

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ШУМЫ, ВЫЗВАННЫЕ СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

А.Т. Ковалев, В.А. Пуштарик

Рассмотрено синхротронное излучение релятивистских электронов в магнитном поле Земли. Показано, что спектр этого излучения для электронов с энергией до 8 МэВ, характерных для спектра электронов в эксперименте «Морская звезда», практически перекрывает весь радиочастотный диапазон от 1 кГц до 5 ГГц. В случае интенсивного источника такого типа в ионосфере, синхротронное излучение может представлять серьезную помеху современным средствам связи и навигации.

Введение

Ко времени открытия радиационных поясов классическая теория синхротронного излучения (СИ) была уже хорошо разработана [Иваненко, Соколов, 1951; Ландау, Лифшиц, 1967; Тернов, 1995.] и широко использовалась, в частности, в радиоастрономии. Поэтому предположение о возможности измерения синхротронного излучения электронов естественных радиационных поясов появилось сразу после их открытия [Dyce, Nakada, 1959]. Применительно к излучению электронов, захваченных в магнитном поле Земли, теория СИ рассмотрена в [Peterson, 1963; Vesecky, 1969] и в ряде других работ. В цикле работ [Dyce, Horowitz, 1963; 1966; Peterson, Hower, 1963; 1966; Ochs, 1966], связанных с операцией «Морская звезда», на системе риометров были проведены измерения всплесков радиоизлучения на частотах 30 и 50 МГц. Сопоставление этих измерений со спутниковыми и ракетными данными по потокам быстрых электронов подтвердило происхождение этих радиос шумов как синхротронного излучения электронов в процессе формирования искусственного радиационного пояса. Постепенный спад интенсивности излучения из внутреннего радиационного пояса на протяжении многих месяцев соответствует постепенному спаду измеряемого потока быстрых электронов по мере возвращения радиационного пояса к невозмущенному состоянию [Ochs, 1966].

В невозмущенном состоянии спектральная яркость излучения из внутреннего радиационного пояса порядка или больше яркости участков неба с наибольшей интенсивностью внеземного радиоизлучения на частотах ВЧ диапазона, то есть единицы–десятки МГц ($\sim 10^{-20}$ Вт·м⁻²·Гц⁻¹·стерад⁻¹) и на 2 порядка величины превышают яркость участков неба с наименьшей интенсивностью ($< 10^{-22}$ Вт·м⁻²·Гц⁻¹·стерад⁻¹) [Vesecky, 1969]. В НЧ диапазоне (на частотах ниже 300 кГц) синхротронное излучение захваченных в геомагнитном поле электронов может быть существенно более интенсивным по сравнению с космическим фоном [Frankel, 1973].

Наибольшее число работ по СИ связано с возмущением магнитосферы и высыпаниями электронов. В работе [Дудник, Минеев, 1996] сделаны попытки восстановления энергетического распределения электронов, высыпающих в обла-

сти Южно-атлантической аномалии по спорадическим всплескам радиоизлучения на частотах 38 и 325 МГц (с привлечением данных спутника «Космос-1686») – на примере возмущения внутреннего радиационного пояса в максимуме сильной магнитной бури 25 ноября 1986 г. В работе [Мусатенко и др., 2006] проведены измерения, с помощью наземных радиоспектрометра и радиотелескопа, излучения на гармониках ($n = 11, 12$) циклотронной частоты коротких пучков слаборелятивистских электронов (десятки кэВ) вблизи области их отражения в среднеширотной ионосфере (Троицк-Пушино). Существенным для идентификации СИ был характерный вид записи в виде перевернутой параболы вследствие вначале увеличивающейся частоты, по мере приближения к земле, затем, после отражения, уменьшающейся. Записи такого вида невозможны для сгустка релятивистских электронов, так как после отражения электрон излучает в сторону от Земли.

Оценки интенсивности СИ электронов спектра деления U-238 сделаны в работах [Ланцбург, 1998; Ланцбург, Никольская, 1999] для условий, соответствующих низким широтам. Получены оценки интенсивности для частот от 1 до 300 МГц. Показано, также, что в невозмущенных условиях ослабление синхротронного излучения при прохождении через ионосферу невелико.

Цель настоящей работы показать, что для импульсного источника релятивистских электронов в ионосфере и плазмосфере они могут стать источником чрезвычайно широкополосных шумов, от килогерц до нескольких ГГц, достаточно высокой интенсивности, и являться серьезной помехой для навигационных и коммуникационных систем.

Общие закономерности синхротронного излучения электронов

При вращении в магнитном поле по циклической траектории электрон излучает как заряд, движущийся с ускорением. Для электрона с полной энергией

$$E = mc^2\gamma,$$

где m – масса покоя электрона, c – скорость света, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$, $\beta = v/c$, полная интенсивность излучения во всем диапазоне частот равна

$$W = 2\sigma_T \frac{B^2}{8\pi} (\gamma^2 - 1), \quad (1)$$

где B – индукция внешнего магнитного поля, $\sigma_T \cong \frac{2}{3} \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ – томсоновское сечение рассеяния. Для нерелятивистского электрона ($\gamma \cong 1$) интенсивность излучения очень мала и сосредоточена в основном на циклотронной частоте $\omega_c = eB/mc$, излучение на каждой последующей гармонике этой частоты меньше на фактор β^2 . Для нерелятивистского электрона основная частота излучения (циклотронная частота) практически не зависит от его энергии. В релятивистской области основная частота $\omega_0 = eB/\gamma mc$ пропорциональна отношению величины магнитной индукции к полной энергии электрона, то есть уменьшается с увеличением энергии. При наличии составляющей $v_{\parallel}$ скорости вдоль магнитного поля, так что

$$\beta^2 = \frac{v^2}{c^2} = \frac{v_{\perp}^2}{c^2} + \frac{v_{\parallel}^2}{c^2} = \beta_{\perp}^2 + \beta_{\parallel}^2,$$

то есть при движении по винтовой линии, эта частота увеличивается за счет доплеровского смещения

$$\omega = \frac{\omega_0}{1 - \beta_{\parallel} \cos \theta}, \quad (2)$$

где θ – угол между направлением излучения и направлением магнитного поля.

Интенсивность, W быстро растет с увеличением энергии, резко увеличивается интенсивность излучения на гармониках. При $\gamma = 2$ (кинетическая энергия равна 511 кэВ, то есть энергии покоя электрона), энергия излучается преимущественно на гармониках основной частоты. В ультрарелятивистском пределе $\gamma \gg 1$ спектральный максимум излучения приходится на частоту [Арцимович, Померанчук, 1946]

$$\omega_{\max} \cong \frac{1}{2} \omega_c \gamma^3.$$

Интенсивность излучения в единичный телесный угол в направлении θ равна [Тернов, 1995]

$$\frac{dW}{d\Omega} = \frac{e^2 \omega_0^2}{4\pi c} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{v^2}{(1 - \beta_{\parallel} \cos \theta)^3} \left[\left(\frac{\cos \theta - \beta_{\parallel}}{\sin \theta} \right)^2 J_v^2(\xi) + \beta_{\perp}^2 J_v'^2(\xi) \right], \quad (3)$$

где $J_v(\xi)$, $J_v'(\xi)$ функция Бесселя порядка v и ее производная,

$$\xi = \frac{v \beta_{\perp} \sin \theta}{1 - \beta_{\parallel} \cos \theta}.$$

Электрон при этом излучает преимущественно вперед вдоль направления скорости. Угловые характеристики синхротронного излучения для двух энергий с разнымиpitch-углами показаны на рис. 1. Электрон с $\beta_{\parallel} = 0$ излучает в основном в плоскости вращения, электрон с $\beta \neq 0$ – в конусе $\cos \theta = \beta_{\parallel}$ с разными pitch-углами (интенсивность для электрона 2 МэВ увеличена в 10 раз).

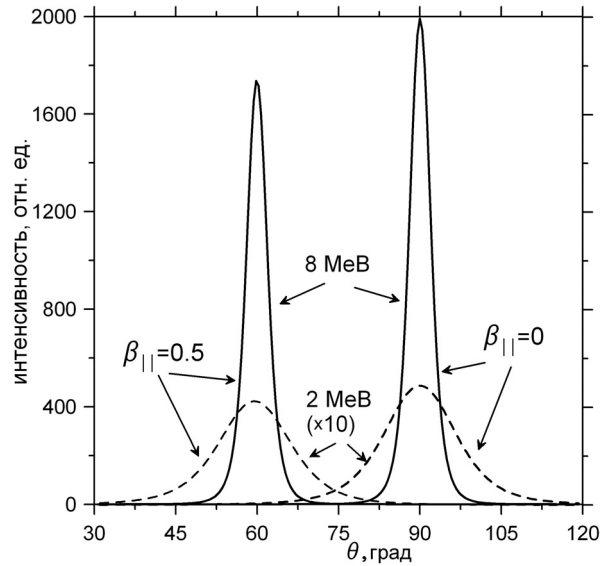


Рис. 1. Угловая зависимость интенсивности СИ для электронов 2 и 8 МэВ

Синхротронное излучение быстрых электронов в геомагнитном поле

Поскольку захваченный электрон движется в изменяющемся геомагнитном поле ($B = B_0 \frac{\sqrt{1 + \sin^2 \lambda}}{R^3}$ для земного диполя, λ – геомагнитная широта), частота излучения также меняется, в частности, циклотронная частота на оболочке $L = 3$ изменяется от 0,03 на вершине силовой линии до 1,4 МГц в ионосфере. На рис. 2 показаны зависимости спектральной плотности излучения для захваченных электронов с полной энергией 8 Мэв в среднеширотной ионосфере ($L = 3$) в области отражения этих электронов и в экваториальной области на оболочках $L = 2, 3, 4$. Вследствие релятивистского расширения частотного спектра, электрон излучает в диапазоне от долей кГц до нескольких ГГц. При этом интенсивность излучения в ионосфере на порядки величины больше, чем в плазмосфере на той же L -оболочке, вследствие малой величины магнитной индукции. В низкочастотной части спектра, релятивистский электрон излучает на частоте меньшей циклотронной частоты электронов окружающей плазмы, то есть в диапазоне вистлеров. Высокочастотная часть спектра может находиться далеко за пределами плазменной частоты.

Вследствие угловой направленности излучения СИ попадает на Землю из оболочки только в некотором диапазоне питч-углов, как правило, не из экваториальной части, где конус излучения проходит мимо Земли. Это наиболее выражено для высокочастотной части спектра, где излучение остро направлено. Причем, для СИ из экваториальной части оболочек с $L = 3$ и более высокочастотным (и, следовательно, узконаправленным) является излучение на частотах в десятки МГц, тогда как для излучения из ионосферы эти частоты соответствуют середине спектра и не являются узконаправленным. Излучение вблизи точки отражения в ионосфере происходит преимущественно в плоскости вращения электрона и достигает поверхности Земли только в сторону наклона магнитной силовой трубки, то есть к экватору от

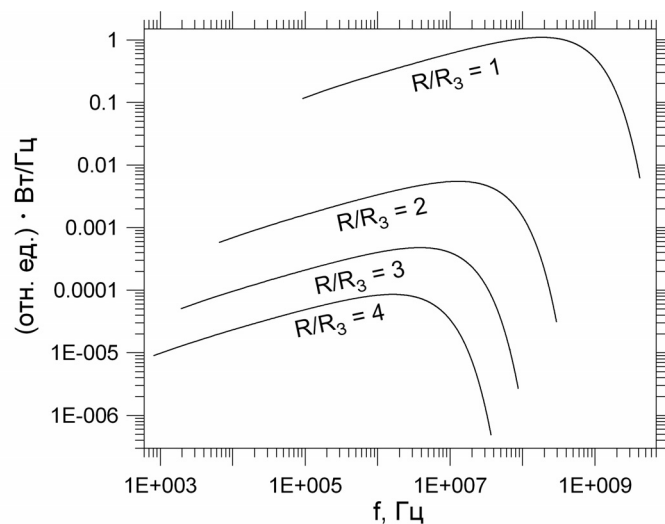


Рис. 2. Относительная интенсивность СИ для захваченных электронов в разных частях баунс-траектории: в ионосфере ($R/R_3 = 1$) и на вершине силовой линии для $L = 2, 3, 4$

ее основания. Конус излучения в ионосфере в большей степени направлен к Земле только в том случае, если частица является высыпающей. После отражения релятивистского электрона от ионосферы высокочастотная часть СИ не достигает поверхности Земли. В низкочастотной части спектра, на частотах меньших циклотронной частоты электрона, $\omega < \omega_c$ в точке излучения, излучение распространяется в виде вистлера.

Итак, в высокочастотной области наиболее интенсивное СИ имеет место в ионосфере для захваченных и высыпающих электронов, или для электронов, источник которых расположен в ионосфере. В плазмосфере, в частности в экваториальной части, в связи с уменьшением магнитного поля, интенсивность излучения падает, а его спектр смещается в низкочастотную область. Учитывая то, что скорость электронов близка к скорости света, сколько-нибудь постоянное излучение (в частности, в определенной точке на земной поверхности) возможно только, если электроны захвачены в геомагнитном поле или локальной удерживающей магнитной конфигурацией, в частности, в ионосфере, либо, если существует (квази-) стационарный источник быстрых электронов.

На рис. 3 показана спектральная плотность электрического поля шума, создаваемого подобным сосредоточенным источником в ионосфере: популяцией электронов с энергией от 0,5 до 8 Мэв, соответствующей спектру β -электронов деления U-235 [Tsoulfanidis, 1971]. В расчетах, в отличие от большинства предыдущих работ, не делается упрощающих предположений об ультрарелятивистском пределе и относительно спектра излучения индивидуального электрона. Считается, что электроны излучают некогерентно. Предполагается, что все электроны движутся в поле с индукцией $0,5 \cdot 10^{-4}$ Т с равномерным питч-угловым распределением. Электрическое поле рассчитывается на расстоянии 600 км к югу от источника, находящегося на высоте 200 км, при этом наклон силовой линии равен 70° .

Излучение перекрывает диапазон более чем в 4 порядка величины от $\sim 10^5$ до $\sim 5 \cdot 10^9$ Гц с максимумом на частоте $\sim 10^8$ Гц. Для источника релятивистских электро-

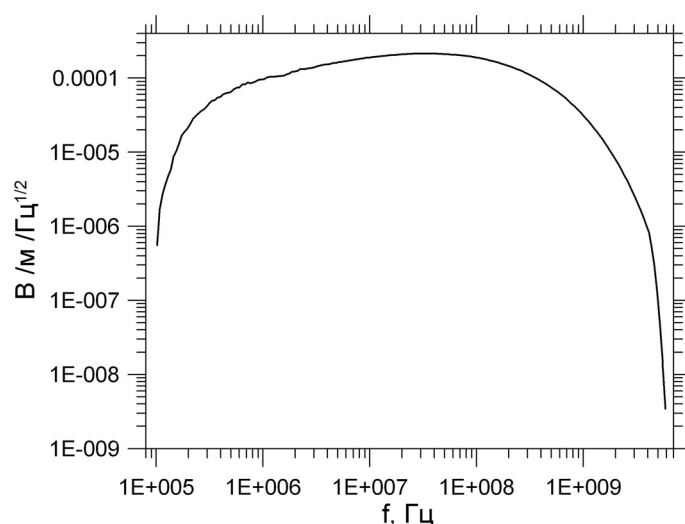


Рис. 3. Спектральная плотность электрического поля шума, создаваемого синхротронным излучением электронов в ионосфере

нов в F-области ионосферы типа эксперимента «Морская звезда» с полным их числом порядка 10^{26} и энергетическим спектром, соответствующим спектру β -распада продуктов деления, в указанной выше области на поверхности Земли рассчитана спектральная плотность электрического поля синхротронного излучения быстрых электронов. Она составляет порядка $10^{-4} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ в максимуме спектра на частоте 10^8 Гц и $10^{-6} - 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ на частотах $(1 \div 5) \cdot 10^9 \text{ Гц}$.

Представленная зависимость не учитывает условий, которые накладывает ионосфера на распространение низкочастотной части спектра, а также поглощение при распространении излучения. В [Ланцбург, Никольская, 1999] показано, что в невозмущенных условиях ослабление СИ при прохождении ионосферы на частотах выше критической частоты F-слоя невелико. В низкочастотной области спектра, ниже циклотронной частоты электрона, излучение может распространяться в виде вистлеров. При этом наиболее благоприятные условия создаются для квазипродольного распространения, то есть для излучения электронов с небольшими питч-углами. Кроме этого, гармоники СИ соответствующие низкочастотной области спектра, то есть, с меньшими номерами, имеют более широкое угловое распределение, поэтому условия распространения в виде вистлера выполняются для излучения электронов в более широком диапазоне питч-углов.

Заключение

Таким образом, синхротронное излучение релятивистских электронов в геомагнитном поле представляет собой чрезвычайно широкополосный радиочастотный шум. Показано, что для источника релятивистских электронов в ионосфере типа эксперимента «Морская звезда», на поверхности Земли спектральная плотность электрического поля шума максимальна на частоте порядка 10^8 Гц и может являться серьезной помехой для систем связи и навигации на частотах $(1 \div 5) \cdot 10^9 \text{ Гц}$.

Литература

- Арцимович Л.А., Померанчук И.Я. Излучение быстрых электронов в магнитном поле // ЖЭТФ. 1946. Т. 16, с. 379.
- Дудник А.В., Минеев Ю.В. Динамика энергичных электронов и их взаимосвязь с высокочастотным радиоизлучением земной магнитосферы // Геомагнетизм и аэрономия, 1996. Т. 36, № 1, с. 93–102.
- Иваненко Д., Соколов А. Классическая теория поля. М.-Л.: ГИТТЛ, 1951, 480 с.
- Карташев В.М., Лазарев А.В., Сорока Д.В., Шматко Е.С. Всплески синхротронного радиоизлучения электронов, высыпавшихся из внутреннего радиационного пояса Земли // Радиофизика и радиоастрономия. 1997. Т. 2, № 2, с. 165–175.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1967, 460 с.
- Ланцбург Е.Я. Синхротронное излучение, сопровождающее высотные ядерные взрывы, как источник интенсивных долгоживущих шумов // Динамические процессы в геосферах под действием внешних и внутренних потоков энергии и вещества: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: 1998, с. 247–254.
- Ланцбург Е.Я., Никольская Л.С. К оценкам радишума, генерированного синхротронным излучением быстрых электронов деления при высотном ядерном взрыве // Физические процессы в геосферах: их проявления и взаимодействие: Сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: 1999, с. 268–273.

Мусатенко С.И., Агапитов А.В., Курочка Е.В. и др. Синхротронное излучение слабоборелятивистских пучков электронов на ионосферных высотах средних широт // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 5, с. 704–713.

Тернов И.М. Синхротронное излучение // УФН. 1995. Т.165, № 4, с. 429–456.

Dyce R.B., Nakada M.P. On the possibility of detecting synchrotron radiation from electrons in the Van Allen belts // J.Geophys. Res. 1959. v.64, p. 1163–1168.

Dyce R.B., Horowitz S. Measurements of synchrotron radiation at Central Pacific sites // J.Geophys. Res. 1963. v. 64, p. 713–721.

Frankel M.S. LF radio noise from the Earth's magnetosphere // Radio Science, 1973. V. 8, p. 991–1005.

Ochs G.R. Synchrotron radiation measurements near the magnetic equator // in: Radiation trapped in the Earth's magnetic field / ed. B.M.McCormac, D.Riedel, Dordrecht, Holland, 1966, p. 704–713.

Peterson A.M., Hower G.L. Synchrotron radiation from high energy electrons // J.Geophys. Res. 1963. v. 68, p. 723–734.

Peterson A.M., Hower G.L. Teoretical model of synchrotron radiation and comparison with observation // in: Radiation trapped in the Earth's magnetic field / ed. B.M.McCormac, D.Riedel, Dordrecht, Holland, 1966, p. 715–754.

Tsoufanidis N., Wehring B.W., Wyman M.E. Measurements of time-dependent energy spectra of beta rays from Uranium-235 fission fragments // Nucl. Sci. Eng. 1971. v. 43, p. 42–53.

Vesecky J.F. Radio frequency synchrotron radiation from inner belt trapped electrons // J.Geophys. Res. 1969. v. 74, p. 3628–3638.