Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 162–164.

УДК 523.41
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-162
ORCID: 0009-0008-7667-9036

О РОЛИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПЛАНЕТЫ В ОСЛАБЛЕНИИ ПОТОКА АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Г.Н. Цуриков[1], Д.В. Бисикало[2, 1], В.И. Шематович[1], А.Г. Жилкин[1]

1Институт астрономии Российской академии наук, Москва, Россия, tsurikov@inasan.ru
2 Национальный центр физики и математики, Саров, Россия

ON THE ROLE OF PLANETARY MAGNETIC FIELD IN WEAKENING THE AURORAL ELECTRON FLUX

G.N. Tsurikov[1], D. V. Bisikalo[2,1], V.I. Shematovich[1], A. G. Zhilkin[1]

[1] Institute of Astronomy of the RAS, Moscow, Russia, tsurikov@inasan.ru
[2] National Center for Physics and Mathematics, Sarov, Russia

Аннотация. В докладе представлен новый подход для определения роли магнитного поля планеты в качестве защитного механизма к воздействию звездного ветра. Данный подход позволяет определить вклад собственного магнитного поля, B_{pl}, планеты в ослабление потока авроральных электронов, высыпающихся в термосферу, на основе изучения молекулы NO (индикатор высыпания электронов). По результатам расчетов показано, что за счет наличия собственного магнитного поля с земными параметрами плотность потока энергии высыпающихся электронов ослабевает на 1 порядок величины в условиях спокойного Солнца по сравнению с планетой с $B_{pl} = 0$. При увеличении плотности звездного ветра в 10 раз различие составляет 2 порядка величины. Это позволяет независимо оценить защитные свойства магнитного поля Земли к воздействию солнечного ветра.

Ключевые слова: магнитное поле планеты, высыпание электронов, окись азота, верхние атмосферы планет.

Abstract. This paper presents a new approach to determining the role of a planetary magnetic field as a protective mechanism against the effects of stellar wind. This approach allows us to determine the contribution of a planet's intrinsic magnetic field, B_{pl}, to the weakening of the energy flux of auroral electrons precipitating into the thermosphere based on the study of the NO molecule (an indicator of electron precipitation). We demonstrate that due to the presence of a planet's intrinsic magnetic field with Earth-like parameters, the energy flux of precipitating electrons is weakened by one order of magnitude under quiet-Sun conditions compared to a planet with $B_{pl} = 0$. With a 10-fold increase in stellar wind density, the difference is two orders of magnitude. This allows us to independently assess the protective properties of Earth's magnetic field against the effects of the solar wind.

Keywords: planetary magnetic field, electron precipitation, nitric oxide, upper atmospheres.

ВВЕДЕНИЕ

Наличие собственного магнитного поля, B_{pl}, у планеты земного типа считается одним из необходимых условий ее обитаемости [Meadows et al., 2018]. Существует множество оценок роли B_{pl} как защитного механизма к воздействию звездного ветра [Lundin et al., 2007; Ramstad et al., 2021; Gong et al., 2022], однако они приводят к противоположным выводам. Мы предлагаем независимый подход для решения этой проблемы (подробно представлен в [Бисикало и др., 2026]), определяя вклад B_{pl} в ослабление потока авроральных электронов с энергиями до 30 кэВ, которые высыпаются в верхнюю атмосферу (> 90 км). Данный подход основан на исследовании молекулы окиси азота, потенциального биомаркера, которая эффективно формируется в верхней N_2-O_2 атмосфере Земли при высыпании электронов и является прямым индикатором данного процесса [Barth et al., 2004]. Концентрация NO на высотах > 90 км напрямую зависит от плотности потока энергии высыпающихся электронов, Q_0 [Barth et al., 2004; Шематович и др., 2024]. Таким образом, сравнение общего количества молекул NO при различных значениях магнитного поля позволит сделать вывод об ослаблении Q_0 за счет наличия B_{pl}. В качестве первой расчетной точки мы рассматриваем Землю, $B_{pl} = B_E$, где концентрация NO в термосфере известна из спутниковых измерений [Barth et al., 2004]. В общем случае необходимо рассмотреть промежуточные расчетные точки с произвольным значением B_{pl}. Однако в этом случае необходимо детально промоделировать весь комплекс физико-химических процессов, который приводят к высыпанию электронов магнитосферного происхождения [Зеленый и др., 2016]. У данной чрезвычайно сложной для моделирования задачи есть относительно простое решение для случая $B_{pl} = 0$. Определить концентрацию NO в этом случае возможно с помощью разработанных и проверенных ранее 3D магнитогазодинамической (МГД) модели взаимодействия звездного ветра с планетой без собственного магнитного поля (типа Венеры) [Жилкин и др., 2025], кинетической [Bisikalo et al., 2022] и химической [Шематович и др., 2024] моделей образования NO при высыпании электронов.

МОЛЕКУЛА NO НА ПЛАНЕТАХ С РАЗЛИЧНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ B_{PL}

Как отмечалось ранее, основа предлагаемого подхода по определению вклада B_{pl} в ослабление Q_0 заключается в сравнении общего числа молекул NO на планете с и без B_{pl}. В данном разделе представлены результаты данного сравнения.

А) СЛУЧАЙ ЗЕМЛИ ($B_{PL} = B_E$)

Высыпания авроральных электронов в верхнюю атмосферу Земли в основном вызваны [Зеленый и др., 2016] взрывными процессами в хвосте магнитосферы (в результате магнитного пересоединения) и проникновением электронов через открытые магнитные силовые линии в области полярных каспов. Столкновения авроральных электронов с окружающим термосферным газом приводят к ударной диссоциации N_2, продукты которой, атомы азота в основном $N(^4S)$ и возбужденном метастабильном $N(^2D)$ состояниях, взаимодействуют с молекулярным кислородом O_2, в результате чего образуется NO. Это основной путь формирования NO в полярной термосфере Земли [Barth et al., 2004; Шематович и др., 2024]. В экваториальной области основной вклад в образование NO вносит диссоциация N_2 фотонами и фотоэлектронами [Barth et al., 2004].

Концентрацию молекулы NO в земной термосфере можно получить из спутниковых наблюдений. В данной работе мы используем измерения NO спутником SNOE (Student Nitric Oxide Explorer) [Barth et al., 2004]. По ультрафиолетовым наблюдениям спектральных ©-полос (203 – 204 нм) с помощью данного спутника определялась концентрация NO с 1998 по 2003 г. (во время 23-го 11-ти летнего солнечного цикла). В качестве первого шага мы рассмотрели измерения концентрации NO на 22.04.1998, так как в этот день показатель солнечной активности ($F_{10.7}$ = 88.5), поток солнечного X-ray излучения ($F_{2\text{-}7нм}$ = 0.355 Вт м$^{-2}$) были наименьшими за все время наблюдений SNOE. Индекс геомагнитной активности также был невысоким Ap = 6. Используя карту распределения концентрации NO по поверхности (см. рис. 1 в [Бисикало и др. 2024]), мы рассчитали общее количество молекул NO на дневной стороне, $N_{NO} = 1.29 \cdot 10^{29}$ молекул (табл. 1). На основе результатов корреляционного анализа, представленного в [Barth et al., 2004], мы также определили вклады в данную величину от солнечного рентгеновского излучения (52%) и высыпания электронов (48%) в условиях спокойного Солнца. Эти данные используются при последующих вычислениях для второй расчетной точки.

Б) ПЛАНЕТА ЗЕМНОГО ТИПА С $B_{PL} = 0$

Как отмечалось ранее, в качестве второй расчетной точки мы рассматриваем планету, идентичную Земле, но без собственного магнитного поля. В этом случае звездный ветер взаимодействует непосредственно с ионосферной оболочкой планеты, и у планеты формируется наведенное магнитное поле (по типу Венеры, см., [Баранов, Краснобаев 1977]). В результате такого взаимодействия образуется равномерный по поверхности поток высыпающихся в атмосферу электронов (диффузные высыпания электронов [Schneider et al., 2015]).

Чтобы определить концентрацию NO для данного случая, мы использовали разработанный комплекс моделей: А) 3D МГД модель взаимодействия звездного ветра с планетой с B_{pl} = 0 [Жилкин и др., 2025]. Основным выходом модели для данной задачи являются параметры высыпающихся в атмосферу электронов (плотность потока энергии, Q_0 и характеристическая энергия максвелловского распределения электронов, E_0); Б) Кинетическая модель взаимодействия электронов с окружающим газом верхней N_2-O_2 атмосферы [Bisikalo et al., 2022]. Основной выход модели – скорости диссоциации и ионизации N_2 электронным ударом; В) Химическая модель для расчета концентрации NO в верхней атмосфере [Шематович и др., 2024].

На рис. 1 представлен результат МГД моделирования обтекания планеты без собственного магнитного поля солнечным ветром в условиях спокойного Солнца.

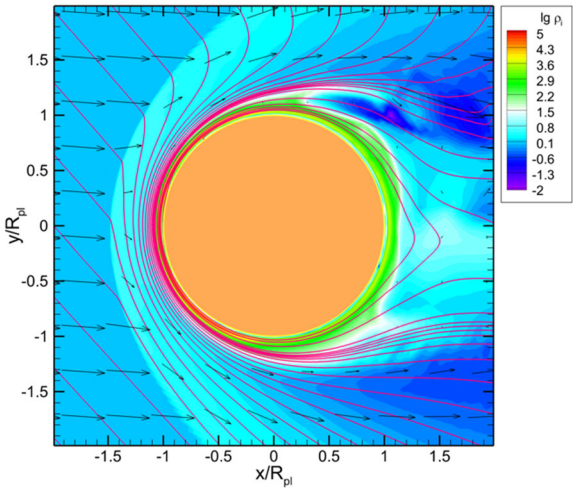

Рис. 1. Картина обтекания солнечным ветром планеты с B_{pl} = 0. Представлена орбитальная плоскость. Показаны распределения: плотности ионов (цветовая палитра); скорости (стрелки); магнитного поля (розовые линии). Закрашенный кружок соответствует радиусу Земли. Рисунок адаптирован из [Бисикало и др., 2026] (см. рис. 4).

Представленная картина обтекания планеты соответствует обтеканию Венеры: вокруг планеты формируется ударная волна, расстояние до нее в подсолнечной точке находится в 1.5 раза дальше, чем на Венере. Как и на Венере, с дневной стороны планеты формируется тонкий и плотный ионосферный слой, вдоль которого сгущаются магнитные силовые линии и тем самым образуется магнитный барьер, который в 7 раз толще в подсолнечной точке, чем на Венере (корона Земли более плотная и протяженная, чем корона Венеры).

По результатам последующего кинетического и химического моделирования мы определили общее количество молекул NO с дневной стороны, $N_{NO} = 1.23 \cdot 10^{30}$ молекул (табл. 1). Эта величина в 9.5 раз больше, чем на Земле.

Мы также провели моделирование и сравнение концентрации NO для случая, когда плотность солнечного ветра, $\rangle_{CB}$, была увеличена в 10 раз. В этом случае общее количество молекул NO для

планеты с B_{pl} = 0 в 43 раза больше, чем на Земле (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение общего числа молекул NO

Вариант	Земля $B_{pl} = B_E$	Планета с $B_{pl} = 0$	Различие $N_{Bpl=0}/N_{BE}$
Спокойное Солнце	$1.29 \cdot 10^{29}$	$1.23 \cdot 10^{30}$	9.5
$\rangle_{СВ}$ увеличена в 10 раз	$1.54 \cdot 10^{29}$	$6.64 \cdot 10^{30}$	43

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных расчетов показано, что общее количество молекул NO на планете без магнитного поля примерно в 10 раз больше, чем на Земле в условиях спокойного Солнца, и примерно в 40 раз больше при «активных» условиях (плотность солнечного ветра увеличена на 1 порядок величины). Зная зависимость N_{NO} от Q_0 (рис. 2), аналогичный вывод можно сделать и для плотности потока энергии высыпающихся в атмосферу авроральных электронов, которая из-за наличия B_{pl} на планете ослабевает на 1 и 2 порядка величины по сравнению с планетой с B_{pl} = 0 при спокойных и активных условиях, соответственно.

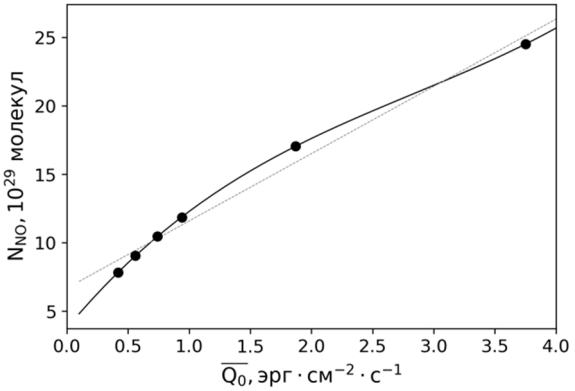

Рис. 2. Зависимость общего количества молекул от усредненной по поверхности плотности потока энергии высыпающихся электронов для планеты с B_{pl} = 0.

Полученная оценка показывает роль планетарного магнитного поля в качестве защитного механизма к высыпанию электронов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-12-00364-П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баранов В.Б., Краснобаев К.В. Гидродинамическая теория космической плазмы. Москва: Наука, 1977. 336 с.

Бисикало Д.В., Шематович В.И., Жилкин А.Г., Цуриков Г.Н. Оценка защитных свойств магнитного поля планеты на примере высыпания электронов в атмосферу Земли // Астрономический Журнал, 2026. Т. 103. № 4. С. 191-205.

Жилкин А.Г., Шематович В.И., Цуриков Г.Н. Бисикало Д.В. Трехмерная численная модель для исследования высыпания электронов в верхние атмосферы экзопланет типа Венеры // Астрономический Журнал, 2025. Т. 102. № 1. С. 35-48.

Зелёный Л.М., Малова Х.В., Григоренко Е.Е., Попов В.Ю. Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга—Сыроватского до наших дней // Успехи физических наук, 2016. Т. 186. С. 1153–1188.

Шематович В.И., Бисикало Д.В., Цуриков Г.Н., Жилкин А.Г., Нетепловые процессы образования окиси азота при высыпании авроральных электронов в верхние атмосферы планет земного типа // Астрономический Журнал, 2024. Т. 101. № 8. С. 770-794.

Barth C.A., Baker D.N., Bailey S.M. Seasonal variation of auroral electron precipitation // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. P. L04809.

Bisikalo D., Shematovich V., Hubert B. The Kinetic Monte Carlo Model of the Auroral Electron Precipitation into N_2-O_2 Planetary Atmospheres // Universe, 2022. Vol. 8, № 8. P. 437.

Gong F., Yu Y., Cao J., Wei Y., et al. Simulating the Solar Wind-Magnetosphere Interaction During the Matuyama-Brunhes Paleomagnetic Reversal // Geophysical Research Letters, 2022. Vol. 49. P.3.

Lundin R., Lammer H., Ribas I. Planetary Magnetic Fields and Solar Forcing: Implications for Atmospheric Evolution // Space Science Reviews, 2007. Vol. 129. P. 245–278.

Meadows V.S., Barnes R.K. Factors Affecting Exoplanet Habitability. Handbook of Exoplanets. Springer International Publishing, 2018. P. 57.

Ramstad R., Barabash S. Do Intrinsic Magnetic Fields Protect Planetary Atmospheres from Stellar Winds? // Space Science Reviews, 2021. Vol. 217. P. 36.

Schneider N.M., Deighan J.I., Jain S.K., Stiepen A., et al. Discovery of diffuse aurora on Mars // Science, 2015. Vol. 350. P. 0313.