

ВКЛАД КИНЕТИЧЕСКИХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ТРАНСПОРТ ИОНОВ ЧЕРЕЗ НОЧНУЮ МАГНИТОПАУЗУ ЗЕМЛИ

^{1,2}А.С. Лукин, ^{1,3}А.В. Артемьев, ¹А.А. Петрукович

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
as.lukin.phys@gmail.com

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США

CONTRIBUTION OF KINETIC ALFVEN WAVES TO ION TRANSPORT THROUGH THE EARTH'S NIGHTSIDE MAGNETOPAUSE

^{1,2}A.S. Lukin, ^{1,3}A.V. Artemyev, ¹A.A. Petrukovich

¹Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
as.lukin.phys@gmail.com

²National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russia

³Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, USA

Аннотация. Основная популяция заряженных частиц (ионов) в земной магнитосфере — это плазма солнечного ветра, проникающая в магнитосферу через магнитопаузу. Существенный вклад в транспорт ионов через ночную магнитопаузу Земли может вносить диффузия частиц за счет их рассеяния при взаимодействии с низкочастотными электромагнитными волнами. Рассматривается механизм такого рассеяния для одной из наиболее интенсивных волновых мод, наблюдаемых вблизи магнитопаузы, — кинетических альфвеновских волн (КАВ). При этом используется реалистичная модель магнитопаузы Земли с неоднородным внешним магнитным полем, моделирующим тангенциальный разрыв. Получены оценки коэффициентов диффузии ионов в пространстве энергии — питч-угла для различных расстояний от магнитопаузы. Показано, что основным эффектом взаимодействия волн и частиц является изотропизация питч-угловых распределений потока ионов солнечного ветра.

Ключевые слова: кинетические альфвеновские волны, магнитопауза, магнитосфера.

Abstract. Solar wind charged particle (ions) transport across the magnetopause can be significantly contributed by ion cross-field diffusion due to ion scattering by electromagnetic waves. In this presentation, we focus on such scattering mechanism for the most intense near-magnetopause wave emission, kinetic Alfvén waves (KAWs). We use a realistic model of the Earth flank magnetopause with nonuniform ambient magnetic field fitting the tangential discontinuity. We estimate diffusion coefficients in energy pitch-angle space for different distances from the magnetopause and show that the main effect of the wave-particle interactions is an isotropization of pitch-angle distributions of solar wind ions.

Keywords: kinetic Alfvén waves, magnetopause, magnetosphere.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из наиболее интенсивных низкочастотных волновых возмущений, наблюдаемых в окрестности магнитопаузы, являются кинетические альфвеновские волны (КАВ) [Chaston et al., 2008, 2020, 2021; Gershman et al., 2017]. Данная волновая мода характеризуется продольной компонентой электрического поля и, как следствие, может эффективно ускорять заряженные частицы вдоль магнитных силовых линий. В быстрых плазменных потоках солнечного ветра КАВ обычно наблюдаются как широкий электромагнитный спектр, характеризующийся высокими значениями интенсивности электрического поля в области больших частот, соответствующих доплеровскому сдвигу больших волновых чисел. Плотный частотный спектр рассматриваемых волн приводит к перекрытию резонансов волн и частиц, и, как следствие, — к диффузии ионов в питч-угловом и энергетическом пространствах [Johnson, Cheng, 1997a, 2001].

Мы рассматриваем диффузию ионов, вызванную их взаимодействием с кинетической альфвеновской турбулентностью для реалистичной модели фланговой магнитопаузы Земли. Профили компонент магнитного поля и плазменных параметров были подобраны в соответствии со статистикой спутниковых наблюдений фланговой магнитопаузы по данным

миссий ARTEMIS и MMS [Lukin et al., 2019, 2020]. Спектр кинетических альфвеновских волн задается как сумма нескольких тысяч плоских волн, имеющих различные частоты и углы распространения. Для оценки коэффициентов диффузии мы рассчитываем изменение энергии и питч-угла большого ансамбля частиц при движении в заданной конфигурации внешнего магнитного поля и при наличии ансамбля КАВ.

КОНФИГУРАЦИЯ СИСТЕМЫ

В нашем моделировании мы использовали следующие параметры: амплитуду фонового магнитного поля $B_0 = 20$ нТл, температуру ионов в магнитослое (в области потока солнечного ветра) $T_{\text{IMSH}} = 300$ эВ, плотность плазмы в магнитослое и магнитосфере соответственно $n_{\text{IMSH}} = 15 \text{ см}^{-3}$, $n_{\text{IMSP}} = 2 \text{ см}^{-3}$, скорость ионов в магнитослое $V_{\text{IMSH}} = V_{\parallel \text{MSH}} = 400$ км/с, пространственный масштаб магнитопаузы $L = 2000$ км.

Безразмерные параметры

$$x = \frac{x}{\rho_{\text{IMSH}}}, t = t\omega_{\text{IMSH}}, v = \frac{v}{v_{\text{TMSH}}}, B = \frac{B}{B_0}, c_L = \frac{\rho_i}{L},$$

где ρ_{IMSH} , ω_{IMSH} , v_{TMSH} — ионный гирорадиус, циклотронная частота и тепловая скорость ионов глубоко в магнитослое ($x \rightarrow -\infty$), т. е. далеко от магнитопаузы.

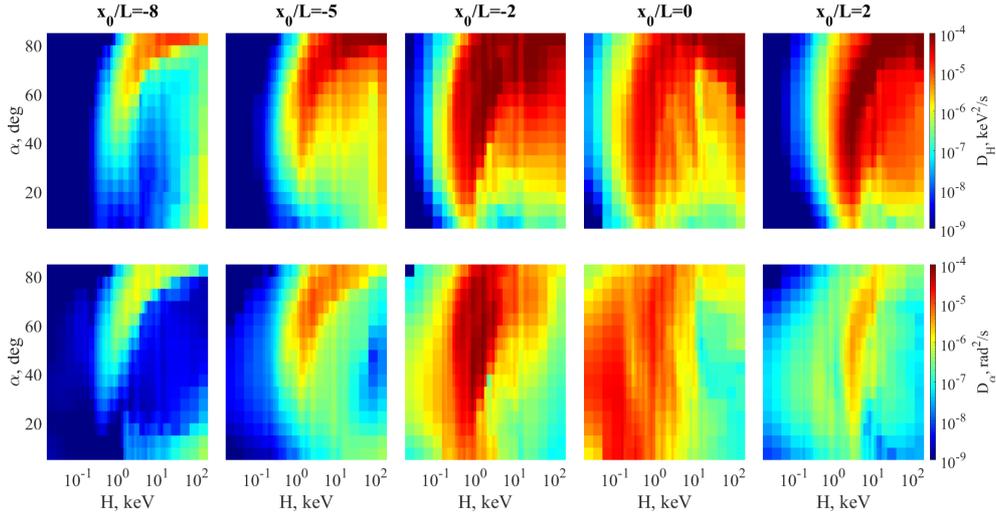


Рис. 1. Коэффициент диффузии ионов по энергии и питч-углу в зависимости от расстояния до магнитопаузы, начальных энергии и питч-угла частиц

Магнитное поле

$$\mathbf{V}(x) = \left\{ 0, \frac{1}{\cosh(x \cdot c_L)}, \tanh(x \cdot c_L) \right\},$$

профиль плотности

$$n(x) = 0.5(1 - n_{\text{MSH}})(1 - \tanh(x \cdot c_L)) + n_{\text{MSP}},$$

температура определяется из условия баланса давления, координата x определяет расстояние до магнитопаузы, расположенной в $x=0$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ

Мы задаем 100 гармоник по частоте в диапазоне $[0.01\omega_{ci}, 0.6\omega_{ci}]$, 5 углов распространения в диапазоне $85^\circ - 89^\circ$ и 5 фазовых углов, т. е. всего 2500 волн. Мощность поперечной компоненты магнитного поля $B_{\perp}^2(\omega) = B_I^2 \omega^{-2}$, $B_I = 10^{-4}$ нТл². Зная дисперсионное и поляризационные соотношения для КАВ [Stasiewicz et al., 2000; Chaston et al., 2012], мы можем восстановить все остальные компоненты вектора электромагнитного поля для каждой отдельной гармоники. Введем дополнительный множитель в амплитуды волновых полей таким образом, чтобы интенсивность волн падала внутри магнитосферы после пересечения магнитопаузы (при $x > 0$).

Для каждого набора параметров (расстояние от магнитопаузы, питч-угол и энергия частиц) мы трассировали 1024 частицы и аппроксимировали средние квадратичные изменения энергии и питч-угла от времени:

$$\langle (\Delta H - \langle \Delta H \rangle)^2 \rangle \sim D_{\text{HH}} t,$$

$$\langle (\Delta \alpha - \langle \Delta \alpha \rangle)^2 \rangle \sim D_{\alpha\alpha} t.$$

КОЭФФИЦИЕНТЫ ДИФФУЗИИ

На рис. 1 показаны оценки коэффициентов энергетической и питч-угловой диффузии как функции питч-угла и энергии частиц для различных радиальных расстояний от магнитопаузы. Коэффициенты

возрастают при уменьшении расстояния до магнитопаузы и достигают пиковых значений

$$D_{\alpha\alpha} \sim 10^{-4} \frac{\text{рад}^2}{\text{с}}, D_{\text{HH}} \sim 10^{-4} \frac{\text{кэВ}^2}{\text{с}}$$

вблизи магнитопаузы. Кроме того, коэффициенты имеют локализованные максимумы в пространстве энергии и питч-угла. Ионы с большими энергиями (> 1 кэВ) эффективно рассеиваются на больших питч-углах, а с уменьшением энергии эффективность рассеяния растет на малых питч-углах. Таким образом, диффузия ионов по питч-углам (и соответствующая ей пространственная диффузия) должна приводить к селективному по энергии механизму транспорта частиц через магнитопаузу [Lukin et al., 2019].

ЭВОЛЮЦИЯ ПИТЧ-УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

Используя аналог стохастических дифференциальных уравнений, можно учесть полученные коэффициенты диффузии при расчете фазовых траекторий ионов. На рис. 2 показаны распределения частиц в пространствах координата до магнитопаузы — скорость и координата до магнитопаузы — питч-угол для трех моментов времени. Основным эффектом взаимодействия частиц с КАВ является изотропизация распределений в питч-угловом пространстве, в то время как транспорт плазмы через магнитопаузу в присутствии ансамбля таких возмущений усиливается всего в несколько раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные коэффициенты диффузии ионов (протонов) солнечного ветра на КАВ вблизи ночной магнитопаузы могут быть использованы для моделирования эффектов взаимодействия волна—частица (через систему стохастических дифференциальных уравнений) при трассировании ионов в реалистичных полях магнитослоя на длительных интервалах времени. Кроме того, локализация максимума коэф-

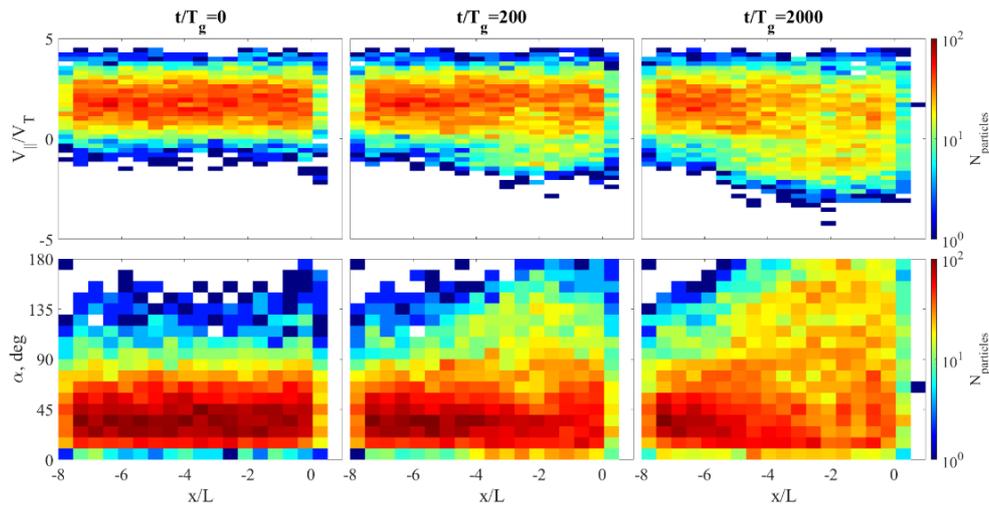


Рис. 2. Распределение частиц в пространстве поперечной координаты и продольной скорости, нижний ряд (вверху), распределение частиц в пространстве поперечной координаты и питч-угла (внизу). Столбцы соответствуют трем различным моментам времени

фициентов диффузии в энергетическом и питч-угловом пространствах, а также рассмотренная эволюция функций распределения частиц указывают на наличие селективного механизма транспорта частиц поперек магнитопаузы, существование которого обсуждалось ранее в работах, основанных на спутниковых наблюдениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Chaston C.C., Travnicsek P. Ion Scattering and energization in filamentary structures through Earth's magnetosheath. *Geophys. Res. Lett.* 2021. Vol. 48, no. 15. e2021GL094029.
- Chaston C., et al. Turbulent heating and cross-field transport near the magnetopause from THEMIS. *Geophys. Res. Lett.* 2008. Vol. 35, no. 17.
- Chaston C.C., et al. Energy transport by kinetic-scale electromagnetic waves in fast plasma sheet flows. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2012. Vol. 117, A9.
- Chaston C.C., Travnicsek P., Russell C.T. Turbulent wave-field morphology and ion scattering in the magnetosheath. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, no. 22. e2020GL089613.

Gershman D.J., et al. Wave-particle energy exchange directly observed in a kinetic Alfvén-branch wave. *Nature communications* 2017. Vol. 8, id. 14719. P. 1–10.

Johnson J.R., Cheng C.Z. Kinetic Alfvén waves and plasma transport at the magnetopause. *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24, iss. 11. P. 1423–1426.

Johnson J.R., Cheng C.Z. Stochastic ion heating at the magnetopause due to kinetic Alfvén waves. *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28, iss. 23. P. 4421–4424.

Lukin A.S., et al. Spatial scales and plasma properties of the distant magnetopause: Evidence for selective ion and electron transport. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. Vol. 124, iss. 7. P. 5027–5041.

Lukin A.S., et al. Comparison of the flank magnetopause at near-Earth and lunar distances: MMS and ARTEMIS observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2020. Vol. 125, iss. 11. e2020JA028406.

Stasiewicz K., et al. Small scale Alfvénic structure in the aurora. *Space Sci. Rev.* 2000. Vol. 92, iss. 3. P. 423–533.