

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭКЗОПЛАНЕТЫ НАТ–Р–11b СО ЗВЕЗДНЫМ ВЕТРОМ

© 2023 г. Е. С. Беленькая^{1,*}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

*E-mail: elena.belenkaya.msu@gmail.com

Поступила в редакцию 17.08.2023 г.

После доработки 07.09.2023 г.

Принята к публикации 19.09.2023 г.

В статье обсуждается возможность существования магнитодиска вокруг экзопланеты НАТ–Р–11b. Мы использовали имеющиеся данные наблюдений для определения свойств этой экзопланеты и обтекающего ее звездного ветра и получили грубую оценку масштаба магнитосферы планеты. Сравнение нашей оценки с опубликованными результатами расчетов методом частиц в ячейке в трехмерной электромагнитной релятивистской бесстолкновительной модели магнитосферы показало несоответствие масштабов магнитосферы, найденных этими двумя способами. Предложена возможная интерпретация данного несоответствия.

Ключевые слова: магнитосферы, экзопланеты, звездный ветер

DOI: 10.31857/S0004629923110026, **EDN:** AGTVNH

1. ВВЕДЕНИЕ

В этой работе мы рассматриваем систему, возникающую при взаимодействии звезды НАТ–Р–11 с вращающейся вокруг нее экзопланетой НАТ–Р–11b. Экзопланета НАТ–Р–11b размером с Нептун обладает малой массой $M_{pl} \sim 0.08 M_J$, где M_J – масса Юпитера. Температура НАТ–Р–11b ~ 870 К, ее расстояние до родительской звезды $d \sim 0.0465$ а.е., орбита экзопланеты полярная и эксцентрическая [1]. Авторы [1] оценили напряженность экваториального магнитного поля НАТ–Р–11b B_{pl} порядка 1–5 Гс с наиболее вероятным значением 2.4 Гс (магнитное поле Земли на ее экваторе ~ 0.3 Гс), а длина хвоста магнитосферы экзопланеты оценивалась как 1.8–3.1 а.е. В работе [1] делается вывод о том, что наблюдаемое массовое движение частиц в антивзвездном направлении связано с истечением из полярной области экзопланеты. Такой вывод был сделан при изучении поглощения в линиях С II 133.45 нм и H I Ly α при транзите планеты. Авторы [1] отмечали, что ионы углерода С II могут иметь только экзопланетное происхождение. Использовались данные космического телескопа Хаббл (HST) в дальнем ультрафиолетовом диапазоне. НАТ–Р–11b – одна из первых экзопланет с оцененным магнитным полем.

Родительская звезда НАТ–Р–11 в созвездии Лебедя имеет спектральный класс K2–4 V. Это оран-

жевый карлик Главной Последовательности (ГП), расположенный на расстоянии ~ 38 пк от Солнца, его масса $M_s \sim 0.8 M_\odot$, а радиус $R_s \sim 0.7 R_\odot$, где $R_\odot \sim 696\,000$ км – радиус Солнца. Возраст звезды ~ 6.5 млрд. лет, эффективная температура ~ 4780 К, металличность (Fe/H) ~ 0.31 (спектральный тип Солнца G2 V, его эффективная температура ~ 5770 – 5780 К [2]). Вокруг НАТ–Р–11 вращаются две планеты: НАТ–Р–11b и НАТ–Р–11c¹. Звездная плотность оценивается как ~ 1.8 от плотности Солнца [3]. Орбитальный период экзопланеты НАТ–Р–11b составляет $\sim 4.9^d$. Период вращения звезды (29.2^d) относится к орбитальному периоду экзопланеты НАТ–Р–11b как $\sim 6 : 1$ [3].

Бен-Яффель и др. [1] утверждали, что пространственная протяженность ионизированного углерода (С II) зависит, в частности, от магнитного поля НАТ–Р–11b. Авторы пришли к выводу, что из их наблюдений следует, что магнитосфера экзопланеты должна иметь плотную плазмосферу и длинный хвост, заполненный плазмой полярного ветра планеты с низкой плотностью. Из сравнения наблюдений во время транзитов НАТ–Р–11b и вне их авторы определили три свободных параметра: металличность атмосферы, магнитное поле экзопланеты и длину хвоста маг-

¹ http://exoplanet.eu/catalog/NAT-P-11_b

нитосферы, которые связаны друг с другом. Они пришли к выводу, что металличность НАТ–Р–11b в несколько раз выше металличности Солнца (менее, чем в 3 раза), а металличность звезды НАТ–Р–11 в два раза выше металличности Солнца [1]. Используя найденное ими значение магнитного поля планеты, мы попытаемся получить больше информации об экзопланетной магнитосфере и ее взаимодействии со звездным ветром.

Магнитное поле НАТ–Р–11 неизвестно, но Моррис и др. [3] изучили активность пятен этой звезды, которая была интерпретирована ими как свидетельство динамо солнечного типа. Оказалось, что активные широты (где в основном появляются звездные пятна) симметричны относительно экваториальной плоскости. Средние значения широт составляют $\sim \pm 16^\circ$ [3], а для Солнца $\sim \pm 15^\circ$. Звездная активность НАТ–Р–11 превышает активность Солнца. В работе [3] предполагается, что альфа-омега динамо действует внутри НАТ–Р–11 подобно Солнцу. Размер звездных пятен НАТ–Р–11 больше, чем у солнечных пятен. Свойства звездных пятен были получены из кеплеровской фотометрии при транзите экзопланеты НАТ–Р–11b. Оказалось, что НАТ–Р–11 активнее Солнца, в частности, количество крупных пятен на ней больше в ~ 100 раз, как и площадь пятен.

Сравнение НАТ–Р–11 с наиболее похожими звездами HD 189733 и Солнцем, для которых было определено магнитное поле, позволило авторам [1] оценить поле НАТ–Р–11 как 1–2 Гс (близко к солнечному значению ~ 1 Гс). Авторы также получили приблизительные значения температуры звездного ветра $(1.3\text{--}1.5) \times 10^6$ К, его скорости, 500–600 км/с, и плотности $\sim 3.3 \times 10^3$ см $^{-3}$ на расстоянии экзопланеты. В этой статье мы рассматриваем взаимодействие звездного ветра родительской звезды с магнитосферой экзопланеты НАТ–Р–11b и сравниваем полученную структуру с результатами работы [1].

2. МАГНИТОСФЕРА ЭКЗОПЛАНЕТЫ НАТ–Р–11b

Бен-Яффель и др. [1] изучили наблюдения системы НАТ–Р–11 в дальнем ультрафиолете (113–146 нм), полученные на космическом телескопе Хаббл (HST). Сравнивались спектры звезды до транзитов НАТ–Р–11b и во время транзитов. В линиях C II (133.45 нм) и H I Ly α во время транзитов наблюдалось сильное поглощение в синем крыле. Из этого был сделан вывод о глобальном движении частиц в антизвездном направлении в ночной магнитосфере экзопланеты. Используя найденное в работе [1] значение магнитного поля планеты, мы попытаемся получить больше ин-

формации об экзопланетной магнитосфере и ее взаимодействии со звездным ветром.

В работе [1], рис. 4d показано, что силовые линии магнитного поля, полученные авторами, образуют каплевидную магнитосферу экзопланеты. Такая магнитосфера возникает, если расстояние от звезды до планеты ($d \approx 0.0465$ а.е. в рассматриваемом случае) превышает альфвеновский радиус в звездном ветре. На альфвеновском радиусе плотность кинетической энергии звездного ветра равна плотности его магнитной энергии, а альфвеновское число Маха равно единице. Если экзопланета находится в пределах альфвеновского радиуса, то она генерирует альфвеновские крылья вместо обычной магнитосферы (см. напр., [4, 5]). Когда экзопланета расположена за пределами альфвеновского радиуса, возникает каплевидная магнитосфера с головной ударной волной перед ней, как в Солнечной системе. Все планеты Солнечной системы находятся в сверхзвуковом и сверхальфвеновском солнечном ветре. Альфвеновские крылья в Солнечной системе наблюдаются в магнитосфере Юпитера при обтекании субальфвеновской магнитосферной плазмой спутников Юпитера: Ио, Европы и Ганимеда (иногда также Каллисто [6, 7]). Обычно считается, что если планета вращается вокруг своей родительской звезды за пределами альфвеновского радиуса, то основной составляющей давления звездного ветра, действующего на дневную магнитопаузу (границу магнитосферы), является динамическое давление по сравнению с тепловым и магнитным давлением.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗВЕЗДНОГО ВЕТРА НАТ–Р–11 С ЭКЗОПЛАНЕТОЙ НАТ–Р–11b

Как упоминалось выше, полученная в работе [1] форма магнитосферы свидетельствует о сверхальфвеновском и сверхзвуковом течении звездного ветра на орбите НАТ–Р–11b. Для сравнения отметим, что согласно [8], звуковой Мах в звездном ветре находится на расстоянии $\approx 5R_s$ (≈ 0.008 а.е.) для карликов M4.0, а для M1.5 на $\sim 8R_s$ (≈ 0.018 а.е.). В работе [8] изучалось влияние магнитного поля M-карликов на их планеты. Авторы [8] отмечали, что магнитное поле звездного ветра может уменьшать размеры экзопланетной магнитосферы по сравнению со случаем, когда оно отсутствует. Они рассматривали только вклад магнитного поля M-карлика в давление звездного ветра, пренебрегая динамическим и тепловым давлением, а также эффектами выброса корональной массы звезды, и получили верхний предел для расстояния от экзопланетного центра до подзвездной магнитосферной точки R_{ss} , так как добавление каждого из этих членов может только увеличить давление, а следовательно, и сжатие магнитосфе-

ры. Они показали, что для близких планет давление магнитного поля может быть значительным.

Рассматриваемая здесь экзопланта НАТ–Р–11b находится близко от родительской звезды К типа, и хотя магнитосфера согласно [1] имеет каплевидную форму и ограничена находящейся перед ней головной ударной волной, тем не менее, магнитное поле звездного ветра может вносить некоторый вклад в общее давление.

В работе [9] получено выражение для расстояния от центра планеты до подзвездной магнитопаузы из баланса давления на передней границе магнитосферы:

$$\frac{R_{ss}}{R_{pl}} = \left\{ \frac{k_m^2 B_{pl}^2}{2\mu_0(k_{sw} p_{dynsw} + B_{sw}^2/2\mu_0 + p_{swth})} \right\}^{1/6}, \quad (1)$$

где $k_m = 2.44$ — коэффициент, увеличивающий магнитосферное поле планеты на дневной магнитопаузе за счет экранирующих токов магнитопаузы [10]; $k_{sw} = 0.88$ получено для одноатомного звездного ветра [11]; p_{dynsw} — динамическое давление звездного ветра; B_{sw} — магнитное поле звездного ветра; p_{swth} — тепловое давление звездного ветра (все три компонента звездного ветра на орбите экзопланеты).

Вычислим основной параметр магнитосферы R_{ss} , определяющий ее размер:

$$k_m^2 B_{pl}^2 = 34.27 \times 10^{-8} \text{ кг}^2 \text{ А}^{-2} \text{ с}^{-4}. \quad (2)$$

Николс и Милан [9] отмечали, что $p_{swth} = n_{swthp} k T_{swthp}$ обычно меньше других компонентов давления (здесь k — постоянная Больцмана, n_{swthp} и T_{swthp} — плотность и температура тепловых протонов звездного ветра). В работе [1], рис. 4с вычислена плотность звездного ветра $\sim 3.3 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ перед дневной магнитопаузой, что в ~ 550 раз больше плотности солнечного ветра на орбите Земли ($\sim 6 \text{ см}^{-3}$).

Грубая оценка теплового давления звездного ветра НАТ–Р–11:

$$p_{swth} = n_{swthp} k T_{swthp} = 0.64 \text{ нПа}. \quad (3)$$

Здесь значение температуры звездного ветра вблизи НАТ–Р–11b принято равным $1.4 \times 10^6 \text{ К}$ (среднее значение от $(1.3-1.5) \times 10^6 \text{ К}$ [1]). Отметим, что Па равен Ньютону, деленному на квадратный метр.

Динамическое давление звездного ветра, $p_{dynsw} = m_p n_{swp} V_{swp}^2$, рассчитано для скорости звездного ветра $\sim 550 \text{ км/с}$ (среднее значение от $500-600 \text{ км/с}$ [1]).

$$k_{sw} p_{dynsw} = 1470 \text{ нПа}. \quad (4)$$

Если предположить, что магнитное поле звезды, в основном, дипольное, то уравнения его компонентов в сферических полярных координатах (r, θ, φ) имеют вид $B_r = 2M_s \cos \theta r^{-3}$, $B_\theta = M_s \sin \theta r^{-3}$, $B_\varphi = 0$, где M_s — дипольный момент звезды, θ — коширота и φ — долгота. $M_s = B_s R_s^3$ (см. сайт²), где B_s — магнитное поле на звездном экваторе, которое, согласно [1], составляет $1-2 \text{ Гс}$ (при расчетах используем среднее значение 1.5 Гс , $\text{Гс} = 0.0001 \text{ Тл}$). Таким образом, магнитное поле на орбите планеты на кошироте звезды θ :

$$B_\theta = B_s R_s^3 \sin \theta d^{-3} = 53 \sin \theta \text{ нТл}, \quad (5)$$

$$B_r = 2 B_s R_s^3 \cos \theta d^{-3} = 106 \cos \theta \text{ нТл}. \quad (6)$$

Для оценки максимального значения B_{sw} возьмем полярную область (малое θ), так как планета НАТ–Р–11b находится на полярной орбите. Тогда $B_\theta = 0$ и $B_r = 106 \text{ нТл}$. Верхний предел магнитного давления звездного ветра

$$B_{sw}^2/2\mu_0 = 4.47 \text{ нПа}. \quad (7)$$

Отсюда следует, что в рассматриваемом случае основной вклад в давление дает динамическое давление $k_{sw} p_{dynsw} = 1470 \text{ нПа}$. Тепловое давление пренебрежимо мало (0.64 нПа), а магнитное давление, равное 4.47 нПа , намного меньше динамического. Таким образом, расстояние до подзвездной точки R_{ss} можно приблизительно вычислить из уравнения (1), где учитывается только динамическое давление звездного ветра (4):

$$\frac{R_{ss}}{R_{pl}} = \left\{ \frac{k_m^2 B_{pl}^2}{2\mu_0(k_{sw} p_{dynsw})} \right\}^{1/6} \sim 7. \quad (8)$$

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Здесь мы обсудим сравнение результатов [1] и наших оценок. Бен-Яффель и др. [1] из наблюдений HST во время транзитов пришли к выводу, что полярный ветер от планеты НАТ–Р–11b заполняет внутреннюю магнитосферу и ее хвост. В связи со сложностью изучаемой системы авторы отмечают, что результаты не являются однозначными.

Анализируя рис. 4с и 4d из работы [1], где показаны силовые линии магнитного поля, можно заключить, что расстояние от центра экзопланеты до подзвездной точки магнитопаузы, R_{ss} , составляет порядка $20 R_{pl}$, где R_{pl} — радиус планеты $\sim 0.4 R_J$ или $\sim 4.36 R_E$, где $R_E \sim 6378 \text{ км}$ — радиус Земли ($R_{pl} \sim 2.78 \times 10^9 \text{ см}$ [1] или $\sim 2.78 \times 10^4 \text{ км}$).

² <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/static/files/Dipole.pdf>

На этом расстоянии в полдень заканчивается структура дипольного поля магнитосферы. Величина расстояния до подзвездной точки в [1] не упоминается. Вместо него авторы утверждают, что головная ударная волна расположена на $20R_{pl}$.

Наша грубая оценка дает $R_{ss} \sim 7 R_{pl}$, что не соответствует структуре, показанной в [1], рис. 4c,d. Бен-Яффель и др. [1] определили металличность НАТ–P–11b из оптических/ИК-наблюдений с помощью HST и пришли к выводу, что ее значение соответствует скорее планете, подобной Юпитеру, чем Нептуну. Мы предполагаем, что, вероятно, магнитосфера НАТ–P–11b может включать в себя кольцевой ток, или магнитодиск, как Юпитер и Сатурн. Магнитное поле магнитодиска вне его может превышать дипольное планетарное поле и значительно увеличивать размер магнитосферы, а следовательно, и величину R_{ss} .

Из структуры магнитосферы, показанной в [1], рис. 4d, следует, что ось диполя экзопланетного магнитного поля параллельна магнитному полю звездного ветра. Только в этом случае пересоединение даст такую магнитосферную структуру. Поскольку направление планетарного магнитного поля не отмечено, мы его не знаем и можем произвольно выбрать южную или северную ориентацию. Соответственно, магнитное поле звездного ветра также должно быть направлено на юг или на север. Бен-Яффель и др. [1], однако, утверждали, что рассчитывали структуру экзопланетной магнитосферы только для нулевого межпланетного магнитного поля (ММП), когда экзопланета находилась в звездном токовом слое. В связи с этим утверждением возникает вопрос: при нулевом ММП не должно быть открытых силовых линий, идущих от планеты в межпланетное пространство, кроме как от дальнего хвостового перпендикулярного сечения. Следовательно, никакие силовые линии магнитного поля не пересекают магнитопаузу в отличие от показанной в [1], рис. 4d схемы.

Кроме того, Бен-Яффель и др. [1] сообщили, что они определяли угловой размер полярной шапки как границу между открытыми и замкнутыми силовыми линиями, однако при нулевом ММП открытых силовых линий быть не должно (только те, которые идут в хвосте и пересекают его дальнее перпендикулярное сечение, но про них в [1] ничего не сказано). С другой стороны, в подписи к рис. 4d в [1] указано, что пересоединение на ночной стороне происходит на расстоянии $50R_{pl}$ в хвосте. Эта особенность также характерна для случая ММП, параллельного оси диполя экзопланеты, но не для замкнутой магнитосферы с ММП, равным 0.

5. ПРОБЛЕМА С РАЗМЕРОМ ЭКЗОПЛАНЕТНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Мы видим, что наша оценка дает слишком малое значение расстояния до подзвездной точки магнитосферы $R_{ss} \sim 7R_{pl}$ по сравнению с полученным из наблюдений $\sim 20R_{pl}$ [1]. Ходаченко и др. [12] подробно рассмотрели магнитосферы близких планет-гигантов, обладающих магнитодиском. Для таких планет необходимо учитывать давление плазмы магнитодиска и его магнитного поля, что значительно увеличивает размер магнитосферы. Атмосферы близких планет-гигантов под сильным воздействием рентгеновского и УФ-излучения родительских звезд испытывают нагрев, ионизацию, гидродинамическое расширение и усиленное истечение плазмы. Этот отток может быть очень значительным и вместе с вращением планеты может приводить к созданию магнитодиска, или кольцевого тока, подобно Юпитеру или Сатурну [13, 14]. В случае этих газовых гигантов Солнечной системы источниками их дополнительной магнитосферной плазмы являются спутники, Ио и Энцелад соответственно. Для некоторых близких экзопланет-гигантов влияние их родительских звезд может быть настолько сильным, что отток плазмы из атмосферы может быть более эффективным для создания диска, чем выбросы от вулканических спутников. Поскольку нам неизвестны какие-либо подробности формирования магнитодиска НАТ–P–11b, мы можем только предполагать его существование на основании указанных выше физических процессов. В работе [12] отмечалось, что формирование магнитодиска изменяет размер магнитосферы на 40–70%. В работах [13, 14] подробно описано магнитное поле магнитодиска Юпитера. Его поле становится доминирующим за пределами альфвеновского радиуса в магнитосфере экзопланеты. На альфвеновском радиусе твердотельное вращение магнитосферной плазмы нарушается за счет радиального разлета плазмы под действием центробежной силы (см. также [15, 16]). Следовательно, возникает униполярный индуктор, он генерирует продольные электрические токи, которые замыкаются ионосферными педерсеновскими токами и перпендикулярными (радиальными) токами в экваториальной магнитосфере внутри магнитодиска. Если в близкой быстро вращающейся экзопланете атмосферное истечение плазмы сильное, то диск может быть достаточно мощным, и его протяженность может быть от магнитосферного альфвеновского радиуса до окрестности подзвездной точки R_{ss} [12], как в случае с Юпитером. Магнитодиск Юпитера увеличивает магнитное поле в подсолнечной точке в 2.6 раза [13]. Если бы в магнитосфере Юпитера отсутствовал дополнительный источник плазмы (Ио), расстояние до подсолнечной точки магни-

топаузы составляло бы $\sim 42R_J$. Наличие этого источника увеличивает R_{ss} до $\sim 100R_J$, т.е. в ~ 2.4 раза. Если у экзопланеты НАТ–P–11b существует подобный вулканический спутник и/или есть сильный отток атмосферной плазмы, то увеличение R_{ss} для нее, необходимое для согласования с результатами измерений (от $\sim 7R_{pl}$ до $\sim 20R_{pl}$), составит ~ 2.9 раза, того же порядка, что и для Юпитера.

Следует отметить, что НАТ–P–11b не единственная экзопланета, магнитное поле которой оценено. В работе [17] приведена оценка магнитного момента экзопланеты HD 209458b по Ly α наблюдениям на HST. Кроме того, в предположении, что альфвеновский Мах в звездном ветре больше единицы, авторами найдено расстояние до точки остановки потока препятствием и характеристики звездного ветра (плотность и скорость). Так что используемый в настоящей статье подход может быть применен и в других случаях.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе анализируется взаимодействие экзопланеты с оцененным магнитным полем НАТ–P–11b с обтекающим ее звездным ветром. Из баланса давлений получено значение расстояния от центра экзопланеты до фронтальной точки магнитопаузы R_{ss} . Для этого по имеющимся в литературе данным были рассчитаны динамическое ($k_{sw} p_{dynsw} = 1470$ нПа), тепловое ($p_{swthp} = n_{swthp} k T_{swthp} = 0.64$ нПа) и магнитное ($B_{sw}^2/2\mu_0 = 4.47$ нПа) давление с межпланетной стороны полуденной магнитопаузы. С магнитосферной стороны дневной магнитопаузы учитывалось только магнитное давление планеты (с магнитным полем на экваторе $B_{pl} = 2.4$ Гс) и поле экранирующих токов магнитопаузы. Найденное таким образом расстояние до подзвездной магнитопаузы равно $R_{ss} \sim 7R_{pl}$, где R_{pl} — радиус планеты. Это значение намного меньше, чем то, которое можно получить из результатов работы [1], рис. 4с,d, $\sim 20R_{pl}$, исходя из наблюдений HST. Из этого расхождения мы предположили, что, вероятно, планета-гигант НАТ–P–11b имеет мощный магнитодиск, формирующий из-за атмосферного истечения плазмы под действием близкой активной звезды К-типа НАТ–P–11. Как отмечено в [12], наличие такого диска значительно увеличивает внутреннее полное давление магнитосферы, что может привести к увеличению ее размера. Если бы в магнитосфере Юпитера отсутствовал дополнительный источник плазмы (Ио), расстояние до подсолнечной точки магнитопаузы составляло бы $\sim 42R_J$. Наличие этого источника увеличивает R_{ss} до $\sim 100R_J$, т.е. в ~ 2.4 раза. Если у

экзопланеты НАТ–P–11b существует подобный вулканический спутник и/или есть сильный отток атмосферной плазмы, то масштаб увеличения R_{ss} для нее, необходимый для согласования с результатами измерений (от $\sim 7R_{pl}$ до $\sim 20R_{pl}$), составит ~ 2.9 раза, и был бы того же порядка, что и для Юпитера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. Ben-Jaffel, G. E. Ballester, A. G. Muñoz, P. Lavvas, et al.*, *Nature Astron.* **6**, 141 (2022).
2. *D. Fabbian, R. Simoniello, R. Collet, S. Criscuolo, et al.*, *Astron. Nachricht.* **338**, 753 (2017).
3. *B. M. Morris, L. Hebb, J. R. A. Davenport, G. Rohn, and S. L. Hawley*, *Astrophys. J.* **846**, id. 99 (2017).
4. *Y. Vernisse, J. A. Rioussel, U. Motschmann, and K.-H. Glassmeier*, *Planet. Space Sci.* **137**, 40 (2017).
5. *J. S. Pineda and J. Villadsen*, *Nature Astron.* **7**, 569 (2023).
6. *D. Bhattacharyya, J. Clarke, J. Montgomery, B. Bonfond, J.-C. Gérard, and D. Grodent*, *J. Geophys. Res. Space Physics* **123**(1), 364 (2018).
7. *E. Belenkaya*, *Solar System Res.* **54**(2), 85 (2020).
8. *A. A. Vidotto, M. Jardine, J. Morin, J.-F. Donati, P. Lang, and A. J. B. Russell*, *Astron. and Astrophys.* **557**, id. A67 (2013).
9. *J. D. Nichols and S. E. Milan*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **461**, 2353 (2016).
10. *I. I. Alexeev*, in: *The Inner Magnetosphere: Physics and Modeling*. Geophysical Monograph **155**, edited by T. I. Pulkkinen, N. A. Tsyganenko, and R. H. W. Friedel (Washington, DC USA: Publ. by the AGU Books Board, AGU, 2005), p. 257.
11. *J. R. Spreiter and A. Y. Alksne*, *Ann. Rev. Fluid Mechanics* **2**, 313 (1970).
12. *M. L. Khodachenko, I. Alexeev, E. Belenkaya, H. Lammer, et al.*, *Astrophys. J.* **744**(1), id. 70 (2012).
13. *I. I. Alexeev and E. S. Belenkaya*, *Ann. Geophysicae* **23**(3), 809 (2005).
14. *E. Belenkaya*, *Planet. Space Sci.* **52**, 499 (2004).
15. *D. Evensberger, B. D. Carter, S. C. Marsden, L. Brookshaw, and C. P. Folsom*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **506**, 2309 (2021).
16. *D. Evensberger, S. C. Marsden, B. D. Carter, R. Salmeron, et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **524**, 2042 (2023).
17. *K. G. Kislyakova, M. Holmström, H. Lammer, P. Odert, and M. L. Khodachenko*, *Science* **346**, 981 (2014).

INTERACTION OF THE EXOPLANET HAT–P–11b WITH THE STELLAR WIND

E. S. Belenkaya^a

^aLomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia

This article discusses the possibility of the existence of a magnetodisk around the exoplanet HAT–P–11b. We used the available observational data to determine the properties of this exoplanet and the stellar wind passing by it, and obtained a rough estimate of the planetary magnetospheric scale. Our estimate was compared with the published results of calculations by the Particle-In-Cell method in a three-dimensional electromagnetic relativistic collisionless model of the magnetosphere. The resulting discrepancy between the magnetospheric scales obtained by these two methods is discussed, and its possible interpretation is proposed.

Keywords: magnetospheres, exoplanets, stellar wind