

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАХВАТОВ  
РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ В РЕЗОНАНС ЛАНДАУ  
И В ЦИКЛОТРОННЫЙ РЕЗОНАНС ДЛЯ  
КВАЗИЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН В  
НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

А.В. Артемьев, А.А.Васильев

Институт Космических Исследований РАН, Москва  
E-mail: ante0226@gmail.com

**Аннотация.** В работе исследуется резонансное взаимодействие релятивистских электронов и свистовых волн, распространяющихся в квази-электростатической моде в неоднородном магнитном поле радиационных поясов. Спутниковые наблюдения о распределении углов распространения и амплитуд таких волн используются для построения модели распределения волнового поля вдоль силовых линий. Рассмотрены два резонанса: Ландау резонанс и первый циклотронный резонанс. Показано, что захват электронов в Ландау резонанс более вероятное событие для квази-электростатических волн.

### 1. Введение

Ускорение и питч-угловая диффузия электронов в радиационных поясах Земли активно исследуются, начиная с первых космических экспериментов, из-за того влияние, которое оказывают ускоренные электроны на чувствительную электронику искусственных спутников [1, 2]. Последние спутниковые наблюдения показали, что существенный рост потоков ускоренных электронов наблюдается в локализованных областях и связан с резонансным ускорением этих электронов свистовыми (whistler) волнами [3, 4]. При этом, характер и эффективность резонансного ускорения существенным образом зависит от параметров распределения волнового поля вдоль силовых линий магнитного поля и от направления распространения волн [5]. Так, основные исследования резонансного ускорения электронов проводились в рамках квази-линейного приближения [6-8], предполагающего небольшие амплитуды волн. С другой стороны, многочисленные спутниковые исследования указывают на

существование в радиационных поясах популяции высокоамплитудных волн [9,10], распространяющихся под большими углами к внешнему магнитному полю [11]. Свистовые волны с таким углами распространения переходят в квази-электростатическую моду, когда доминирует электрическое поле волн [12]. В этом случае электроны могут взаимодействовать с волнами в режиме резонанса Ландау [5], в то время как в классической схеме с параллельным распространением свистовых волн только циклотронные резонансы доступны для рассмотрения [5]. Как следствие, возникает вопрос о соотношении эффективности ускорения электронов свистовыми волнами, взаимодействующими с частицами в режимах Ландау и циклотронного резонансов. Именно этот вопрос мы и рассматриваем в данной работе.

## 2. Уравнения движения и захват в резонанс

Мы рассматриваем движение релятивистских электронов с массой  $m_e$  и зарядом  $-e$  в дипольном магнитном поле  $B(z)$ , заданном моделью [13], и в поле электростатической волны с потенциалом  $\Phi_0 u(z)$ , где  $\Phi_0$  – амплитуда потенциала, а функция  $u(z)$  задаёт распределение поля волны ( $z$  – координата вдоль силовой линии магнитного поля). Данная функция получена при аппроксимации статистических данных спутниковых измерений [14]. Гамильтониан рассматриваемой системы выглядит следующим образом [15]:

$$H = m_e c^2 \gamma - e \Phi_0 u(z) \sin \phi$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \frac{p_x^2 + p_z^2}{(m_e c)^2} + \left( \frac{ex}{c^2 m_e} B(z) \right)^2}$$

где  $(p_z, z)$ ,  $(p_x, x)$ , – пары сопряжённых переменных ( $x$  – координата поперёк силовой линии магнитного поля), а фаза волны  $\phi$  заданна как

$$\phi = \phi_0 + \int^z k_{\parallel}(z') dz' + k_{\perp} x - \omega t$$

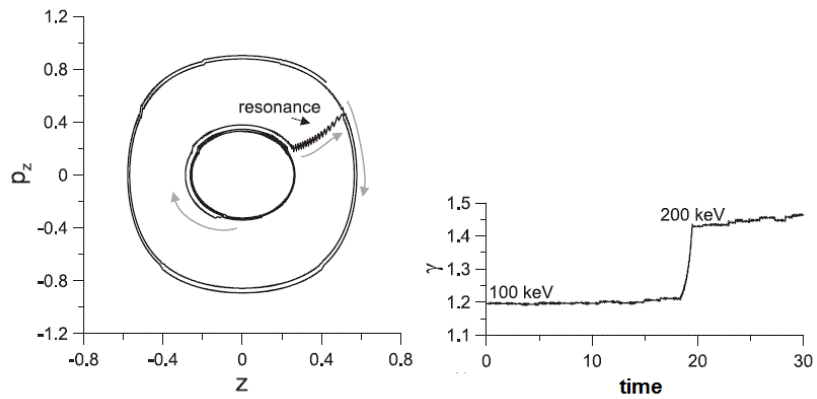
Здесь  $\phi_0$  – начальная фаза волны,  $k_{\parallel}(z)$ ,  $k_{\perp}$  – компоненты волнового вектора,  $\omega$  – частота волны. В соответствии со спутниковыми

наблюдениями [9-11], мы рассматриваем волны, распространяющиеся под жандрановым углом к внешнему магнитному полю [15]. Соответствующие значения компонент волновых векторов и их эволюция вдоль силовых линий магнитного поля приведены в работе [11, 15].

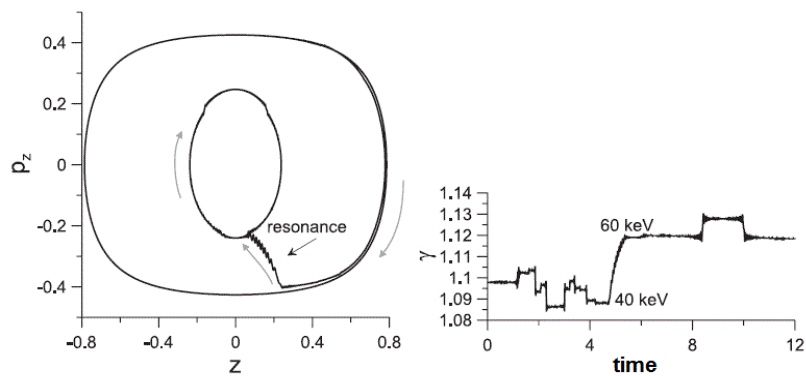
Примеры резонансного взаимодействия волны и электрона показаны на рисунках 1 и 2 для Ландау и циклотронного резонансов, соответственно. Мы используем безразмерные переменные и безразмерное время (см. [15]). Рассмотрим подробнее эти два рисунка. В обоих случаях частица движется по замкнутым траекториям на плоскости  $(z, p_z)$ . Это движение соответствует баунс-осцилляциям электрона между точками отражения. При захвате в резонанс Ландау, частица начинает двигаться в направлении роста координаты  $z$ , то есть волна ускоряет частицу и «тащит» её вдоль магнитного поля к большим широтам. Для циклотронного резонанса ситуация противоположная – после захвата частица движется в область меньших  $z$ . В обоих случаях движение в захвате сопровождается ростом энергии (ростом  $\gamma$ ): начальная энергия электронов равна 100 кэВ и 40 кэВ, а их финальная энергия составляет 200 кэВ (для резонанса Ландау) и 60 кэВ (для циклотронного резонанса). При этом частицы, покинувшие резонанс, начинают двигаться по замкнутым траекториям на плоскости  $(z, p_z)$ . Размер траектории увеличивается для частицы, ускоренной в резонансе Ландау, и уменьшается для частицы, ускоренной в циклотронном резонансе. То есть, ускорение в резонансе Ландау сопряжено с уменьшением экваториального питч-угла частицы (увеличением координаты  $z$  точки отражения), а ускорение в циклотронном резонансе соответствует росту экваториального питч-угла.

Захват в резонанс является вероятностным явлением [17], то есть не каждая частица, проходящая через резонанс, будет захвачена. Для того, что бы определить вероятность захвата в циклотронный  $\Pi_{fin}$  и в Ландау  $\Pi_{Lan}$  резонансы, мы используем подход, изложенный в работе [15]. При этом мы вычисляем значения вероятностей, соответствующих максимальному набору энергии частицами при заданной начальной энергии. Отношения этих вероятностей для двух значений амплитуд волн показаны на рисунке 3. Как видно из графиков, захват в резонанс Ландау существенно более вероятное явление для частиц с энергиями

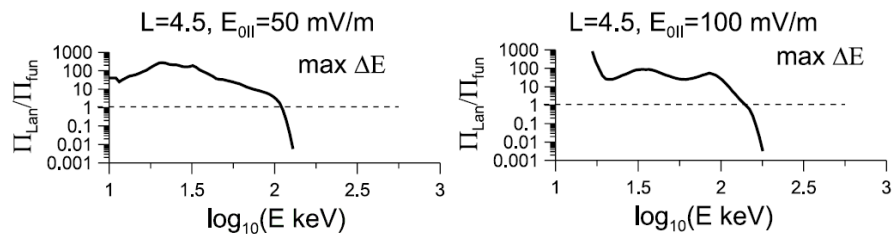
меньше 100 кэВ. Для частиц с большими энергиями отношение вероятностей  $\Pi_{Lan}/\Pi_{fun}$  резко падает.



**Рисунок 1.** Траектория электрона на плоскости  $(z, p_z)$  и график его энергии как функция времени. Показан захват в резонанс Ландау.



**Рисунок 2.** Траектория электрона на плоскости  $(z, p_z)$  и график его энергии как функция времени. Показан захват в циклотронный резона



**Рисунок 3.** Отношение вероятностей захвата в Ландау и в циклотронный резонансы для двух амплитуд волн.

Таким образом, в этой работе мы показали, что релятивистские электроны могут ускоряться за счёт захвата в Ландау резонанс наклонной свистовой волной в радиационных поясах Земли. При этом вероятность такого процесса выше, чем вероятность захвата в циклотронный резонанс для электронов с энергиями меньше 100 кэВ.

Работа поддержана грантом МК-1781.2014.2.

### Литература

- [1]. Horne, R. B., et al. (2013) Space weather impacts on satellites and forecasting the Earth's electron radiation belts with SPACECAST, *Space Weather*, 11, 169-186, doi:10.1002/swe.20023.
- [2]. Choi, H.-S., et al. (2011), Analysis of GEO spacecraft anomalies: Space weather relationships, *Space Weather*, 9, S06001, doi:10.1029/2010SW000597.
- [3]. Chen, Y., G. D. Reeves, and R. H. W. Friedel (2007), The energization of relativistic electrons in the outer Van Allen radiation belt, *Nat. Phys.*, 3, 614–617, doi:10.1038/nphys655.
- [4]. Reeves, G. D., et al. (2013), Electron Acceleration in the Heart of the Van Allen Radiation Belts, *Science*, 341, 6149, doi:10.1126/science.1237743.
- [5]. Shklyar, D., and H. Matsumoto (2009), Oblique whistler-mode waves in the inhomogeneous magnetospheric plasma: Resonant interactions with energetic charged particles, *Surv. Geophys.*, 30, 55–104, doi:10.1007/s10712-009-9061-7.
- [6]. Glauert, S. A., and R. B. Horne (2005), Calculation of pitch angle and energy diffusion coefficients with the PADIE code, *J. Geophys. Res.*, 110, A04206, doi:10.1029/2004JA010851.

- [7]. Shprits, Y. Y., D. A. Subbotin, N. P. Meredith, and S. R. Elkington (2008), Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and loss, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 70, 1694–1713, doi:10.1016/j.jastp.2008.06.014.
- [8]. Mourenas, D., A. V. Artemyev, O. V. Agapitov, and V. Krasnoselskikh (2014), Consequences of geomagnetic activity on energization and loss of radiation belt electrons by oblique chorus waves, *J. Geophys. Res.*, 119, 2775-2796.
- [9]. Cattell, C., et al. (2008), Discovery of very large amplitude whistler-mode waves in Earth's radiation belts, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L01105, doi:10.1029/2007GL032009.
- [10]. Cully, C. M., J. W. Bonnell, and R. E. Ergun (2008), THEMIS observations of long-lived regions of large-amplitude whistler waves in the inner magnetosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17S16, doi:10.1029/2008GL033643.
- [11]. Agapitov, O., Artemyev, A., Mourenas, D., Krasnoselskikh, V., Bonnell, J., Le Contel, O., Cully, C. M., Angelopoulos, V. (2014), *J. Geophys. Res.* 119, 16061626.
- [12]. Ginzburg, V. L., and A. A. Rukhadze (1975), *Waves in magnetoactive plasma*. 2nd Revised Edition, Moscow, Izdatel'stvo Nauka, Russian.
- [13]. Bell, T. F. (1984), The nonlinear gyroresonance interaction between energetic electrons and coherent VLF waves propagating at an arbitrary angle with respect to the earth's magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 89, 905–918, doi:10.1029/JA089iA02p00905.
- [14]. Artemyev, A., V. Krasnoselskikh, O. Agapitov, D. Mourenas, and G. Rolland (2012), Non-diffusive resonant acceleration of electrons in the radiation belts, *Phys. Plasmas*, 19, 122,901, doi:10.1063/1.4769726.
- [15]. Artemyev, A. V., A. A. Vasiliev, D. Mourenas, O. Agapitov, and V. Krasnoselskikh (2013), Nonlinear electron acceleration by oblique whistler waves: Landau resonance vs. cyclotron resonance, *Phys. Plasmas*, 20, 122,901, doi:10.1063/1.4836595.
- [16]. Gendrin, R. (1961), Le guidage des whistlers par le champ magnetique, *Planet. Space Sci.*, 5, 274, doi:10.1016/0032-0633(61)90096-4.
- [17]. V. I. Arnold, V. V. Kozlov, and A. I. Neishtadt, *Mathematical Aspects of Classical and Celestial Mechanics*, 3rd ed. (Springer-Verlag, New York, 2006).