянии околоземной плазмы. Очевидно, что в скором времени прогноз космической погоды будет не менее, и скорее всего даже в большей степени чем климатическая погода, интегрирован в повседневную экономическую деятельность.

Как и с атмосферой Земли и изменениями климата, прогноз космической погоды имеет краткосрочную и долгосрочную перспективу. Так же, как и с климатом, долгосрочное прогнозирование зачастую более важно для принятия стратегических решений в рамках всего человечества.

История показывает, что изменения атмосферного климата диктовали скачкообразный характер эволюции биосферы, а в отношении нашей цивилизации – технологического развития и глобальных социальных перемен. Есть определенные указания на основе анализа изотопа ^{14}C из колец деревьев и ледовых кернов, что космическая погода, связанная с космической плазмой, тоже оказывала влияние на биосферу [1–4].

Несмотря на то, что атмосферная погода и климат, также как космическая погода, в основном диктуются Солнцем, и не редко оказываются коррелированными и могут влиять друг на друга, физика процессов в достаточной степени различна, чтобы их изучать по отдельности. Настоящий обзор посвящен космической плазме и тому, как исследование горячих экзопланет может способствовать нашему пониманию процессов в околоземном пространстве и прогнозированию экстремальных проявлений солнечной активности.

Экстремальные солнечные события (ЭСС) условно можно разделить на 2 проявления: мощные вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). Оба оказывают сильнейшее влияние на состояние земной атмосферы и во многом определяют изменения климата. ЭСС существенно влияют на техногенную обстановку, в особенности, в полярных арктических областях. В частности, известно их воздействие на навигационные и коммуникационные системы, на функционирование космических платформ (см., например, [5]). Из аэрономических исследований известно, что воздействие ЭСС на земную атмосферу на высотах полярной верхней атмосферы приводит к существенным изменениям состава, степени ионизации и энергетического баланса атмосферы. Одним из важнейших проявлений данного воздействия является образование целого ряда химически активных малых компонент семейств водорода, углерода, азота и кислорода (ОН, О(1D, 1S), NO и др.) в существенной степени изменяющих химию и содержание озона в земной атмосфере. Соответственно, катастрофическими последствиями воздействий ЭСС становятся повышение уровня биологически опасного ультрафиолетового (УФ) излучения на поверхности, локальные изменения климата и значительные нарушения техногенной обстановки, в особенности в арктических областях.

Наиболее достоверной основой создания предиктивного анализа возникновения ЭСС на Солнце является наблюдение звезд, подобных Солнцу. Действительно, в этом случае мы можем определить частоту сверхмощных вспышек и даже установить их связь с эволюционным статусом подобной Солнцу звезды. Накопленная статистика (а она реально велика после проведения наблюдений с помощью космических телескопов Kepler и TESS) позволяет начать работы по прогнозу вспышечной активности Солнца. К сожалению, это утверждение относится только к одному фактору ЭСС – к вспышкам. Прямых измерений второго, более важного, фактора – КВМ – у нас нет. Достоверных не прямых измерений КВМ также совсем немного. Дело в том, что исследования Солнца не позволяют установить однозначную зависимость между параметрами вспышек и КВМ, причем довольно часто наблюдается только один из этих факторов. Это ограничивает применимость существующих моделей и, следовательно, достоверных не прямых измерений КВМ. Учитывая значимость фактора КВМ в ЭСС, в данной работе мы предлагаем механизм определения параметров КВМ по наблюдениям экзопланет, расположенных вблизи подобных Солнцу звезд. Запуск космической обсерватории Спектр-УФ позволит провести эти наблюдения и, как мы надеемся, даст необходимый материал для более полного прогноза активности Солнца.

1. ЗВЕЗДНАЯ АКТИВНОСТЬ

Многочисленные проявления активности звезд солнечного типа и холодных карликов поздних спектральных классов находят свое выражение в увеличенной вспышечной и пятенной активности, в высоких потоках излучения в рентгеновском и крайнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах спектра, а также в КВМ. Как правило, многие из этих свойств усилены у молодых объектов, и 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 КВМ.

1.1. Пятенная активность

В проводимых в Институте астрономии РАН исследований магнетизма карликов спектральных классов G–M и связанных с ним явлений получено решение ряда задач. По данным наблю-

дений космического телескопа “Кеплер” и миссии TESS, выполняются 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. Вращательно модулированные кривые блеска, доступные из архива миссий Кеплер и TESS, позволяют рассмотреть эволюцию пятнистости звезд. Эти результаты позволяют далее проанализировать возможные связи между пятнистостью и основными параметрами изучаемых объектов, а также провести сопоставление с запятненностью поверхности других звезд, не обладающих планетными системами. В дополнение к этому, возможно детальное изучение свойств отдельных уникальных звезд.

В работах [6–9] по фотометрическим наблюдениям космическим телескопом Кеплер 737 звезд, были изучены зависимости величины параметра запятненности поверхности от эффективной температуры и от периода осевого вращения. Получено три интересных факта. 1) Нет свидетельств того, что магнитная активность звезд с экзопланетами имеет ярко выраженные особенности, отличающие их от активности звезд более обширной выборки. 2) Площади пятен на поверхности звезд, включая звезд с экзопланетами, существенно, в несколько раз превосходят типичную площадь большой группы пятен на Солнце. 3) Данные о звездах с планетами, находящимися в зоне обитаемости, опубликованные в [10], позволили выполнить аналогичное изучение их активности. Есть указания на то, что распределения звезд с экзопланетами, находящимися в зоне обитаемости смещены в область меньших площадей пятен и периодов вращения, по сравнению с данными для всего массива звезд с экзопланетами.

1.2. Звездные вспышки

Наблюдения Кеплер и TESS открыли совершенно новые возможности в области исследования вспышечной активности звезд спектральных классов G–M благодаря высокой чувствительности и точности, непрерывности наблюдений с достаточной высокой временным разрешением для анализа вспышек и возможностью исследования десятков тысяч объектов. 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 прочее, можно найти в сериях статей, например [11, 12].

Один из первых однородных поисков звездных вспышек был осуществлен автором работы [13], 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. Особого упоминания заслуживает каталог вспышек, опубликованный в работе [14]. Он включает сведения о 162 262 вспышках для 3420 звезд. Авторы показали, что частота вспышек возрастает с уменьшением температуры звезд, что согласуется с теоретическими представлениями. Распределение частот вспышек от звезд F-типа до звезд M-типа подчиняется степенному распределению, 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.

Остановимся более подробно на результатах анализа данных для звезд солнечного типа. В работе [15] представлен анализ супервспышек с использованием данных TESS и программ автоматического поиска и последующего визуального контроля по данным наблюдений 2-х минутных экспозиций. Наблюдения в течение первого года выполнялись в 13 секторах и охватили южное полушарие неба, содержащее порядка 25000 звезд солнечного типа, и обнаружили 1216 супервспышек на 400 звездах. Обнаружена и исследована уникальная звезда, TIC43472154, которая проявила около 200 супервспышек в год. Кроме того, авторы исследования проанализировали корреляцию между энергией и длительностью супервспышек (длительность $T \sim E^\beta$). Получена величина степенного индекса, равного $\beta = 0.42 \pm 0.01$, что немного больше, чем $\beta = 1/3$, из тео-

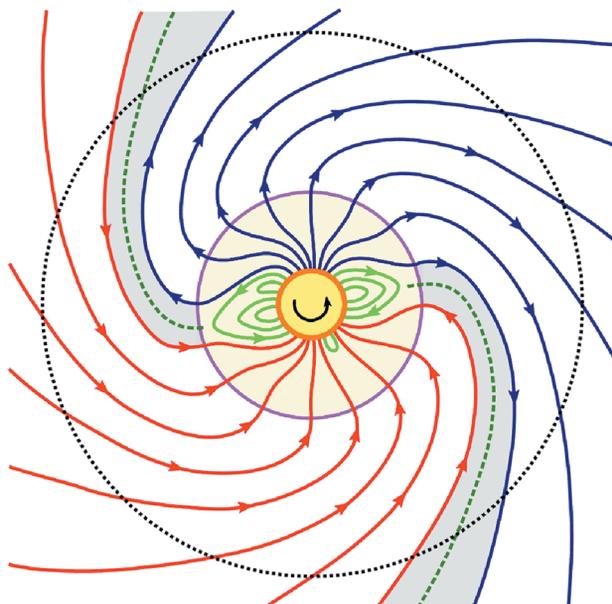


Рис. 1. Схематическое изображение структуры солнечного ветра в плоскости эклиптики. Солнце обозначено малым закрашенным кружком в центре. Стрелкой показано направление вращения Солнца. Граница среднего круга определяет область короны. Закрашенные серые области соответствуют зонам гелиосферного токового слоя (пунктирная линия, идущая от короны к периферии), разделяющего межпланетное магнитное поле различной полярности (магнитные линии идут от Солнца или к Солнцу). Орбита типичной горячей экзопланеты, расположенная в гелиосферной области, показана пунктирной окружностью.

ретических предсказаний. За второй год работы миссии TESS обнаружено 1272 супервспышек у 311 звезд солнечного типа по общим данным для 22539 объектов. В рассматриваемой выборке у трех объектов также обнаружены планеты.

1.3. Солнечный ветер

Поток заряженных частиц с Солнца, или солнечный ветер (СВ), составляет отдельную самостоятельную область космической плазмы и Солнечной физики. Формирование СВ в короне и его ускорение в области до десяти радиусов Солнца до сих пор остаются нерешенными проблемами, несмотря на значительный прогресс как в качестве и количестве имеющихся экспериментальных данных, так и в теории и численном моделировании. Проблема СВ тесно связана с проблемой нагрева короны. Даже если механизмы и процессы нагрева разные, СВ рождается как течение именно в горячей короне. В последнее время считается, что поток массы СВ обеспечивается хромосферными спикулами [16], а основными и независимыми механизмами нагрева считают микромасштабное пересоединение, движимое энергией турбулентности, а также альфвеновские волны. Альфвеновские волны, передавая импульс, также ускоряют ветер. Первичным драйвером, видимо, являются турбулентные движения в фотосфере и нижней хромосфере, энергия которых благодаря магнитному полю передается в корону и даже за пределы Солнца [17–19].

Как показывают многочисленные наземные и космические наблюдения, структура солнечного ветра является довольно сложной. В первом приближении его можно описать как совокупность трех отдельных потоков плазмы. Два высокоскоростных потока (быстрый ветер, ~ 700 км/с) имеют более низкую плотность и более высокую температуру. Они берут свое начало в корональных дырах в северной и южной полярных областях Солнца и текут преимущественно вдоль линий магнитного поля. Поскольку открытые магнитные силовые линии корональных дыр, идентифицируемых как области истечения быстрого ветра, начинаются под фотосферой и пронизывают всю гелиосферу, то нагрев короны и потока плазмы далеко за пределами короны представляется проявлением одного и того же механизма.

Третий низкоскоростной поток (медленный ветер, < 400 км/с) сосредоточен вблизи плоскости эклиптики. Он характеризуется относительно высокой плотностью и более низкой температурой. Медленный ветер начинается в области солнечной короны, где магнитное поле имеет

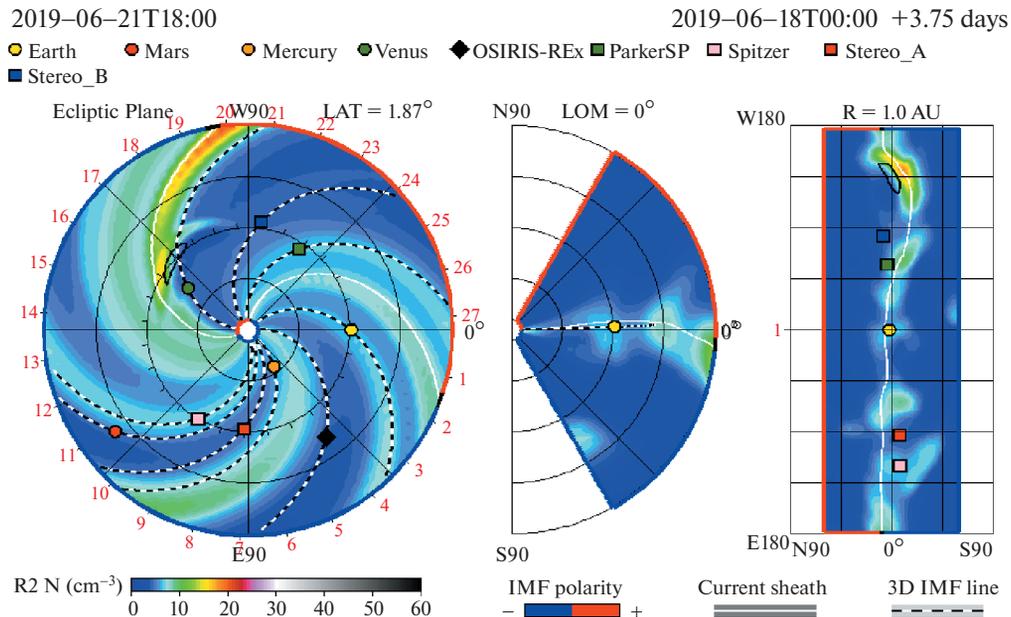


Рис. 2. Состояние солнечного ветра на конец июня 2019 г. по данным космических аппаратов. Показаны положения внутренних планет, магнитные линии, а также конфигурация гелиосферного токового слоя. Взято с сайта <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/iswa>.

сложную, существенно не радиальную конфигурацию. В частности, магнитные линии у основания гелиосферного токового слоя могут образовывать замкнутые шлемовидные петли. Различие в параметрах быстрого и медленного потока (в частности, металличности) также пока не нашло полного объяснения в моделях солнечного ветра [20].

Общая структура солнечного ветра в плоскости эклиптики схематически показана на рис. 1. В области короны магнитное поле в основном определяется собственным магнетизмом Солнца. На границе короны, которая находится на расстоянии в несколько радиусов Солнца, магнитное поле из-за формирующегося потока плазмы с большей точностью становится радиальным. За пределами короны расположена гелиосферная область, магнитное поле в которой в существенной мере определяется свойствами солнечного ветра. В этой области магнитные силовые линии с удалением от центра постепенно закручиваются в виде спирали вследствие вращения Солнца, и поэтому (особенно на больших расстояниях) магнитное поле ветра, может быть, с хорошей точностью описано с помощью простой модели Паркера [22].

Нейтральная плоскость, разделяющая между собой межпланетное магнитное поле противоположной полярности, немного наклонена к плоскости эклиптики. В результате, в самой плоскости эклиптики формируются два гелиосферных сектора с противоположной полярностью магнитного поля (см., например, [21]). Наблюдаемое магнитное поле в солнечном ветре имеет ярко выраженную секторную структуру. В одном секторе магнитные силовые линии направлены к Солнцу, а в противоположном секторе — от Солнца. Эти два сектора разделяет гелиосферный токовый слой, который вращается вместе с Солнцем и поэтому Земля при своем движении по орбите вокруг Солнца много раз за год пересекает его, переходя из сектора солнечного ветра с одной полярностью магнитного поля в соседний сектор с противоположной полярностью магнитного поля. В периоды солнечной активности линия, соответствующая гелиосферному токовому слою, сильно искажается и испытывает колебания.

Как уже упоминалось, формирование солнечного ветра в короне и его ускорение в области до 10 Rs до сих пор остаются нерешенными проблемами. Решение Паркера показало возможность газодинамического ускорения плазмы в условиях, когда скорость убегания значительно превышает тепловую скорость. Однако механизм нагрева плазмы в зоне ускорения, которая по теории и наблюдениям составляет до 0.1 а.е., остается предметом дискуссии. Для численного моделирования, с целью лучшего фитирования параметров солнечного ветра обычно используют политропные решения с эффективным показателем адиабаты γ , близким к единице, а не чисто изотермическое решение Паркера [22]. Однако, такой подход не является корректным в областях, где

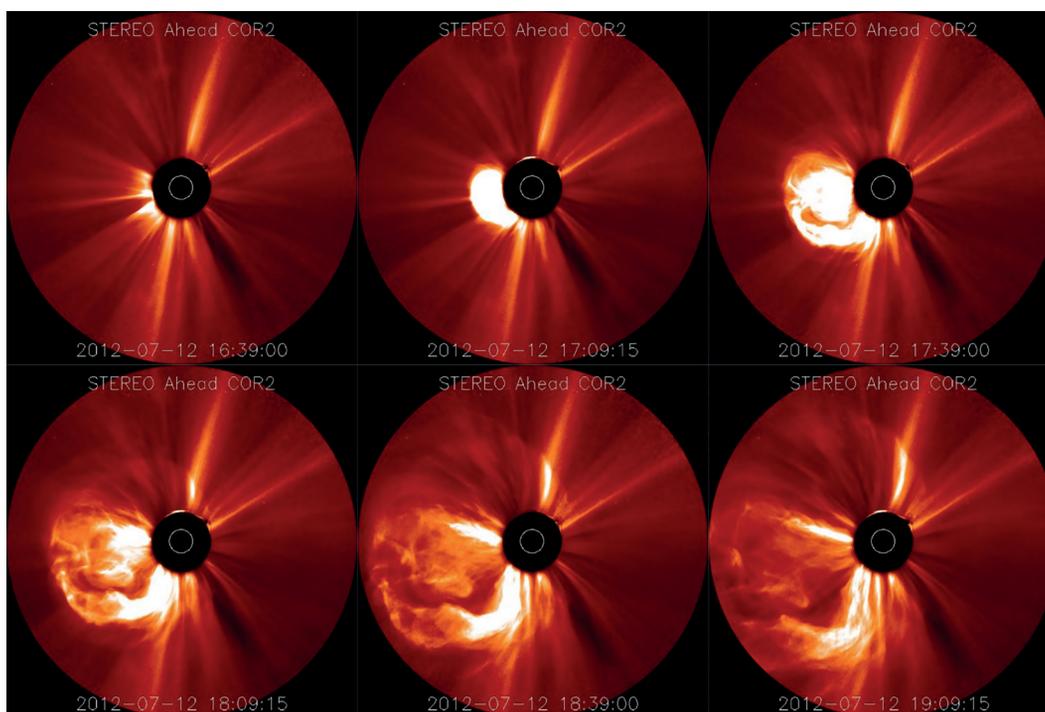


Рис. 3. Развитие коронального выброса массы от Солнца по наблюдениям 12 июля 2012 г. с помощью инструмента STEREO/COR2. Из работы [36].

солнечный ветер образует ударные волны. В рамках такой модели решения с ускоряющимся (скорость растет с расстоянием) ветром возможны лишь в случае, когда эффективный показатель адиабаты $\gamma < 3/2$. Анализ наблюдательных данных показывает, что на малых расстояниях от Солнца ($< 15 R_s$) эффективный показатель адиабаты $\gamma = 1.1$ [23, 24], в то время как на больших расстояниях $> 25 R_s$ его можно оценить величиной $\gamma = 1.46$ [25]. С точки зрения чисто адиабатической модели это означает присутствие в области ветра не только механизмов ускорения, но дополнительных процессов нагрева.

На рис. 2 представлена реальная структура солнечного ветра, полученная по данным с космических аппаратов на конец июня 2019 г. Этот момент соответствует последнему минимуму солнечной активности. На рис. 2 показаны текущие положения всех внутренних планет (включая Марс), избранные магнитные линии, а также конфигурация гелиосферного токового слоя, разделяющего два сектора солнечного ветра с различной полярностью межпланетного магнитного поля.

Если не учитывать секторную структуру солнечного ветра, то для описания его структуры в плоскости эклиптики можно использовать сферически симметричное приближение. В такой модели [26] из-за вращения Солнца скорость и магнитное поле ветра будут иметь не только радиальные, но и азимутальные компоненты. В стационарном МГД-решении, в отличие от газодинамического решения Паркера [22], присутствуют не одна (звуковая), а три особые точки: медленная и быстрая магнитозвуковые точки, а также альфвеновская точка. Альфвеновская точка, в которой радиальная скорость ветра равна альфвеновской скорости, разделяет всю гелиосферную область на внутреннюю суб-альфвеновскую и внешнюю сверх-альфвеновскую области. Из аналитического решения для спокойного Солнца следует, что в солнечном ветре альфвеновская точка расположена на расстоянии около $24 R_s$. В других работах эта величина оценивалась меньшими значениями (см., например, [27, 28]). В работе [29], на основе анализа солнечной активности за последние 250 лет, был сделан вывод о том, что альфвеновский радиус может варьироваться в довольно широких пределах от $15 R_s$ до $30 R_s$. Из этих оценок следует, что все планеты Солнечной системы расположены в сверх-альфвеновской зоне солнечного ветра. Это, в частности, приводит к тому, что магнитосферы (если они имеются) всех планет в Солнечной системе имеют схожую структуру, подобную структуре магнитосферы Земли. Они характеризуются такими элементами, как головная ударная волна, переходная область, магнитопауза, ра-

диационные пояса, магнитосферный хвост. Величина магнитного поля, а также скорость вращения звезд солнечного типа может отличаться от соответствующих параметров для Солнца [30, 31]. Эти обстоятельства могут существенно повлиять на структуру звездного ветра и условия обтекания экзопланет.

1.4. Корональные выбросы массы

Динамичные процессы на Солнце вызывают различные возмущения в солнечном ветре. Наиболее значительные представляют собой гигантские выбросы вещества из короны звезды в межпланетную среду — корональные выбросы массы. Эти явления характеризуются массой плазмы порядка 10^{14} – 10^{16} г, средней суммарной энергией около 10^{31} эрг и скоростями выброса, которые варьируются примерно от 20 км/с до 3000 км/с, со средними значениями порядка 500 км/с [32–34]. КВМ распространяется со сверхзвуковой скоростью, поэтому это приводит к образованию ударных волн в СВ. Как средняя скорость, так и частота возникновения КВМ меняются в ходе цикла солнечной активности. В период солнечного минимума возникает примерно один КВМ за два дня. Во время солнечного максимума число выбросов может достигать 4 в день [33]. В среднем, за полный солнечный цикл КВМ воздействуют на Землю примерно дважды в месяц [35].

На рис. 3 представлен пример распространения КВМ в направлении Венеры, что привело к его взаимодействию с ионосферной оболочкой этой планеты. В области выброса структура СВ существенно возмущена. На рис. 3 показано наблюдение КВМ 12 июля 2012 года с помощью коронографического прибора STEREO-Ahead COR2 [36]. Скорость этого КВМ была определена с помощью дополнительных многоточечных коронографических снимков (с помощью инструментов STEREO-Behind и SOHO) и прямого моделирования трехмерной формы КВМ. В результате получено значение примерно 1300 км/с [37].

В отличие от СВ, КВМ, имеют иную природу. Если нагрев короны и СВ требует распределенного в пространстве и времени процесса [38], то КВМ является результатом локального накопления магнитной энергии и ее относительно быстрого высвобождения с выбросом большого количества энергичной плазмы [39]. КВМ напрямую связаны с магнитной активностью Солнца, которая, как и у других звезд, имеет циклический характер. Теория солнечного динамо, призванная объяснить магнитную цикличность и активность, также пока не может ответить на многие принципиальные вопросы [40]. Развитые к настоящему времени сценарии и физические процессы, описывающие вспышки и КВМ, дают в целом самосогласованную картину явления, но все еще не позволяют предсказать качественные и количественные параметры [41].

Ретроспективный анализ вспышки Каррингтона показал, что могут происходить события, которые в настоящий момент развития цивилизации способны нанести колоссальный экономический и, как следствие, социальный урон. Однако для прогноза, как конкретных событий, так и статистических вероятностей, нет необходимого теоретического задела, поскольку нет нужных экспериментальных данных. До сих пор не имеется ограничивающей оценки на максимальные параметры КВМ, которые можно ожидать от Солнца. Именно прогнозирование КВМ и их потенциального воздействия является первоочередной задачей прогноза космической погоды. С этой целью быстро прогрессирует постоянный мониторинг Солнца и анализ данных в реальном времени [42], что позволяет оценивать силу потенциального воздействия на Землю от событий, произошедших на Солнце, но которые достигнут Земли через ~ 10 часов.

Активность Солнца, связанная с корональными выбросами массы, является важным фактором, влияющим на магнитосферы, атмосферы и поверхности планет Солнечной системы. Явления КВМ, очевидно, следует ожидать и на других звездах. Основными факторами воздействия звездных КВМ на экзопланеты являются ударные волны, сопутствующие им возрастания плотности, скорости и магнитного поля звездного ветра, выпадение энергичных заряженных частиц. Все эти факторы необходимо учитывать при интерпретации наблюдений и изучении эволюционных процессов на экзопланетах и их атмосферно-плазменных оболочках, принимая во внимание возраст звезды, ее спектральный тип и орбитальное расстояние планеты.

Как уже отмечалось выше, изучения звездных КВМ (их масс, скоростей, частот появления) более затруднены, поскольку они остаются пока недоступны для прямых измерений. Их анализ основан на спектральных наблюдениях звезд, их вспышечной и пятенной активности, на исследованиях излучения объектов в рентгеновском, FUV, UV и радио-диапазонах. Достаточно часто для оценки свойств КВМ используют эмпирическую зависимость, связывающую энергию вспышки и массу КВМ [43]. 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 КВМ до 10^{22} г. Отметим, что зависимость из [43] была установлена по измерениям энергии вспышек в рентгеновском диапазоне спектра, поэтому, аналогично [44], часто используется скорректированное соотношение, в котором рассматривается болометрическая энергия вспышки. Данный метод имеет ограничения, прежде всего, вызванные принципиальным распространением солнечной аналогии на звезды других спектральных классов и статистическим характером анализа.

Применение зависимости к данным наблюдений 763 объектов по первым наблюдениям миссии TESS привело к выводу о том, что для них характерная величина массы КВМ составляет 10^{19} г (медианное значение), диапазон изменений — от 10^{18} до 10^{32} г для наиболее массивного КВМ. Автор работы [45] рассмотрел результаты исследования [46], содержащего сведения о 162262 вспышках для 3420 звезд. По методике, представленной в [44], на основе данных о средних энергиях вспышек было установлено, что для 3020 объектов из [46] диапазон изменений масс КВМ составляет 10^{19} – 10^{22} г, при этом по мере перехода к более горячим (более массивным) звездам наблюдается рост массы КВМ. Звезды солнечного типа, согласно оценке, основанной на использовании энергии вспышек, должны обладать КВМ с массами от 3×10^{20} 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, а также недостаточным временным интервалом наблюдения Солнца.

В работе [47], на основе данных наблюдений телескопа Кеплер, выполненных только в режиме LC seta Q15, представлены результаты исследования вспышечной активности 6662 звезд, для которых в общей сложности было зарегистрировано 16850 вспышек. По этим данным были определены массы КВМ для всех вспышек. Было найдено, что для звезд с T_{eff} в диапазоне от 3500 до 6000 К массы КВМ лежат в пределах от 10^{20} до 10^{21} г. Амплитуда изменений величин $\log M_{\text{КВМ}}$ для звезд солнечного типа составляет 19.5–21.3. В предположении о применимости калибровки из [43], в целом можно заключить, что оба каталога указывают на характерный диапазон изменений масс КВМ от 3×10^{19} до 3×10^{21} г.

Систематически более высокая энергетика КВМ, определенная для солнцеподобных звезд, наглядно подтверждает необходимость уточнения используемых моделей. Очевидным способом их корректировки является сравнение параметров, полученных косвенными методами, с результатами прямого детектирования параметров солнечного ветра и КВМ.

Еще один способ оценок характеристик КВМ основан на изучении абсорбционных и эмиссионных деталей профилей Бальмеровских линий видимого и УФ-спектральных диапазонов у звезд как солнечного типа, так и более холодных. Детальное обсуждение достигнутых результатов для карликов спектрального класса М приводится в статье [48], а для звезд солнечного типа — в работе [49]. При этом исследования последних трех десятилетий содержали, как правило, результаты анализа одной или нескольких звезд и лишь нескольких событий (обзор литературы можно найти в работе [49]).

Одно из первых обширных исследований было выполнено авторами работы [50], которые рассмотрели 473 спектра, полученные для 28 М-карликов. В исследовании [48] изучено 5500 спектров М-карликов и установлено, 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 события в сутки. Измеренные по доплеровскому смещению скорости КВМ соответствуют величинам 100–300 км/с. Соответствующие массы КВМ составляют 10^{15} – 10^{18} г. Имеются указания, что события являются более частыми у более холодных звезд с более высокой хромосферной активностью. Ценность метода определений характеристик КВМ по спектральным наблюдениям состоит в том, что он дает возможность найти как кинематические характеристики, так и оценку частоты появления событий. В работе [49] из анализа спектров видимого диапазона 425 F–К карликов, полученных в ходе 3700 часов наблюдений, отмечено, что было зарегистрировано лишь несколько вспышек и сделан вывод о малом числе проявлений КВМ. Авторы пришли к заключению, что столь низкий уровень обнаруженной активности исследованных объектов обусловлен двумя причинами — не только самой низкой активностью, но и наблюдательными ограничениями, вызванными недостаточностью продолжительности наблюдений.

К настоящему времени стали доступны результаты комплексных исследований вспышечной активности и проявлений КВМ на основе координированных фотометрических (в том числе космических) и спектральных наблюдений. В исследовании [51] проведены долгосрочные спек-

троскопические наблюдения с высоким временным разрешением линии $H\alpha$ молодой звезды солнечного типа EK Dra (G1.5V, возраст ≈ 100 My). В результате супер-вспышки на этой звезде солнечного типа с энергией 2.0×10^{33} эрг были выявлены свидетельства КВМ в виде смещенной в синюю сторону компоненты “поглощения” в линии $H\alpha$ с высокой скоростью -510 км/с. Индикатор поглощения является неоспоримым доказательством извержения вещества на звезде. Авторы также провели анализ аналогичного события на “Солнце, как на звезде” и обнаружили, что временная эволюция спектров очень напоминает временную эволюцию звездного события. Это указывает на то, что картина КВМ на звезде EK Dra очень похожа на ту, что наблюдается на Солнце, хотя энергетический масштаб и скорость различны. В частности, авторы работы [51] заключили, что рассчитанная масса КВМ 10^{18} г в десять раз больше, чем у крупнейших солнечных КВМ. Исследования такого рода дают ценные результаты, поскольку позволяют оценить, как КВМ влияют на космическую погоду молодых экзопланет, в том числе молодых экзоземель.

К сожалению, несмотря на большой объем ценной информации о КВМ, вопрос о ее достоверности и возможности использования для предсказаний космической погоды на Земле остается открытым. Действительно, та же группа авторов обнаружила, что еще одна сверхвспышка на EK Dra с гораздо большей энергией 2.6×10^{34} эрг не показала каких-либо признаков КВМ [52]. Кроме того, существует систематическое превышение масс КВМ, найденных по эмпирическим зависимостям от энергий вспышек, над массами, найденными по асимметрии профилей Бальмеровских линий водорода. Согласно работе [53], данные для одного и того же объекта могут существенно различаться между собой. Несомненно, что дополнительные и независимые данные, полученные из наблюдений транзитов экзопланет, могут оказать решающее значение для такого рода исследований.

2. ПЛАНЕТНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Важным аспектом космической погоды является планетарный магнетизм. Как показывает пример Солнечной системы, характер взаимодействия и степень воздействия на околопланетное космическое пространство сильно зависит от величины магнитного поля планеты. Планетарный магнетизм описывается теорией динамо, которая для Земли была заложена в работах [54] и развивалась с использованием численного моделирования [55]. Несмотря на то, что основные механизмы считаются выясненными — конвективные движения вращающейся проводящей жидкости, явление слишком сложное и оказывается специфичным для каждого объекта. Интересным аспектом является квазипериодический характер динамо. На Земле изменения полярности магнитного поля происходят достаточно часто, и точка минимума ожидается через несколько тысяч лет. К сожалению, палеонтологических данных, позволяющих оценить, насколько менялось воздействие на климат и биосферу в периоды минимума поля, слишком мало [56].

Модель динамо включает множество свободных параметров, точное знание которых для тех или иных планет недоступно. Существует ряд работ, посвященных адаптации теории динамо на планеты Солнечной системы и их спутники, в которых обсуждаются причины несовпадения значений предсказанной и измеренной напряженностей магнитных полей, а также направления вектора магнитной индукции. Обнаружение глобального магнитного поля Меркурия [57] стало неожиданным, поскольку теория предсказывала для него не более чем локальный остаточный магнетизм, как на Луне. Применение модели динамо, аналогичной Земному дало результат в 30 раз больше измеренного [58]. В работе [58] предложена другая модель, учитывающая застывание ядра и уменьшения области, занимаемой конвективными потоками, а также глубинный скин-эффект. Более существенное различие между теоретическими предсказаниями и измерениями было обнаружено у Венеры: ее магнитное поле оказалось в 1000 раз слабее. Согласно предположению, высказанному в работе [59], такое несовпадение может быть связано с отсутствием тектоники плит и снижением конвективных потоков. Несмотря на то, что газовые гиганты Солнечной системы Сатурн и Юпитер не располагают преимущественно железными ядрами, все же обладают большими магнитными полями. Согласно выводам статьи [60], причиной сильного планетарного магнетизма этих планет является высокое давление в их недрах, из-за чего водород, составляющий эти планеты, переходит в металлическую фазу и выполняет роль динамо-машины.

Как можно сделать вывод на примере Солнечной системы, для каждой из планет имеют место существенно различные обстоятельства возникновения магнитных полей. Сведения о магнитных полях экзопланет, при условии нахождения способа их дистанционного детектирования, позволят существенно расширить наши знания о причине наличия такового у планет Солнечной

системы. По причине удаленности и недостижимости других планетарных систем, надежды на определение магнитных полей экзопланет связаны с наблюдениями в оптическом и радиодиапазонах. Поиск магнитных полей по наблюдению аврорального радиоизлучения, аналог которого хорошо известен в Солнечной системе, пока не дал результатов. Оптимистичные оценки возможности наблюдений радиоизлучения у горячих экзопланет ([61], [62]) не подтвердились измерениями [63]. Существует необходимость в иных методах определения магнитных полей экзопланет.

В работе [64] было описано определение величины и направления магнитного поля кометы по поглощению в хвосте в линиях натриевого дуплета из-за эффекта атомного выстраивания. Населенности магнитных подуровней отклоняются от статистического распределения при взаимодействии поглощающего вещества с магнитным полем и излучением Солнца, что делает возможным определение величины и направления поля. Позднее теория атомного выстраивания была применена в работе [65] для определения полей в звездных фотосферах. На данный момент накоплено достаточное количество транзитных поглощений экзопланет в мультиплетных линиях, и возможно, что применение теории атомного выстраивания для обнаружения магнитных полей экзопланет – дело ближайшего будущего.

3. ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА И КВМ С ОБОЛОЧКАМИ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ

Обобщая предыдущие разделы, можно констатировать следующее. Солнце является типичным представителем обширного класса с параметрами и историей, подобными для очень многих других звезд. Магнитная и вспышечная активность этих звезд исследуется уже на протяжении десятков лет, причем в последние годы, с запуском специализированных миссий, количество наблюдений резко выросло. Несмотря на то, что качество этих наблюдений несопоставимо ниже, чем наблюдения Солнца, большое количество объектов позволяет делать сравнительный и статистический анализ, который накладывает фундаментальные ограничения на наши теории Солнца с одной стороны, и стимулирует их с другой.

Обнаружение экзопланет открывает в астрофизике и других областях науки совершенно новые пути развития как имеющихся, так и новых концепций. Открыт новый класс планет – горячих Юпитеров, которых нет в Солнечной системе. Оказалось, что у многих звезд есть газовые планеты на очень близких орбитах (в десять раз ближе, чем Меркурий к Солнцу). Из-за этого энергичная часть радиации звезды ионизует и нагревает верхнюю гелио-водородную атмосферу планеты до температуры порядка 10000 К. Этого оказывается достаточным для формирования газодинамического сверхзвукового истечения. Отметим, что такого явления не наблюдается в Солнечной системе, а попадание атмосферных частиц в космическое пространство происходит за счет механизма Джинса и прямого взаимодействия с Солнечным ветром.

Наличие вокруг планеты плотной частично-ионизованной оболочки, которая простирается на несколько радиусов планеты и даже выходит за пределы полости Роша, приводит к двум важным эффектам. Первое, некоторые наиболее сильные спектральные переходы элементов, составляющих атмосферу, включая тяжелые элементы, эффективно поглощают звездные линии излучения, что можно наблюдать в транзитных измерениях. Второе, совершенно новым становится характер взаимодействия оболочки планеты с потоком плазмы звездного ветра (ЗВ). Это взаимодействие проявляется в спектральных транзитных наблюдениях и тем самым открывается уникальная возможность получать сведения о параметрах звездного ветра.

3.1. Определение параметров звездного ветра по наблюдениям в линиях $\text{Ly}\alpha$ и $\text{HeI}(2^3\text{S})$

Линия $\text{Ly}\alpha$ с длиной волны 1216 Å является самой сильной в спектре звезд и широко используется для самых разных астрофизических исследований и методик. Несмотря на поглощение в межзвездной среде, эта линия наблюдается от звезд в окрестности несколько сотен парсек. Типичная ширина линии порядка 0.3 Å (порядка 100 км/с в единицах Доплеровской скорости) позволяет хорошо разрешать различные участки линии и проводить измерения с высоким разрешением. Диапазон вакуумного ультрафиолета не проходит через Земную атмосферу. В эпоху начала экзопланетных исследований и вплоть до последнего времени телескоп Хаббл был единственным инструментом наблюдений этой линии.

Еще на заре исследования экзопланетных атмосфер в 2003 г. телескопом Хаббл было зарегистрировано поглощение звездной линии $\text{Ly}\alpha$ на уровне 6% при транзитах горячего Юпитера

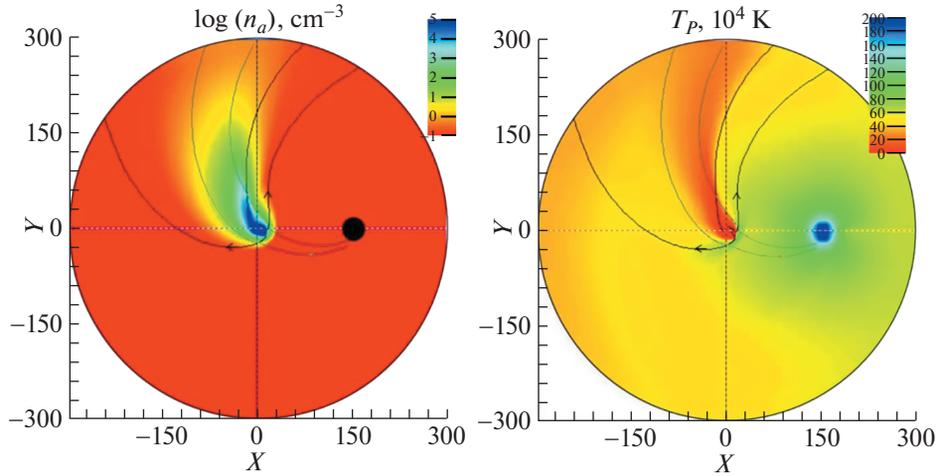


Рис. 4. Распределение плотности атомарного водорода (слева) и температуры протонов (справа) в экваториальной плоскости (X – Y), рассчитанное для типичных параметров системы GJ436. Планета расположена в центре системы координат, а звезда на $X = 158$. Черные и коричневые линии показывают линии течения атомов водорода и протонов соответственно. Из работы [74].

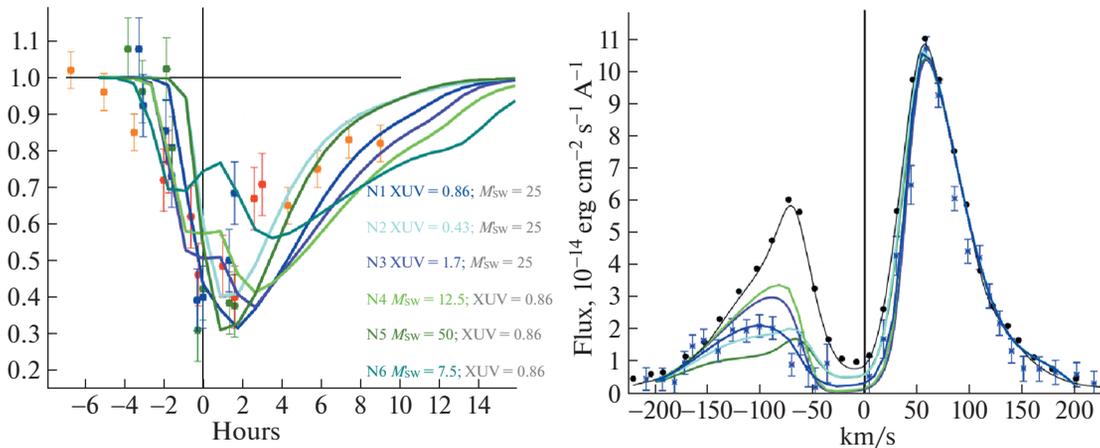


Рис. 5. Левая панель: транзитные кривые блеска GJ 436b в голубом крыле линии $\text{Ly}\alpha$ ($[-120, -40]$ км/с), смоделированные при различной интегральной интенсивности ионизирующей радиации (XUV, в эрг/см²/с на 1 а.е.) и скорости потери массы в звездном ветре (M_{sw} , в 10^{10} г/с). Правая панель: соответствующие смоделированные профили линии $\text{Ly}\alpha$ в середине транзита. Измеренные профили линии вне транзита и в середине транзита показаны черными кружками и синими звездочками соответственно.

Осирис-HD209458b [66–68], при площади покрытия планетой диска звезды 1.5%, что указывало на существование плотной экзосферы атомов водорода вокруг планеты, которое простирается на несколько планетарных радиусов. Численное одномерное и трехмерное моделирование кодами различной сложности [69–71] показало, что это поглощение хорошо объясняется нагревом и ионизацией верхней атмосферы, и ее расширением за счет повышения температуры примерно до 10000 K, при том что нижняя атмосфера имеет температуру примерно 1000 K. Поглощение линии $\text{Ly}\alpha$ на крыльях с Доплеровским смещением ~ 100 км/с создается плотным газом в пределах полости Роша за счет естественной ширины линии (т.н. атмосферное уширение линии). Аналогичной величины поглощение было получено также для горячего Юпитера HD189733b. Однако эта планета вращается вокруг активного красного карлика и измерения отличались не повторяемостью в наблюдениях, выполненных в различное время, варьируясь от 0 до 5%. Как показано в работе [72], это можно объяснить сильными изменениями в уровне ионизирующего излучения и интенсивности звездного ветра, что согласуется с известной активностью данной звезды.

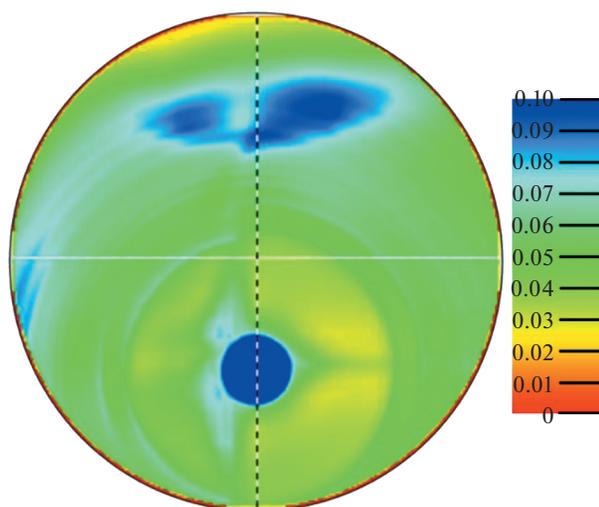


Рис. 6. Распределение поглощения в линии He I 10830 Å по диску звезды в интервале Доплеровских скоростей [−25; 25] км/с. Закрашенный синий кружок обозначает планету. Максимальное поглощение наблюдается в области ударной волны (синие области в отдалении от планеты).

Наиболее ярким примером взаимодействия планетарного и звездного вещества и поглощения в линии $\text{Ly}\alpha$ является теплый Нептун GJ 436b. Телескоп Хаббл в серии наблюдений измерил в 2014–2017 гг. поглощение до 65% в синем крыле $\text{Ly}\alpha$ в диапазоне скоростей [−120; −40] км/с. При этом поглощение начиналось задолго до вхождения планеты в транзит и продолжалось порядка 10 часов после транзита. Это свидетельствовало о плотной водородной оболочке, занимающей значительную часть орбиты планеты. При этом атомы в данной оболочке двигались с такими скоростями от звезды, которые невозможно ожидать от планетарного вещества. Еще в работе [73] было предположено, что протоны звездного ветра в перезарядке с атомами планетарного ветра должны генерировать энергичные нейтральные атомы (ЭНА), хорошо известные в экзосферах планет Солнечной системы. Оказалось, что наблюдения поглощения в линии $\text{Ly}\alpha$ в транзитах GJ 436b можно объяснить только образованием ЭНА, причем в ударном слое, формируемым ЗВ при столкновении с планетарным течением ([74], рис. 4). В силу этого, начало, глубина транзита и затянутый выход определяются как ионизирующей радиацией звезды, формирующей планетарное течение, так и параметрами звездного ветра, который генерирует ЭНА (рис. 5).

Фитирование расчетов с наблюдениями позволили впервые для звезды, отличной от Солнца, на основе спектральных наблюдений и моделирования процессов, известных в Солнечной системе, оценить параметры плазменного ветра, которые оказались в целом аналогичными Солнечному ветру. А именно, терминальная скорость 400 км/с (170 км/с на орбите планеты), концентрация протонов на орбите планеты 4000 см^{-3} , интегральный поток массы $2.5 \times 10^{10} \text{ г/с}$, что в десять раз меньше средней величины для Солнца и примерно соответствует размеру звезды GJ436.

Второй пример, который демонстрирует наблюдательные проявления взаимодействия ЗВ с планетарной атмосферой – теплый нептун GJ 4370b. Замечательным является тот факт, что поглощение проявляется как в водородной линии $\text{Ly}\alpha$, так и в линии метастабильного гелия He I(2^3S).

3.2. Определение параметров звездного ветра и КВМ по изменению формы оболочки горячей экзопланеты

Результаты трехмерного газодинамического моделирования взаимодействия звездного ветра и его флуктуаций, вызванных КВМ, с протяженной оболочкой “горячего юпитера” представлены в работах [79–83]. В качестве начальных условий использовались результаты моделирования протяженной оболочки HD 209458b, а параметры КВМ брались аналогичными солнечным на расстоянии, соответствующем орбите экзопланеты. Так, в статье [79] использовались данные,

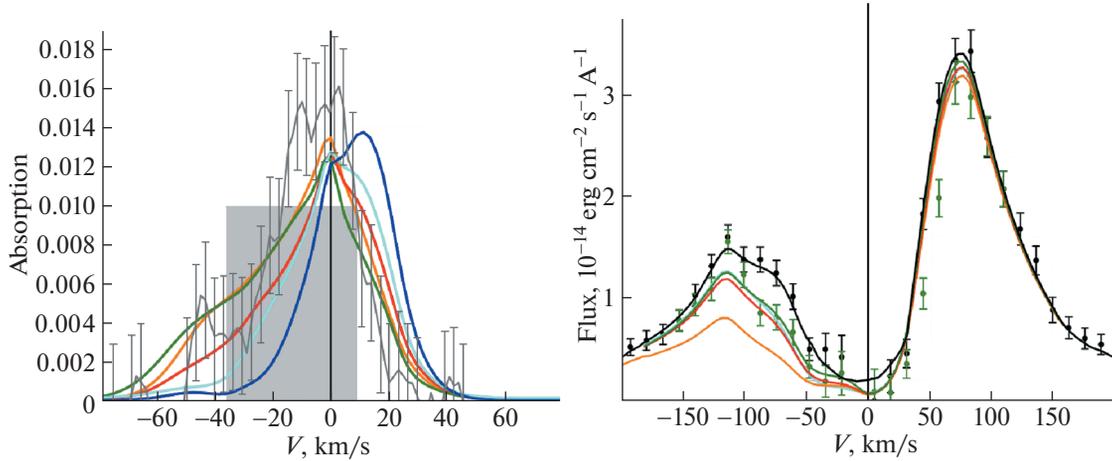


Рис. 7. Левая панель: Профили поглощения линии He 10830 Å в доплеровских единицах скорости, смоделированные при различной интегральной интенсивности ионизирующей радиации и скорости потери массы в звездном ветре. Серый квадрат представляет собой интегральные измерения, представленные в работе [75]. Серая линия с барами — измерение из работы [76] со спектральным разрешением.

Правая панель: соответствующие профили поглощения линии Ly α . Черные и зеленые точки с планками погрешностей показывают измерения вне и в середине транзита соответственно, воспроизведено из [77]. Рисунок из работы [78].

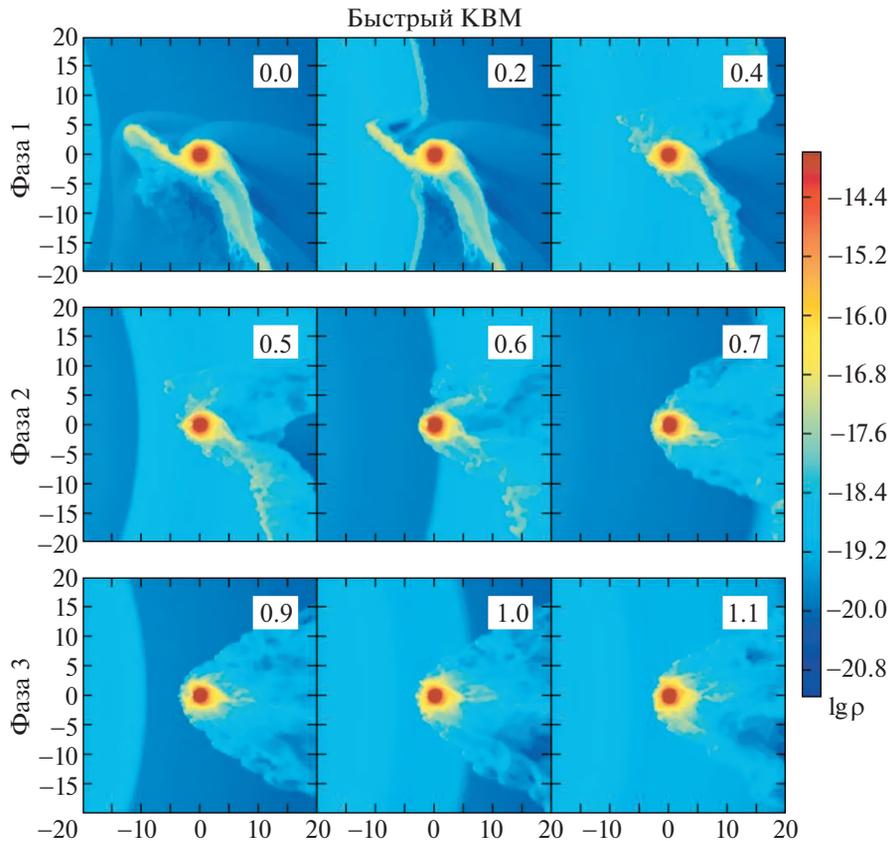


Рис. 8. Распределение плотности в плоскости орбиты “горячего юпитера” с квазизамкнутой оболочкой при взаимодействии с быстрым КВМ. Время в часах приводится в правом верхнем углу каждой панели. Звезда расположена слева, за границей расчетной области. Все размеры указаны в радиусах планеты.

соответствующие КВМ, зарегистрированному 12 апреля 1998 г. [84]. Скорость среднего КВМ в соответствии с этими оценками была взята равной 1300 км/с. Типичный КВМ состоит из трех фаз с существенно различными параметрами ветра: ударной волны, раннего и позднего КВМ. Помимо этого, амплитуда возмущений меняется в процессе распространения КВМ. Для определения характеристик на расстоянии, соответствующем орбите HD 209458b, характеристики, определенные на орбите Земли, соответствующим образом были пересчитаны. Рассматривались три различных КВМ – быстрое, среднее и медленное, со скоростями 3000, 1300 и 600 км/с, и продолжительностью 1.3, 3.0 и 6.4 ч соответственно.

Для всех трех КВМ воздействие на течение оказалось примерно сходным, так что на рис. 8 представлено решение только для быстрого КВМ продолжительностью 1.3 ч. Показано распределение плотности в орбитальной плоскости планеты для девяти моментов времени, по три на каждую фазу КВМ. Динамическое давление ветра в ударной волне КВМ на 4 порядка превосходит давление невозмущенного ветра. Поэтому уже на самой первой фазе фронт ударной волны КВМ практически полностью уничтожает протяженную оболочку (поток из окрестности внутренней точки Лагранжа L_1), не затрагивая, впрочем, атмосферу внутри полости Роша планеты. Следующая фаза раннего КВМ оказывает меньший эффект, однако его оказывается достаточно, чтобы запереть атмосферу внутри полости Роша планеты и окончательно остановить истечение из точек Лагранжа L_1 и L_2 . Аналогичную картину можно наблюдать и в течение третьей фазы позднего КВМ.

Как видно из рис. 8, в процессе взаимодействия КВМ с “горячим юпитером” происходит существенное изменение формы его протяженной оболочки. Ее вещество рассеивается, и размеры наиболее плотной части уменьшаются. Соответственно изменяются форма и положение головной ударной волны. На восстановление оболочки требуется некоторое время, порядка орбитального периода. Очевидно, что наблюдательные проявления в УФ-диапазоне возмущенной протяженной оболочки “горячего юпитера” при транзите должны отличаться от невозмущенной оболочки [85]. При этом должна изменяться как предтранзитная часть (игресс), так и посттранзитная (эгресс). Это дает дополнительные возможности исследования свойств как звездного ветра, так и КВМ.

В области КВМ возмущаются не только газодинамические величины (плотность, скорость, температура), но и величина магнитного поля [84]. Представленные выше расчеты описывают ситуацию, когда планета находится в сверхальфвеновской зоне звездного ветра, достаточно далеко от альфвеновской точки. Магнитное поле ветра при этом оказывается достаточно слабым и его влияние в первом приближении можно пренебречь. Если планета расположена глубоко в субальфвеновской зоне звездного ветра, то вокруг нее ударная волна не возникает. Однако, если орбита планеты располагается вблизи альфвеновской точки, то процесс взаимодействия КВМ с магнитосферой может оказаться более сложным и интересным. Для “горячих юпитеров” такой случай должен быть весьма распространенным [86].

Рассмотрим ситуацию, когда планета находится вблизи альфвеновской точки, но со стороны субальфвеновской зоны ветра. Как показывает анализ, на второй фазе КВМ режим течения должен оставаться безударным, поскольку на этой фазе альфвеновское число Маха меньше невозмущенного значения. На первой и третьей фазах альфвеновское число Маха, наоборот, увеличивается по сравнению с невозмущенным значением. Этого может оказаться достаточно, чтобы скорость обтекания стала больше быстрой магнитозвуковой скорости либо на третьей фазе КВМ, либо сразу на первой и третьей фазах. В первом случае на третьей фазе КВМ возникнет головная ударная волна, которая снова исчезнет по окончании всего процесса и возвращения системы к исходному невозмущенному состоянию. Во втором случае ударная волна возникает уже на первой фазе, на второй фазе она исчезает, затем снова возникает на третьей фазе и, наконец, окончательно исчезает после прохождения КВМ. Аналогичная сложная картина взаимодействия может возникать, когда “горячий юпитер” находится вблизи альфвеновской точки, но со стороны сверхальфвеновской зоны ветра.

Возникновение или исчезновение ударной волны также может приводить к наблюдаемым эффектам. Одним из возможных проявлений, связанных с наличием ударной волны, может быть излучение и поглощение в УФ и рентгеновской частях спектра. Учитывая относительно высокую светимость головной ударной волны, эффект ее возникновения и исчезновения может быть обнаружен в ходе УФ и рентгеновских наблюдений экзопланет в момент прохождения КВМ (см., например, [87]). Это дает дополнительную возможность использовать такие данные в качестве средства диагностики звездного ветра. Другое возможное наблюдательное проявление перехода течения из ударного в безударный режим и обратно может быть связано с изменением

темпа перезарядки между плазмой звездного ветра и газом атмосферы “горячего юпитера”. Этот процесс приводит к появлению высокоэнергетических частиц в газе и к соответствующему уширению линий поглощения в атмосфере “горячего юпитера” ([71, 88]). Исчезновение ударной волны должно приводить к падению плотности вещества звездного ветра, непосредственно взаимодействующего с атмосферой “горячего юпитера” и к соответствующему уменьшению темпа перезарядки. Изменение линий поглощения во время прохода КВМ может дать дополнительную информацию как о свойствах атмосферы ГЮ, так и о параметрах звездного ветра. Потенциально этот эффект может наблюдаться не только для транзитных “горячих юпитеров”, что дает уникальную возможность открытия экзопланет, обнаружение которых другими способами невозможно. Кроме того, анализ изменения УФ и рентгеновского потока дает возможность оценить параметры звездного ветра удаленных звезд, что также весьма затруднительно сделать другими способами.

4. КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП “СПЕКТР-УФ” КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ГОРЯЧИХ ЭКЗОПЛАНЕТ

На протяжении более чем четырех десятилетий, у астрономов существует практически непрерывный доступ к новым космическим данным в ультрафиолетовом диапазоне длин волн (1000–3000 Å). Эти данные получены исключительно внеатмосферными телескопами, ввиду поглощения земной атмосферой основной части приходящего излучения в рассматриваемом спектральном диапазоне.

Большой вклад для развития тех направлений исследования, которые рассматриваются в данной статье, внесли следующие космические миссии: International Ultraviolet Explorer (IUE) (время работы: 1978–1996, спектральный диапазон: 1150–3200 Å); АСТРОН (1983–1989, 1100–3500 Å); Hubble Space Telescope (HST) (1990 – по настоящее время, 1150–10000 Å); Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE) (1992–2001, 70–760 Å); Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE) (1999–2007, 905–1195 Å). С помощью космического телескопа IUE впервые были получены спектры высокого разрешения ($R \approx 10000$) для звезд F–M спектрального класса в УФ-диапазоне. Наблюдения, полученные с помощью спектрографов COS и STIS телескопа Хаббл, в свою очередь, внесли существенный вклад в развитие современной астрономии, в том числе в исследования экзопланет и их атмосфер, исследования активности звезд и ее влияния на формирование и эволюцию атмосфер экзопланет.

Вообще, наблюдения, которые проводились и проводятся в ближнем (1700–3200 Å) и дальнем (910–1700 Å) УФ-диапазонах, связанные с исследованием атмосфер экзопланет, привели к появлению большого количества открытий (см., например [66], [71], [85], [89–92] и другие) и появлению теоретических работ (см., например, [73], [89–107] и другие). Особенностью рассматриваемого диапазона длин волн является наличие резонансных спектральных линий, в том числе линии H I Ly α (1216 Å), O I (1305 Å), C II (1335 Å), Si III (1206 Å), Mg I (2853 Å), Mg II (2796 Å). Спектральные наблюдения данных линий позволяют изучать физические свойства планет и планетных атмосфер, определять параметры звездного ветра, исследовать вспышечную активность звезд.

В предстоящем десятилетии, после завершения работы космического телескопа Хаббл, для исследований в области УФ-астрономии планируется к запуску два инструмента: космическая обсерватория Спектр-УФ (диапазон: 1150–3100 Å) ([108–110]) и Chinese Space Station Telescope (CSST) (2550–10000 Å). CSST является оптическим телескопом и только частично захватывает ближний УФ-диапазон. Таким образом, Спектр-УФ можно считать единственным планируемым на ближайшее десятилетие инструментом, который будет непрерывно получать данные в ближнем и дальнем УФ-диапазонах длин волн.

В состав научной аппаратуры Спектр-УФ входит: телескоп T-170M с апертурой 1.7 м; комплекс основных научных приборов, предназначенный для спектроскопии высокого разрешения, бесщелевой спектроскопии, получения прямых изображений неба в УФ-диапазоне с высоким угловым разрешением и с большим полем зрения; а также гамма-детектор, который является дополнительной полезной нагрузкой.

Одной из особенностей миссии Спектр-УФ является оптимальная геосинхронная орбита (расстояние от Земли – 35000 км; угол наклонения: 35° [109]), на которой будет работать телескоп. Геокорональное излучение атмосферы Земли на данной орбите мало, что очень важно для наблюдений в дальнем УФ-диапазоне, в особенности в линии Ly α . Для сравнения, орбита телескопа Хаббл находится на расстоянии 535 км от Земли. Такая разница позволяет нивелировать

отношение размеров апертур рассматриваемых телескопов ([111]) (размер апертуры HST составляет 2.4 м).

Блок спектрографов обсерватории Спектр-УФ включает в себя три независимых канала, находящихся в одном корпусе ([109]):

– вакуумный ультрафиолетовый эшелъный спектрограф (ВУФЭС) для работы в спектральном диапазоне от 1150 Å до 1760 Å ($R \sim 50000$);

– ультрафиолетовый эшелъный спектрограф (УФЭС) для работы в спектральном диапазоне от 1740 Å до 3100 Å ($R \sim 50000$);

– спектрограф с длинной щелью (СДЩ) для получения спектров низкого разрешения ($R \sim 1000$) точечных и протяженных объектов в диапазоне длин волн от 1150 Å до 3050 Å.

В качестве детекторов для представленных спектрографов используются ПЗС матрицы (CCD) фирмы e2V со специальным антиотражательным покрытием [111–113]. Как известно, отражательная способность оптических покрытий играет важную роль в определении того, в каком спектральном диапазоне будет работать прибор (Linsky и Güdel, 2014). Отражательная способность, в совокупности с квантовой эффективностью приемника и пропускной способностью оптической системы (в частности, спектрографа) определяет эффективность работы спектрографа. Ранее, в работах [110–112] и [114] на основе измерений были получены значения эффективной площади для спектрографов ВУФЭС, УФЭС, СДЩ. Также были проведены сравнения данного показателя со спектрографами STIS и COS телескопа Хаббл (см. рисунки 14.4–14.5 из работы [114]). Данное сравнение показало, что:

1. Спектрограф ВУФЭС имеет сравнимую эффективность со спектрографом STIS с E140N ($R \sim 114000$) и E140M ($R \sim 46000$) решетками в диапазоне длин волн 1150–1500 Å. При этом, эффективность ВУФЭС на порядок величины больше при $\lambda > 1500$ Å.

2. Спектрограф УФЭС в рабочем спектральном диапазоне (1740–3100 Å) имеет примерно в 5 раз большую эффективность, чем у спектрографа STIS с E230N ($R \sim 114000$) и E240M ($R \sim 30000$) решетками, и сравнимую эффективность со спектрографом COS с G185M ($R \sim 20000$) и G225M ($R \sim 24000$) решетками.

3. Спектрограф СДЩ имеет меньшую эффективность в сравнении с COS с G140L ($R \sim 2000$) решеткой в дальнем УФ-диапазоне (< 1700 Å) и сравнимую эффективность с COS с G230L ($R \sim 3000$) решеткой при $\lambda > 1700$ Å.

Кроме того, в работе [115] было показано, что для спектроскопических наблюдений в ближнем УФ-диапазоне, при одинаковом времени экспозиции, с помощью спектрографов УФЭС и СДЩ обсерватории Спектр-УФ можно потенциально достигнуть соотношения сигнал к шуму (S/N), в 2 раза большего, чем это возможно с помощью спектрографов STIS (E230N решетка) и COS (G230L решетка) космического телескопа Хаббл.

Планируемая к запуску космическая обсерватория Спектр-УФ является многозадачным инструментом. В ходе работы миссии предполагается ряд исследований, в том числе [110]: исследование эволюции Вселенной; исследование физики галактик, звезд и диффузной среды; изучение физики истечения и аккреции на компактные объекты; изучение атмосфер экзопланет и планет Солнечной системы. Одним из важнейших исследований также является изучение космической погоды у других звезд.

Параметры орбиты планируемой к запуску космической обсерватории Спектр-УФ, спектральное разрешение и чувствительность спектрографов на борту данной обсерватории могут позволить решить ряд важных задач по исследованию космической погоды. В частности, с помощью данной обсерватории возможно: определение параметров звездного ветра по наблюдениям атмосфер экзопланет; исследование активности родительских звезд; изучение физических свойств экзопланет (в том числе их магнитных полей ([111], [116]) и их атмосфер. Решение данных задач с помощью космической обсерватории Спектр-УФ на примере различных планетных систем приведет к лучшему пониманию и прогнозированию процессов, происходящих в околоземном пространстве.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ АСТРОФИЗИКА

Как следует из приведенных выше сведений, для решения задачи определения параметров звездного ветра и КВМ по наблюдениям экзопланет необходимо не только провести спектральные наблюдения в УФ-части спектра, но и правильно их интерпретировать. В настоящее время в нескольких исследовательских центрах в мире создаются комплексные численные модели, на-

целенные на анализ и интерпретацию спектральных измерений наземными и космическими телескопами. Несмотря на определенные успехи, еще необходимо преодолеть несколько сложных проблем. Фактически, это объединение моделей нижней атмосферы, где преобладают молекулярные комплексы, верхней атмосферы с атомами и ионами, и экзосферы – области взаимодействия планетарного вещества со звездным плазменным ветром.

В России в этом направлении успешно развивается группа численного и экспериментального моделирования, состоящая из кооперации Института лазерной физики СО РАН и Института астрономии РАН. В ИЛФ СО РАН создана признанная в мире модель верхней атмосферы и экзосферы. С ее помощью были получены количественные оценки на ряд физических величин экзопланет и родительских звезд, которые не доступны иными способами, кроме как транзитными спектральными наблюдениями – условия космической погоды вблизи конкретных экзопланет (интенсивность ионизирующей радиации и плазменного ветра звезды), содержание гелия, кислорода и углерода в атмосфере, скорость истечения атмосферы. В ИНАСАН впервые создана модель взаимодействия планетарного течения со звездным ветром с учетом магнитных полей, а также аэрономия верхних атмосфер с учетом образования энергичных частиц.

На основе развитых новых подходов и комплексных численных моделей в ближайшем будущем будут исследоваться первичные и вторичные атмосферы земле-подобных экзопланет, эволюция содержания углерода, азота, кислорода, воды. Будут найдены простые критерии первичной и вторичной атмосферы на основе транзитных измерений. Рассмотрены процессы потери и дифференциации тяжелых изотопов в результате уноса планетарным ветром на стадии потери первичной атмосферы. Дифференциация тяжелых элементов и определенных изотопов является независимым маркером эволюции планеты и ее атмосферы. Будет проведен анализ потенциальной обитаемости планет в свете эволюции атмосферы на протяжении их жизни. Будут найдены связи свойств экзопланетных атмосфер с их эволюционной историей. Будут найдены факторы, которые формируют потенциальную обитаемость планет. Будет создана методическая основа для рассмотрения кандидатов в биомаркеры.

Короткая, но бурная история поиска биомаркеров в Солнечной системе показывает, что теоретических знаний о сложных химических реакциях заведомо недостаточно для достоверных выводов. То же самое касается различных атомно-молекулярных процессов и скоростей реакций, прямо влияющих на количественную интерпретацию спектральных измерений. В астрофизике значительная часть количественной информации основана на теоретических расчетах. Лабораторные опыты по измерению атомно-молекулярных и спектральных констант требуют значительных усилий, и, несмотря на большое количество систематических экспериментов в прошлом, остаются очень востребованными и необходимыми для надежной интерпретации наблюдательных данных.

В частности, для наблюдательной астрофизики горячих экзопланет в последнее время большое значение приобрели транзитные измерения поглощения в линии метастабильного триплетного гелия на длине волны 10830 Å. С 2018 г. проведены измерения для примерно 30 экзопланет, для 15 достоверно обнаружено поглощение. Принципиальное значение для интерпретации этих наблюдений играют скорости столкновительного девозбуждения метастабильного уровня. Для условий верхних атмосфер горячих экзопланет ($T \sim 10000$ К) эти скорости известны только теоретически. Разработка метода лабораторного измерения скоростей столкновительного девозбуждения метастабильного гелия позволит уточнить теоретические оценки и поставить численное моделирование и интерпретацию наблюдений телескопами на надежную основу.

В настоящий момент в мире практически нет специализированных лабораторий по моделированию атомно-молекулярных процессов в различных условиях, в том числе значительно отличающихся от земных. Задача измерения скоростей реакций, влияющих на интерпретацию наблюдений, актуальна не только в контексте экзопланетной тематики, но и имеет самостоятельное научное значение. Несомненно, что задача создания такой лаборатории должна появиться в списке перспективных тем 10-го направления (ЭЛАГ) Научной программы НЦФМ. Создание лабораторной установки для измерений плазма-фото-химических реакций на базе ИЛФ СО РАН позволит приблизиться к решению поставленной в этой статье задачи по определению параметров звездного ветра и КВМ в солнцеподобных звездах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогноз космической погоды и прогнозирование экстремальных событий на Солнце требует соединения в единую картину взаимодействия нескольких подсистем – солнечное динамо и нагрев короны, солнечный ветер и КВМ, магнетизм и магнитосферы планет. Каждая из подсистем

в значительной степени уже изучена, но сохраняет фундаментальные проблемы, решение которых требует дополнительных экспериментальных данных и фактов. В контексте данной статьи особенно остро стоит проблема “спокойного Солнца” и прогноза вспышек и КВМ с энергетикой на один-два порядка большей, чем было зарегистрировано с начала космической эпохи.

Бурное развитие экзопланетных исследований открывает новые возможности для астрофизики в целом и в прогнозировании космической погоды в частности. В настоящей работе предложен новый способ получения количественных данных о параметрах звездного ветра и КВМ посредством транзитных наблюдений реакции атмосфер горячих экзопланет на активность их родительских звезд. Такие данные позволяют качественно дополнить измерения в Солнечной системе, существенно обогатив статистические и эволюционные аспекты экстремальных проявлений космической погоды. Для корректной интерпретации ожидаемых результатов, наряду с развитием методов математического моделирования воздействия звездного ветра на атмосферы планет, необходимо получение новых экспериментальных данных о скоростях реакций. Создание в рамках направления Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика НЦФМ специализированного плазменного стенда для измерения скоростей реакций позволит существенно продвинуться в решении этой важнейшей задачи.

Планируемая к запуску российская космическая обсерватория Спектр-УФ является уникальным и единственным на ближайшее десятилетие внеатмосферным инструментом, с помощью которого будет возможно получать необходимые данные в ультрафиолетовом диапазоне длин волн о трансмиссионных спектрах атмосфер горячих экзопланет во время первичных транзитов. Это позволит провести валидацию и верификацию предлагаемого метода, и, впоследствии, осуществлять измерения параметров звездного ветра, исследовать активность родительских звезд, изучать магнитные поля экзопланет – для новых, еще не изученных планетных систем. Таким образом, обсерватория Спектр-УФ может открыть нам широкую возможность для исследования и прогнозирования процессов, происходящих в околоземном пространстве.

Работа выполнена при поддержке программы 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика” Национального центра физики и математики. Шайхисламов И.Ф. выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики “БАЗИС”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miyake F., Nagaya K., Masuda K., Nakamura T. // *Nature*. 2012. V. 486. № 7402. P. 240–242. <https://doi.org/10.1038/nature11123>
2. Miyake F., Panyushkina I.P., Jull A.J.T., et al. // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48. № 11. P. Art. № e2021GL093419. <https://doi.org/10.1029/2021GL093419>
3. Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. // *Astrophys. J.* 2012. V. 757. № 1. P. 92. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/92>
4. Brehm N., Christl M., Knowles T.D.J. et al. // *Nature Commun.* 2022. V. 13. P. Art. № 1196. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28804-9>
5. Зеленый Л., Петрукович А. // *Российский космос*. 2008. № 1. С. 48–51
6. Savanov I.S. // *Astroph. Bulletin*. 2015. V. 70. P. 83–88. <https://doi.org/10.1134/S1990341315010095>
7. Savanov I.S., Dmitrienko E.S. // *INASAN Science Reports*. 2020. V. 5. P. 272–274. <https://doi.org/10.26087/INASAN.2020.5.5.011>
8. McQuillan A., Mazeh T., Aigrain S. // *Astrophys. J. Lett.* 2013. V. 775. P. L11 (4pp.). <https://doi.org/10.1088/2041-8205/775/1/L11>
9. Mayo A.W., Vanderburg A., Latham D.W., et al. // *Astronom. J.* 2018. V. 155. P. 136 (25 pp.). <https://doi.org/10.3847/1538-3881/aaadff>
10. Kane S.R., Hill M.L., Kasting J.F., et al. // *Astrophys. J.* 2016. V. 830. P. Art. id.1 (11 pp.). <https://doi.org/10.3847/0004-637X/830/1/1>
11. Maehara H., Shibayama T., Notsu S. // *Nature*. 2012. V. 485. Iss. 7399. P. 478–481. <https://doi.org/10.1038/nature11063>
12. Maehara H., Shibayama T., Notsu Y., et al. // *Earth, Planets and Space*. 2015. V. 67. P. Art. id. 59 (10 pp.). <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z>
13. Davenport J.R.A. // *Astrophys. J.* 2016. V. 829. Iss. 1. P. Art. id. 23 (12 pp.). <https://doi.org/10.3847/0004-637X/829/1/23>
14. Yang H., Liu J. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2019. V. 241. Iss. 2. P. Art. id. 29 (19 pp.). <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab0d28>

15. *Tu Z.L., Yang M., Zhang Z.J., Wang F.Y.* // *Astrophys. J.* 2020. V. 890. Iss. 1. P. id. 46 (15 pp.).
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab6606>
16. *Sakaue T. and Shibata K.*, “Energy transfer by nonlinear Alfvén waves in the solar chromosphere and its effect on spicule dynamics, coronal heating, and solar wind acceleration,” *Astrophys. J.*, V900. № 2, p. 120, Sep. 2020
17. *Sakaue T. and Shibata K.*, “An M Dwarf’s chromosphere, corona, and wind connection via nonlinear Alfvén waves,” *Astrophys. J.*, V. 919. № 1. P. 29. Sep. 2021
18. *Matsumoto T.*, “Full compressible 3D MHD simulation of solar wind,” *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, V. 500. № 4. P. 4779–4787. Dec. 2020
19. *Marsch E.*, “Kinetic physics of the solar corona and solar wind,” *Living Rev. Sol. Phys.*, V. 3. P. 1, Jul. 2006,
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2006-1>
20. *Zurbuchen T.H.* // *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* 2007. V. 45. № 1. P. 297–338.
<https://doi.org/10.1146/annurev.astro.45.010807.154030>
21. *Owens M.J., Forsyth R.J.* // *Living Rev. Sol. Phys.* 2013. V. 10. № 1. Art. № 5.
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-5>
22. *Parker E.* // *Astrophys. J.* 1958. V. 128. P. 664.
<https://doi.org/10.1086/146579>
23. *Steinolfson R.S., Hundhausen F.J.* // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 93. P. 14269–14276.
<https://doi.org/10.1029/JA093iA12p14269>
24. *Roussev I.I., Gombosi T.I., Sokolov I.V. et al.* // *Astrophys. J.* 2003. V. 595. P. L57–L61.
<https://doi.org/10.1086/378878>
25. *Totten T.L., Freeman J.W., Arya S.* // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 13–18.
<https://doi.org/10.1029/94JA02420>
26. *Weber E.J., Davis L.Jr.* // *Astrophys. J.* 1967. V. 148. P. 217–227.
<https://doi.org/10.1086/149138>
27. *Brandt J. C., Wolff C., Cassinelli J.P.* // *Astrophys. J.* 1969. V. 156. P. 1117.
<https://doi.org/10.1086/150039>
28. *Sakurai T.* // *Solar Phys.* 1982. V. 76. P. 301–321.
<https://doi.org/10.1007/BF00170988>
29. *Goelzer M.L., Schwadron N.A., Smith C.W.* // *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2014. V. 119. P. 115–120.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019420>
30. *Fabbian D., Simoniello R., Collet R., Criscuoli S., et al.* // *Astron. Nachr.* 2017. V. 338. P. 753–772.
<https://doi.org/10.1002/asna.201713403>
31. *Lammer H., Gudel M., Kulikov Y., Ribas I., et al.* // *Earth Planets Space.* 2012. V. 64. P. 179–199.
<https://doi.org/10.5047/eps.2011.04.002>
32. *Vourlidis A., Howard R.A., Esfandiari E., Patsourakos S., et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 722. № 2. P. 1522–1538.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1522>
33. *Webb D.F., Howard T.A.* // *Living Rev. Sol. Phys.* 2012. V. 9. № 1. Art. № 3.
<https://doi.org/10.12942/lrsp-2012-3>
34. *Kilpua E., Koskinen H.E.J., Pulkkinen T.I.* // *Liv. Rev. Solar Phys.* 2017. V 14. № 1. Art. № 5.
<https://doi.org/10.1007/s41116-017-0009-6>
35. *Richardson I.G., Cane H.V.* // *Solar Phys.* 2010. V. 264. № 1. P. 189–237.
<https://doi.org/10.1007/s11207-010-9568-6>
36. *Howard T.A., Tappin S.J.* // *Solar Phys.* 2008. V. 252. № 2. P. 373–383.
<https://doi.org/10.1007/s11207-008-9262-0>
37. *Möstl C., Amla K., Hall J.R., Liewer P.C., et al.* // *Astrophys. J.* 2014. V. 787. № 2. Art. № 119.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/787/2/119>
38. *Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., et al.* // *Phys. of Plasmas.* 2019. V. 26. № 8. Art. № 082113.
<https://doi.org/10.1063/1.5115224>
39. *Forbes T.G.* // *J. of Geophys. Res.* 2000. V. 105. № A10. P. 23153–23166.
<https://doi.org/10.1029/2000JA000005>
40. *Charbonneau P.* // *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* 2014. V. 52. P. 251–290.
<https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-040012>
41. *Aschwanden M.J., Wülser J.-P., Nitta N.V., Lemen J.R.* // *Astrophys. J.* 2008. V. 679. № 1. P. 827–842.
<https://doi.org/10.1086/529542>
42. *Schrijver C.J., Kauristie K., Aylward A.D., Denardini C.M., et al.* // *Adv. in Space Res.* 2015. V. 55. № 12. P. 2745–2807.
<https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.03.023>

43. *Aarnio A.N., Matt S.P., Stassun K.G.* // *Astrophys. J.* 2012. V. 760. № 1. Art. № 9.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/9>
44. *Guenther M.N., Zhan Z., Seager S., Rimmer P.B., et al.* // *Astron. J.* 2020. V. 159. Art. № 60.
<https://doi.org/10.3847/1538-3881/ab5d3a>
45. *Savanov I.S.* // *Astron. Letters.* 2020. V. 46. № 12. P. 831–835.
<https://doi.org/10.1134/S106377372012004X>
46. *Yang H., Liu J.* // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2019. V. 241. № 2. Art. № 29.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab0d28>
47. *Van Doorselaere T., Shariati H., Deboscher J.* // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 2017. V. 232. № 2. Art. № 26.
<https://doi.org/10.3847/1538-4365/aa8f9a>
48. *Vida K., Leitzinger M., Kriskovics L., Seli B., et al.* // *Astron. Astrophys.* 2019. V. 623. Art. № A49.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201834264>
49. *Leitzinger M., Odert P., Greimel R., Vida, K., et al.,* *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2020. V. 493. № 3. P. 4570.
<https://doi.org/10.1093/mnras/staa504>
50. *Fuhrmeister B., Czesla S., Schmitt J.H.M.M., Jeffers S. V., et al.* // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 615. Art. № A14.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201732204>
51. *Namekata K., Maehara H., Honda S., Notsu Y., et al.* // *Nature Astron.* 2022. V. 6. P. 241.
<https://doi.org/10.1038/s41550-021-01532-8>
52. *Namekata K., Maehara H., Honda S., Notsu Y., et al.* // *Astrophys. J. Let.* 2022. V. 926. № 1. Art. № L5.
<https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac4df0>
53. *Vida K., Kriskovics L., Olah K., Leitzinger M., et al.* // *Astron. Astrophys.* 2016. V. 590. Art. № A11.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201527925>
54. *Braginskii S.I.* // *Dokl. Akad. Nauk SSSR.* 1963 V. 149. № 6. P. 1311–1314.
55. *Glatzmaiers G.A., Roberts. P.H.* // *Nature*, (1995). V. 377. № 6546 P. 203–209.
<https://doi.org/10.1038/377203a0>
56. *Glassmeier K.-H., Vogt J.* // *Space Sci. Rev.* 2010. V. 155. P. 387–410.
<https://doi.org/10.1007/s11214-010-9659-6>
57. *Ness N.F., Behannon K.W., Lepping R.P. et al.* // № NASA-TM-X-70872. 1975
58. *Christensen U.R.* // *Nature*. 2006. V. 444. № 7122. P. 1056–1058.
<https://doi.org/10.1038/nature05342>
59. *Nimmo F.* // *Geology*. 2002. V. 30. № 11. P. 987–990.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030)
60. *Hubbard W.B.* // *Astroph. J.* 1969. V. 155. P. 333.
61. *Zarka P.* // *Planet. Space Sci.* 2007. V. 55. № 5. P. 598–617.
<https://doi.org/10.1016/j.pss.2006.05.045>
62. *Lynch C.R., Murphy T., Lenc E. et al.* // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2018. V. 478. № 2. P. 1763–1775.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1138>
63. *Turner J.D., Zarka P., Grießmeier J.M., et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2021. V. 645, A59.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937201>
64. *Варшалович Д.А.* // *Успехи физ. наук.* 1970. Т. 101, № 3. С. 369–383.
<https://doi.org/10.1070/PU1971v013n04ABEH004667>
65. *Yan H., Lazarian A.* // *Astrophys. J.* 2006. V. 653. № 2. P. 1292–1313.
<https://doi.org/10.1086/508704>
66. *Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Désert J.-M., et al.* // *Nature*. 2003. V. 422. № 143. P. 143–146.
<https://doi.org/10.1038/nature01448>
67. *Vidal-Madjar A., Lecavelier des Etangs A., Désert J.-M., et al.* // *Astrophys. J.* 2008. V. 676. № 1. P. L57–L60.
<https://doi.org/10.1086/587036>
68. *Ben-Jaffel L.* // *Astrophys. J.* 2007. V. 671. № 1. P. L61–L64.
<https://doi.org/10.1086/524706>
69. *Koskinen T.T., Aylward A.D., Smith C.G.A., Miller S.* // *Astrophys. J.* 2007. V. 661. № 1. P. 515–526.
<https://doi.org/10.1086/513594>
70. *Trammell G.B., Arras P., Li Z.-Y.* // *Astrophys. J.* 2011. V. 728. № 2. P. 152–1776.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/728/2/152>
71. *Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H. et al.* // *Astrophys. J.* 2011. V. 847. № 2. P. 126.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa88ad>
72. *Rumenskikh M.S., Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., et al.* // *Astrophys. J.* 2022. V. 795. № 2. P. 238–251.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac441d>
73. *Holmström M., Ekenbäck A., Selsis F., et al.* // *Nature*. 2008. V. 451. P. 970–972.
<https://doi.org/10.1038/nature06600>

74. *Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., et al.* // *Astrophys. J.* 2019. V. 885. № 1. P. 67–87.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab46a4>
75. *Ninan J.P., Stefansson G., Mahadevan S., et al.* // *Astrophys. J.* 2020. V. 894. № 2. P. 97–106.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab8559>
76. *Palle E., Nortmann L., Casasayas-Barris N., et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2020. V. 638. № A61. 8 pp.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037719>
77. *Bourrier V., Lecavelier des Etangs A., Ehrenreich D., et al.* // *Astron. and Astrophys.* V. 620. № A147. 14 pp.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833675>
78. *Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., et al.* // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2020. V. 491. P. 3435–3447.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stz3211>
79. *Cherenkov A., Bisikalo D., Fossati L., Möstl C.* // *Astropys. J.* 2017. V. 846. Art. № 31.
<https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa82b2>
80. *Bisikalo D.V., Cherenkov A.A.* // *Astron. Rep.* 2016. V. 60. № 2. P. 183–192.
<https://doi.org/10.1134/S1063772916020013>
81. *Kaigorodov P.V., Ilyina E.A., Bisikalo D.V.* // *Astron. Rep.* 2019. V. 63. № 5. P. 365–371.
<https://doi.org/10.1134/S1063772919050032>
82. *Zhilkin A.G., Bisikalo D.V., Kaygorodov P.V.* // *Astron. Rep.* 2020. V. 64. № 2. P. 159–167.
<https://doi.org/10.1134/S1063772920020055>
83. *Zhilkin A.G., Bisikalo D.V., Kolymagina E.A.* // *Astron. Rep.* 2021. V. 65. № 8. P. 676–692.
<https://doi.org/10.1134/S1063772921090092>
84. *Farrell W.M., Halekas J.S., Killen R.M., Delory G.T., et al.* // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. Art. № E00K04.
<https://doi.org/10.1029/2012JE004070>
85. *Fossati L., Haswell C.A., Froning C.S. et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 714. P. L222–L227.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/714/2/L222>
86. *Zhilkin A.G., Bisikalo D.V.* // *Astron. Rep.* 2019. V. 63. № 7. P. 550–564.
<https://doi.org/10.1134/S1063772919070096>
87. *Czesla S., Schneider P.C., Salz M., Klocova T.* // *Astron. Astrophys.* 2019. V. 629. Art. № A5.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935351>
88. *Kislyakova K.G., Holmström M., Lammer H., Odert P., et al.* // *Science.* 2014. V. 346. № 6212. P. 981–984.
<https://doi.org/10.1126/science.1257829>
89. *Vidal-Madjar A., Désert J.-M., Lecavelier des Etangs A., et al.* // *Astrophys. J.* 2004. V. 609. № 1. P. L69–L72.
<https://doi.org/10.1086/383347>
90. *Linsky J.L., Yang H., France K., et al.* // *Astrophys. J.* 2010. V. 717. № 2. P. 1291–1299.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/717/2/1291>
91. *Haswell C.A., Fossati L., Ayres T., et al.* // *Astrophys. J.* 2012. V. 760. № 1. P. 79–102.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/79>
92. *Bourrier V., Lecavelier des Etangs A., Dupuy H., et al.* // *Astron. and Astrophys.* 2013b. V. 551. № A63. 11 pp.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201220533>
93. *Lecavelier des Etangs A., Vidal-Madjar A., McConnell J.C., Hébrard G.* // *Astron. and Astrophys.* 2004. V. 418. № 1. P. L1–L4.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361:20040106>
94. *Yelle R.V.* // *Icarus.* 2004. V. 170. № 1. P. 167–179.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.02.008>
95. *Vidotto A.A., Jardine M., Helling C.* // *Astrophys. J.L.* 2010. V. 722. № 2. P. L168–L172.
<https://doi.org/10.1088/2041-8205/722/2/L168>
96. *Shematovich V.I.* // *Sol. Sys. Res.* 2010. V. 44. № 2. P. 96–103.
<https://doi.org/10.1134/S0038094610020024>
97. *Koskinen T.T., Harris M.J., Yelle R.V., Lavvas P.* // *Icarus.* 2013a. V. 226. № 2. P. 1678–1694.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.027>
98. *Koskinen T.T., Harris M.J., Yelle R.V., Lavvas P.* // *Icarus.* 2013b. V. 226. № 2. P. 1695–1708.
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.026>
99. *Bisikalo D., Kaygorodov P., Ionov D., Shematovich V., et al.* // *Astrophys. J.* 2013a. V. 764. № 1. 5 pp.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/764/1/19>
100. *Bisikalo D.V., Kaygorodov P.V., Ionov D.E.* // *Proceedings of a 7th International Conference Numerical Modeling of Space Plasma Flows (ASTRONUM2012).* 2012. P. 6.
101. *Bisikalo D.V., Kaygorodov P.V., Ionov D.E., Shematovich V.I.* // *Astron. Rep.* 2013c. V. 57. P. 715–725.
<https://doi.org/10.1134/S1063772913100016>

102. *Bisikalo D.V., Shematovich V.I., Kaygorodov P.V., Zhilkin A.G.* // *Phys. Uspek.* 2021. V. 64. № 8. P. 747–800.
<https://doi.org/10.3367/UFNe.2020.11.038879>
103. *Bourrier V., Lecavelier des Etangs A.* // *Astron. and Astrophys.* 2013a. V. 557. № A124. 18 pp.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321551>
104. *Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Sasunov Yu.L., et al.* // *Astrophys. J.* 2014. V. 795: 132. № 2. 15 pp.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/795/2/132>
105. *Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., et al.* // *Astrophys. J.* 2016. V. 832:173. № 2. 20 pp.
<https://doi.org/10.3847/0004-637X/832/2/173>
106. *Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., Lammer H., et al.* // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2018. V. 481. P. 5315–5323.
<https://doi.org/10.1093/mnras/sty2652>
107. *Zhilkin A., Bisikalo D.* // *Universe.* 2021. V. 7. № 11. P. 422–465.
<https://doi.org/10.3390/universe7110422>
108. *Sachkov M., Ana Inés Gómez de Castro, Shustov B., et al.* // *Proc. SPIE.* 2022. V. 12181.
<https://doi.org/10.1117/12.2629580>
109. *Shustov B.M., Sachkov M.E., Sichevsky S.G., et al.* // *Sol. Syst. Res.* 2021. V. 55. № 7. P. 677–687.
<https://doi.org/10.1134/S0038094621070194>
110. *Boyarchuk A.A., Shustov B.M., Savanov I.S., et al.* // *Astron. Rep.* 2016. V. 60. № 1. P. 1–42.
<https://doi.org/10.1134/S1063772916010017>
111. *Fossati L., Bisikalo D.V., Lammer H., et al.* // *Astrophys. Space Sci.* 2014. V. 354. № 1. P. 9–19.
<https://doi.org/10.1007/s10509-014-2027-3>
112. *Sachkov, M., Shustov, B., Gómez de Castro, A. I. G.* // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9144. P. 914402
<https://doi.org/10.1117/12.2055513>
113. *Shugarov A., Savanov I., Sachkov M. et al.* // *Astrophys. Space Sci.* 2014. V. 54. P. 169–175.
114. *Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al.* // *Astrophys. Space Sci.* 2014. V. 354. P. 155–161.
<https://doi.org/10.1007/s10509-014-2119-0>
115. *Tsurikov G.N., Bisikalo D.V.* // *Astron. Rep.* 2023. V. 67. № 2. P. 125–143.
<https://doi.org/10.1134/S1063772923020087>
116. *Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., et al.* // *Mon. Notices Royal Astron. Soc.* 2021. V. 507. № 3. P. 3626–3637.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stab2366>

OBSERVATIONS OF HOT EXOPLANETS AS A NEW TOOL FOR SPACE WEATHER RESEARCH AND FORECASTING

**V. I. Shematovich^{1,#}, I. F. Shaikhislamov², A. G. Zhilkin¹,
I. S. Savanov¹, G. N. Tsurikov¹, and D. V. Bisikalo^{3,1}**

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

²*Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

³*National Center for Physics and Mathematics, Sarov, Russia*

[#]*e-mail: shematov@inasan.ru*

This paper examines the relationship between space weather and the atmospheres of planets in the Solar System and in the planetary systems around other stars. This relationship has a number of aspects, each of which represents a fundamental problem of plasma physics. The combination of all components into the overall picture is of extremely important practical importance for modern civilization. The discovery of exoplanets, and especially hot gaseous exoplanets, may open up new ways to obtain the necessary observational data on the impact of flare activity and coronal mass ejections on outer space and planetary atmospheres, including data for predicting extreme events on the Sun and their impact on the climate and space weather of the Earth. A new tool is proposed for studying and forecasting space weather in the Solar System and in other stellar systems by observing the extended gas and plasma envelopes of hot exoplanets. This approach requires the joint involvement of methods of mathematical modeling of the effects of stellar wind on planetary atmospheres, new data from laboratory experimental astrophysics, and observations of the envelopes of hot exoplanets with the Spectr-UF (WSO-UV) space telescope. The development of this topic in the NCFM, within the framework of the Experimental Laboratory Astrophysics and Geophysics branch, assumes the creation of a specialized plasma stand for measuring reaction rates important for astrophysics, and will significantly enrich the scientific program of the planned Russian space observatory Spectr-UF (WSO-UV).