Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 388–391.

УДК 551.510+533.9
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-388
ORCID: 0009-0001-9697-6934

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДРЕЙФА ЧАСТОТЫ ХОРОВЫХ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.С. Чекушева, Д.Л. Пасманик, А.Г. Демехов

Институт прикладной физики имени А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия, s.chekusheva@ipfran.ru

SPATIAL DEPENDENCE OF FREQUENCY DRIFT RATE OF VLF CHORUS EMISSION IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE, BASED ON NUMERICAL SIMULATION

S.S. Chekusheva, D.L. Pasmanik, A.G. Demekhov

A. V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics RAS,
Nizhny Novgorod, Russia, s.chekusheva@ipfran.ru

Аннотация. Исследуется возможная зависимость скорости дрейфа частоты хоровых ОНЧ-излучений в магнитосфере Земли от положения наблюдателя. Мы используем численную модель, основанную на PIC-коде EPOCH, которая предполагает ступенчатую деформацию начальной функции распределения энергичных электронов по продольным скоростям. Расчет скорости дрейфа частоты производится двумя методами: разбиение элемента на линейные сегменты и преобразование Радона. Оба метода использованы с целью сравнения точности и затрачиваемых на обработку вычислительных мощностей. Мы получили, что в большинстве расчетов наблюдается немонотонная зависимость скорости дрейфа частоты от координаты.

Ключевые слова: магнитосфера Земли, ОНЧ-волны, хоровые излучения.

Abstract. We study a possible dependence of frequency drift rate of VLF chorus emissions in the Earth's magnetosphere on the observer's position. We use the numerical simulation model based on EPOCH PIC code that assumes a step-deformation feature on the distribution function of energetic electrons along parallel velocities. Frequency drift is calculated by two methods: splitting the chorus element on linear segments and the Radon transform. Both methods are used to estimate the accuracy and the computing resources required for processing. We obtain the nonmonotonic behavior of frequency drift in most simulations.

Keywords: Earth's magnetosphere, VLF waves, chorus emission.

ВВЕДЕНИЕ

Хоровые излучения, генерируемые в диапазоне очень низких частот (ОНЧ, $f \sim 1$–30 кГц), представляют собой одно из наиболее интересных явлений во внешнем радиационном поясе Земли. Они имеют вид последовательных дискретных элементов с быстро меняющейся частотой $|df/dt| \sim 1.5 \cdot 10^4$ Гц/с [Burtis, Helliwell, 1976; Сажин, Титова, 1977]. Хоровые излучения играют важную роль в динамике электронов внешнего радиационного пояса. В результате взаимодействия с ними электроны могут высыпаться в ионосферу [Millan, Thorne, 2007; Miyoshi et al., 2020; Artemyev et al., 2024] или ускоряться до релятивистских скоростей [Horne et al., 2005; Демехов и др., 2006; Thorne et al., 2013].

Хоровые излучения генерируются в нижнем ($0.1f_{ce} < f < 0.5f_{ce}$) и верхнем ($0.5f_{ce} < f < f_{ce}$) диапазонах частот, где f_{ce} — гирочастота электронов. Наиболее интенсивными являются излучения, генерируемые в нижнем диапазоне частот [Meredith et al., 2012].

Причина большой скорости дрейфа частоты хоровых излучений обсуждалась в различных теоретических моделях [Trakhtengerts, 1995; Omura et al., 2008; Tao et al., 2021]. В работе [Tao et al., 2021] был поднят вопрос о связи дрейфа частоты на удалении от геомагнитного экватора с пространственным градиентом гирочастоты электронов. Однако проблема пространственных свойств скорости дрейфа частоты до сих пор остается открытой.

В данной работе мы моделировали хоровые элементы при помощи PIC-кода EPOCH [Pasmanik, Demekhov, 2023]. Начальная функция распределения энергичных электронов задана как гладкая функция со ступенчатой деформацией по продольной скорости, которая может возникать при взаимодействии с шумовыми излучениями, имеющими резкую верхнюю границу частотного спектра [Trakhtengerts et al., 1996].

Целью нашей работы является использование данной численной модели для исследования зависимости скорости дрейфа частоты от положения наблюдателя.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ

Численная 1D-модель основана на PIC-коде EPOCH с рядом модификаций. Улучшен метод дельта-F и добавлена зеркальная сила, действующая на заряженные частицы в неоднородном магнитном поле.

Для геомагнитного поля вблизи экватора используется параболическое приближение $B_x(x) = B_L(1+(x/a_{\text{inh}})^2)$, где B_L — экваториальное магнитное поле, a_{inh} — коэффициент неоднородности, который в 10 раз меньше реальной неоднородности геомагнитного поля: $a_{\text{inh}} = a_E/10$, здесь $a_E = \sqrt{2}R_E L/3$, L — оболочка, R_E — радиус Земли. Такое масштабирование области генерации уменьшает требования к вычислительным ресурсам и является довольно распространенным способом уменьшения времени вычислений (см. [Pasmanik, Demekhov, 2023] и ссылки там).

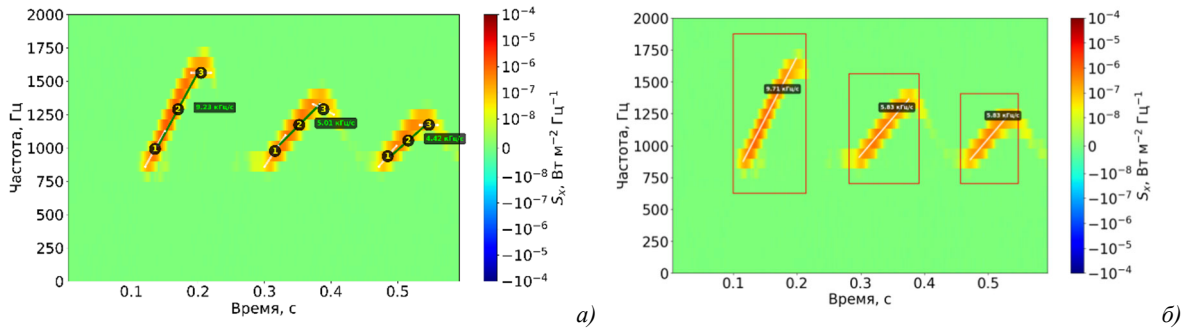

Рис. 1. Спектрограмма вектора Пойнтинга при x = 504.8 км и иллюстрация методов обработки: *а* — метод сегментов; белыми линиями отмечены начальные и конечные сегменты (цифры 1 и 3), точки (t_1, f_1) и (t_2, f_2) — начало и конец центрального сегмента (зеленая линия, цифра 2); *б* — преобразование Радона; белыми линиями отмечены скорости дрейфа частоты, красные рамки соответствуют областям, в которых применен метод

Известно, что концентрация N_h и высота «ступеньки» на функции распределения энергичных электронов Δ_n определяют параметр связи $q \sim N_h \Delta_h$. Генерация ОНЧ-волн в системе волна–частица конечной длины без отражения волн возможна, когда параметр связи превышает порог абсолютной неустойчивости q_{thr} $(\tilde{q} = q/q_{thr})$ [Demekhov et al., 2003; Demekhov, Trakhtengerts, 2008; Bespalov, Demekhov, 2009]. Моделирование производилось при различных значениях $\tilde{q}$, N_h и Δ_n.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для определения скорости дрейфа частоты анализировались спектрограммы вектора Пойнтинга, которые обрабатывались двумя методами. Первый метод заключался в поиске хорового элемента по пороговому значению с последующим разделением элемента на три сегмента (рис. 1, *а*), соответствующие начальному 0–30 %, центральному 20–80 % и конечному 70–100 % интервалам.

В данной работе рассматривалась скорость дрейфа частоты, соответствующая центральной части элемента. Далее при фиксированной координате для каждого элемента вычислялась скорость дрейфа частоты:

$$\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{f_1 - f_2}{t_1 - t_2}, \qquad (1)$$

где индексы 1 и 2 обозначают начало и конец центрального сегмента соответственно.

Второй метод — преобразование Радона, которое представляет собой интегральное преобразование функций для идентификации линейных элементов на двумерных изображениях:

$$R(\theta, p) = \iint |S_x(t,f)| \delta\,(p - t\cos\theta - f\sin\theta) dt df. \qquad (2)$$

Здесь переменные θ — угол между нормалью и прямой, а p — смещение прямой относительно начала координат, в которых происходит поиск этой наклонной прямой, с максимальной амплитудой в параметрический форме $t\cos\theta + f\sin\theta = p$. Границы окна для преобразования Радона брались аналогично работе [Wu et al., 2025].

После перехода от бинарного изображения к реальным величинам получаем скорости дрейфа частоты для каждого элемента (рис. 1, *б*). Однако данный метод хорошо применим только для линейных участков хоровых элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Нами было обработано несколько вариантов моделирования, отличающихся друг от друга различными значениями превышения порога генерации $\tilde{q}$. По мере увеличения $\tilde{q}$ стационарная модуляция амплитуды переходит в квазипериодическую, а затем в стохастическую, что при моделировании явно отражается на форме хорового элемента: чем больше превышение порога, тем более сложная форма.

На рис. 2, *б* изображен случай небольшого $\tilde{q}$. Здесь наблюдаются довольно «ровные» хоровые элементы с линейной скоростью дрейфа частоты практически во всем элементе. На рис. 2, *а* показано, что по мере распространения элемента дрейф частоты изменяется довольно слабо.

На рис. 2, *г* показан случай более сильного превышения порога, в котором наблюдается более явная зависимость дрейфа частоты от координаты (рис. 2, *в*). При $x \approx 350$ км скорость несколько спадает с последующим выходом на постоянное значение.

На рис. 2, *е* показан случай, когда порог превышен довольно значительно. Элементы имеют более сложную форму по сравнению с предыдущими случаями. Зависимость на рис. 2, *д* имеет немонотонный характер: спад в диапазоне $x \in (100; 200)$ км постепенно сменяется ростом на интервале $x \in (300; 500)$ км и далее опять следует спад.

Пространственные распределения максимальной амплитуды на рис. 3, *а*, *б*, *в* соответствуют трем случаям, представленным на рис. 2, *б*, *г*, *е* соответственно. Амплитуда увеличивается по мере распространения волны, однако во всех случаях при $x \approx 350$–450 км рост останавливается, что может быть связано с изменением эффективности взаимодействия волны и частицы по мере удаления волны от экватора.

Примерно на этом же расстоянии дрейф частоты элементов при большом превышении порога генерации (рис. 2, *г*, *е*) постепенно изменяется, приближаясь к постоянному значению по мере дальнейшего распространения.

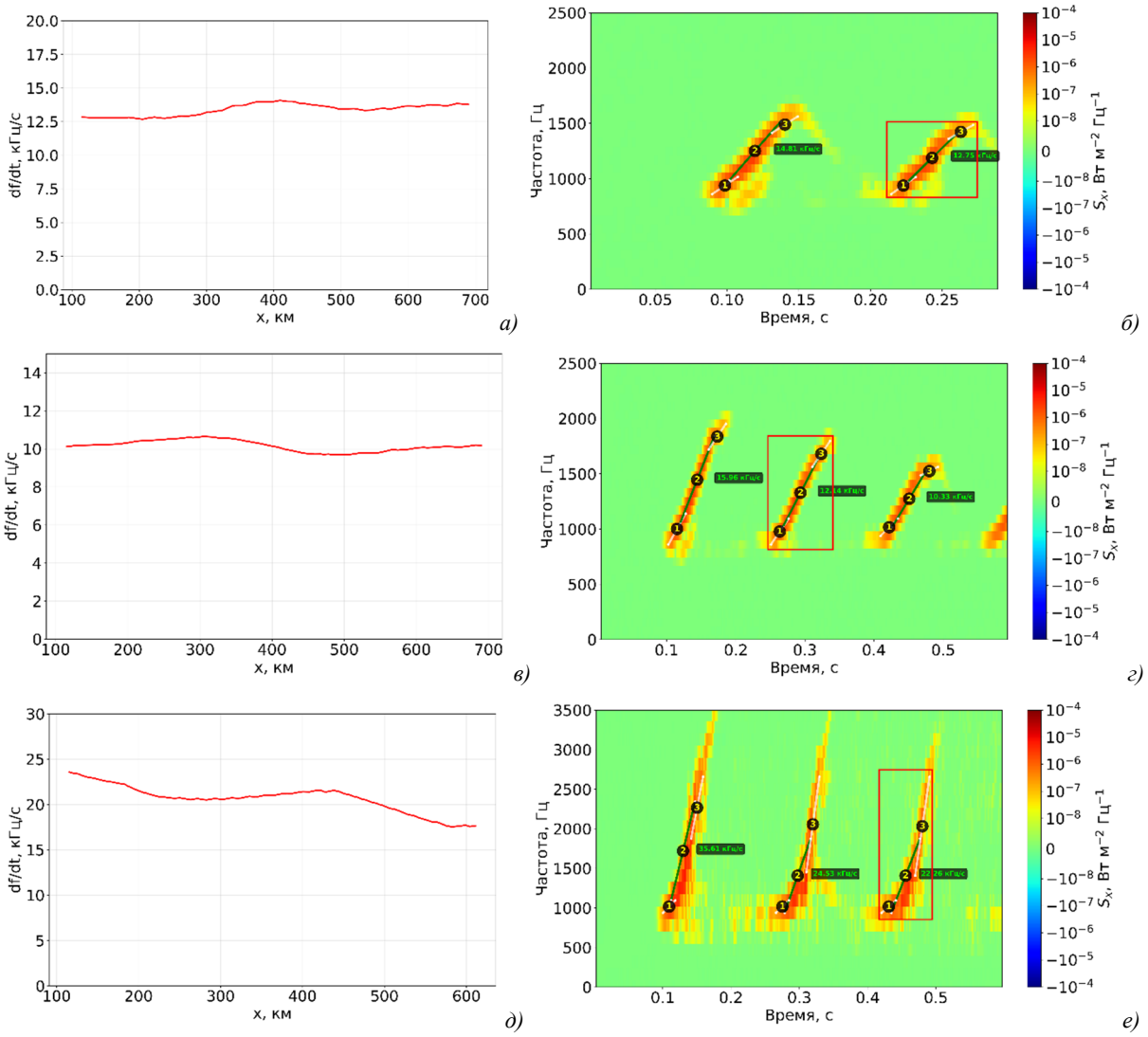

Рис. 2. Примеры зависимости скорости дрейфа частоты от положения наблюдателя и ее связь с формой элементов: *а*, *в*, *д* — пространственная зависимость скорости дрейфа частоты; *б*, *г*, *е* — соответствующие хоровые элементы (отмечены красной рамкой)

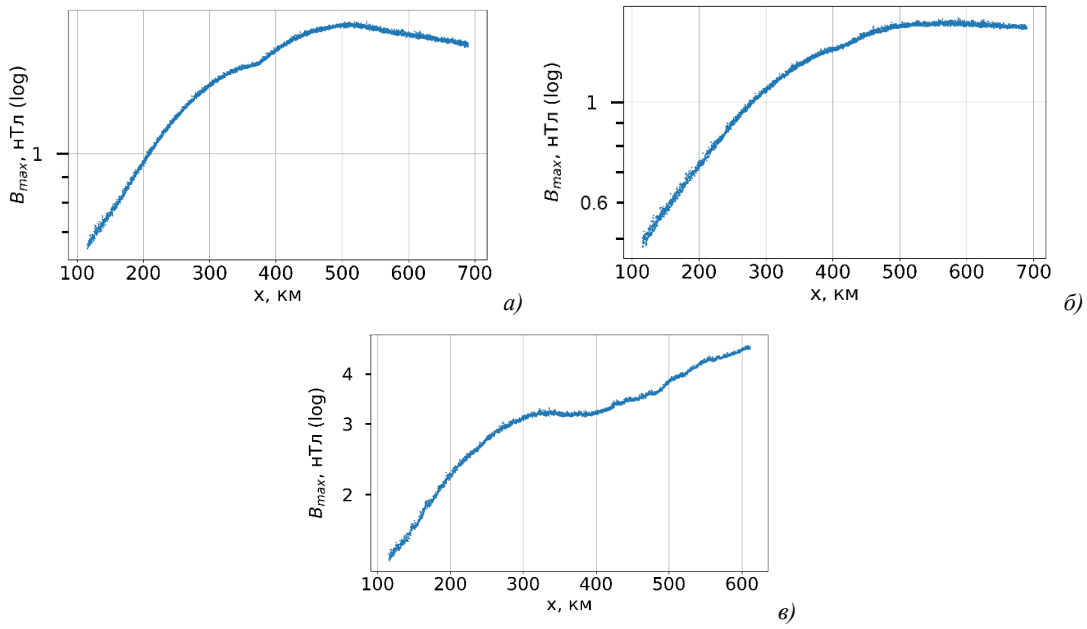

Рис. 3. Пространственное распределение максимальной амплитуды: *а* — для элемента на рис. 2, *б*; *б* — для элемента на рис. 2, *г*; *в* — для элемента на рис. 2, *е*

В первых двух случаях рост амплитуды постепенно замедляется и идет на спад, однако в третьем случае после небольшого спада на $x \approx 350$–450 км амплитуда далее продолжает линейно расти, что может быть связано с малыми (недостаточными) размерами области, использованной при моделировании. Данный случай требует дополнительных исследований.

Таким образом, по результатам обработки данных численного моделирования хоровых излучений с помощью PIC-кода EPOCH мы получили, что для скорости дрейфа частоты хоровых элементов, имеющих сложную форму, характерно нетривиальное поведение по мере их распространения вдоль магнитного поля, в то время как при довольно небольшом превышении порога генерации линейные («ровные») элементы практически не показывают никакого изменения скорости дрейфа частоты.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ (№ 24-12-00457)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Демехов А.Г., Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 6. С. 751–757.

Сажин С.С., Титова Е. Е. // Космические исследования, 1977. Т. 5, № 5. С. 791–785.

Arber T. D., Bennett K., Brady C.S., et al. // Plasma Phys. Controlled Fusion. 2015. V. 57, No. 113001.

Artemyev A.V., Zhang X.J., Demekhov A.G., et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2024. V. 129, N 2, e2023JA032287.

Bespalov A.A., Demekhov A.G. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2009. V. 52. N 11. P. 761–773.

Burtis W.J., Helliwell R.A. // Planetary and Space Science, 1976. V. 24, N 11. P. 1 007–1 010.

Demekhov A.G., Nunn D., Trakhtengerts V.Y. // Physics of Plasmas. 2003. V. 10, N 11. P. 4472–4477.

Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Yu. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2008. V. 51, N 11. P. 880–889.

Horne R.B., Thorne R.M., Glauert S.A., et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2005. V. 110, N A3, A03225.

Meredith N.P., Horne R.B., Sicard-Piet A., et al. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2012. V. 117, N A10, A10225.

Millan R.M., Thorne R.M. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69, No. 3. P. 362–377.

Miyoshi Y., Saito S., Kurita S., et al. // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47, N 21, e2020GL090360

Omura Y., Katoh Y., Summers D. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113, N A4, A04223.

Pasmanik D. L., Demekhov A.G. // Physics of Plasmas. 2023. V. 30, N 11, 112106

Tao X., Zonca F., Chen L. // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2021. V. 126, N 9, e2021JA029585.

Thorne R. M., Li W., Ni B., et al. // Nature. 2013. V. 504. P. 411–414.

Trakhtengerts V.Y. // J. Geophys. Res. Space Phys. 1995. V. 100, N A9. P. 17 205–17 210.

Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J., Demekhov A.G. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, N A6. P. 13 293–13 301.

Wu Z., Teng S., Wu Y. // Geophys. Res. Lett. 2025. V. 52, N 12, e2025GL115777.