

УДК 53.05

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА В МАГНИТОСФЕРЕ И ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

© 2022 г. А. С. Никитенко^{1*}, Ю. В. Федоренко¹, О. М. Лебедь¹, А. В. Ларченко¹¹Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

В работе представлены результаты численного моделирования генерации и распространения аврорального хисса в магнитосфере и ионосфере Земли, способные объяснить его одновременные наблюдения в авроральной и приполярной зонах. Модель источника учитывает распределение по высоте и широте актов генерации квазиэлектростатических волн, представляющих авроральный хисс, а также распределение азимутальных углов поперечных компонент их волнового вектора в диапазоне 0–360 градусов. Показано, что авроральный хисс, распространяясь к земной поверхности, формирует совокупность квазиэлектростатических волн, которая в меридиональной плоскости представляет собой два пучка. Один из этих пучков распространяется на более низких геомагнитных широтах относительно силовой линии, на которой происходила генерация, другой – на более высоких. Данный эффект способен обусловить одновременную регистрацию аврорального хисса в авроральных и приполярных широтах.

Ключевые слова: авроральный хисс, распространение радиоволн, ионосфера.

Для цитирования: Никитенко А.С., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М., Ларченко А.В. Исследование условий распространения аврорального хисса в магнитосфере и ионосфере Земли // Динамические процессы в геосферах, 2022, т. 14, № 2. С. 86–91. http://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_86

Введение

У земной поверхности регистрируются различные типы естественных электромагнитных излучений в широком диапазоне частот. Одним из таких излучений является авроральный хисс. Его спектр занимает диапазон выше 2–4 кГц с максимумом интенсивности на частотах 8–10 кГц [Jørgensen, 1968].

Считается, что генерация хисса происходит в результате развития черенковской неустойчивости электронов с энергиями 0.1–10 кЭв на резонансе Ландау, когда совпадают проекции фазовой скорости волны и скорости электрона на силовую линию геомагнитного поля [Jørgensen, 1968; Lim and Laaspere, 1972]. При этом отмечается корреляция аврорального хисса с потоками электронов с энергиями около 1 кэВ [Hoffman and Laaspere, 1972; Beghin et al., 1989].

В диапазоне ниже нескольких десятков кГц волновые нормали генерируемых волн ориентированы под малыми углами к резонансному конусу, на котором показатель преломления стремится к бесконечности [Stix, 1992]. Электрическое поле таких волн доминирует над магнитным, в связи с чем их принято называть квазиэлектростатическими [Bell and Ngo, 1988].

Квазиэлектростатические волны не способны выйти к земной поверхности из-за отражения на высоте, где частота волны становится равной локальной частоте нижнегибридного резонанса (НГР отражение) [Sonwalkar and Narikumar, 2000], либо в Е-слое ионосферы, где происходит их полное внутреннее отражение из-за резкого уменьшения показателя преломления.

Считается, что проникновение квазиэлектростатических волн к земной поверхности происходит в результате их рассеяния на мелкомасштабных (<100 м) неоднородностях электронной концентрации в ионосфере [Sonwalkar and Narikumar, 2000]. Рассеянные волны имеют широкий пространственный спектр. Часть волновых нормалей из этого спектра попадает в определяемый из закона Снеллиуса конус выхода [Stix, 1992] и, таким образом, может достичь земной поверхности.

Недавние наземные наблюдения аврорального хисса указывают на локальность области, засвеченной всплесками аврорального хисса у земной поверхности [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2022]. Обнаружены случаи, когда авроральный хисс регистрируется одновременно в авроральных и приполярных широтах [Никитенко и др., 2021]. В авроральной зоне всплески были зарегистрированы на станциях Ловозеро (испр. геом. к-ты: $\Phi = 64.7^\circ$, $\Lambda = 113.1^\circ$) и Каннусехто ($\Phi = 64.6^\circ$, $\Lambda = 105.6^\circ$). Регистрация в приполярной зоне происходила примерно на 1000 км к полюсу от этих точек на станции Баренцбург (Архипелаг Шпицберген). В ходе анализа всплесков было выявлено, что рассеяние квазиэлектростатических волн в конус выхода происходит на разных областях с мелкомасштабными неоднородностями, центры которых находятся на геомагнитных широтах $\Phi \sim 63^\circ$ и $\Phi \sim 72^\circ$ и близких геомагнитных меридианах $\Lambda \sim 94^\circ\text{--}95^\circ$.

В данной работе с применением методов численного моделирования исследуются особенности распространения аврорального хисса, способные вызвать одновременные наблюдения хисса в авроральных и приполярных широтах.

Моделирование генерации и распространения аврорального хисса в ионосфере и магнитосфере

Мы моделировали процессы генерации и распространения аврорального хисса в магнитосфере и ионосфере Земли в приближении дипольной модели геомагнитного поля. Генерация квазиэлектростатических волн в нашей модели происходит за счет черенковского резонанса, условие возникновения которого записывается как $k_{\parallel} = k_0 \frac{V_{\parallel}}{c}$ [Jørgensen, 1968], $k_0 = \frac{\omega}{c}$; $\omega = 2\pi f$, где f – частота волны, $V_{\parallel}$ – параллельная геомагнитному полю компонента скорости электронов, $k_{\parallel}$ – проекция волнового вектора генерируемой квазиэлектростатической волны на направление силовой линии магнитного поля. Из этого условия рассчитываются компоненты $k_{\parallel}$. Поперечные компоненты волнового вектора $k_{\perp}$ определяются из дисперсионного соотношения для холодной замагниченной плазмы, состоящей из электронов, ионов водорода, гелия и кислорода без учета столкновений [Stix, 1992]. Вследствие цилиндрической симметрии задачи направления вектора k считались равномерно распределенными в интервале от 0 до 360 градусов.

Компонента скорости электронов $V_{\parallel}$ задана максвелловским распределением по энергиям $p(E) \propto E \exp(-E/E_0)$. Использованы значения E_0 1 и 5 кэВ. Мы рассматривали частоты 4 и 8 кГц, которые лежат в окрестности нижней границы частотного диапазона аврорального хисса и в окрестности его максимума интенсивности соответственно.

Свойства электромагнитного поля хисса близки к свойствам многомерного гауссового случайного поля [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021], поэтому мы считали, что они могут быть обусловлены суперпозицией большого количества актов генерации квазиэлектростатических волн. При этом поле хисса рассматривалось как сумма полей квазиэлектростатических волн со случайными амплитудами, фазами и волновыми векторами.

Предполагая, что генерация аврорального хисса происходит в потоке высыпающихся электронов, мы считали акты генерации квазиэлектростатических волн случайно распределенными по широте и по высоте. Плотность пучка электронов по широте задана в виде распределения Гаусса с центром на силовой линии геомагнитного поля, пересекающей земную поверхность на геомагнитной широте 68° , и среднеквадратичным отклонением 0.25° . Акты генерации распределены равномерно на высотах 3000–20000 км.

Мы рассчитывали распространение квазиэлектростатических волн от области генерации до высоты нижнегибридного отражения в приближении геометрической оптики с помощью двумерной модели, описывающей изменения координат луча и угла между волновым вектором и нормалью к земной поверхности по времени с помощью решения замкнутой системы трех дифференциальных уравнений [Walter, 1969].

Ионосферная плазма описывается профилями концентрации электронов и ионов, полученными с помощью модели IRI-2016 [https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php]. Концентрации на высотах до 20 тыс км получены, экстраполируя экспонентой профили электронной и ионных концентраций с высоты 3000 км так, чтобы $N_e = 10^6 \text{ м}^{-3}$ на высоте 22000 км.

Обсуждение результатов моделирования

На рис. 1 представлены рассчитанные в меридиональной плоскости эмпирические плотности распределения геомагнитных широт лучей на высоте НГР отражения, которая для данной ионосферы на частотах 4 и 8 кГц составляет ~1300 и ~800 км соответственно. Стоит отметить, что только 60 (на 4 кГц) и 80 (на 8 кГц) процентов запущенных лучей достигают этих высот. Для остальной части лучей условие черенковского резонанса выполняется для волновых нормалей вне резонансного конуса.

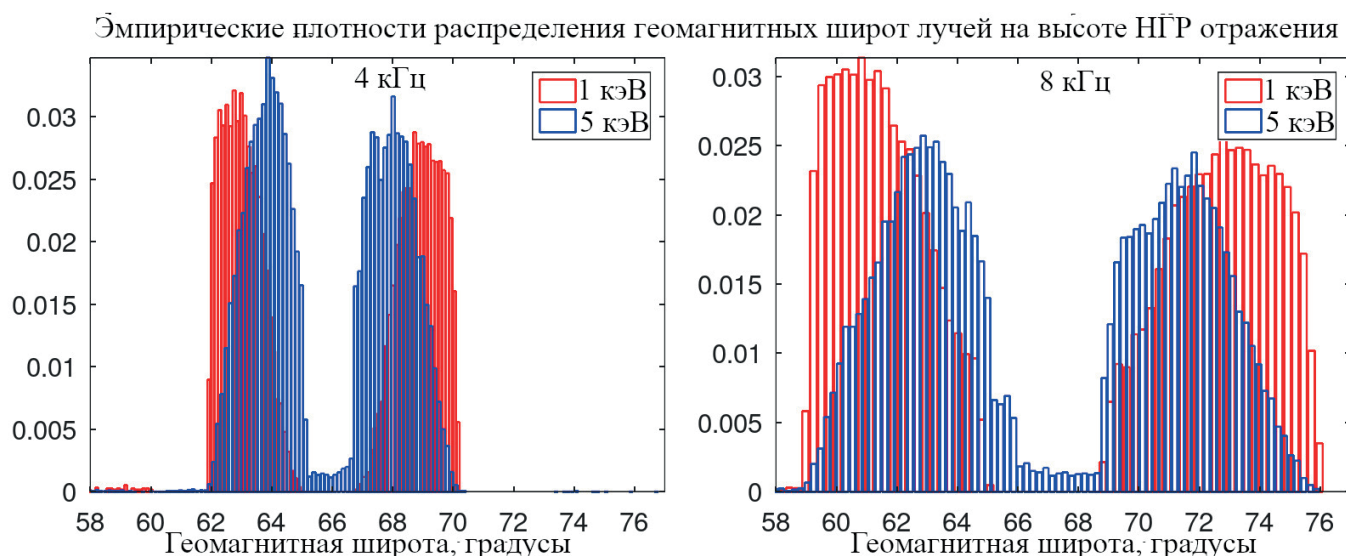


Рис. 1. Эмпирические плотности распределения геомагнитных широт лучей на высоте НГР отражения на частотах 4 кГц (слева) и 8 кГц (справа) при генерации квазиэлектростатических волн электронами с $E_0 = 1$ кэВ (красные графики) и 5 кэВ (синие графики)

Как видно из рисунка, совокупность квазиэлектростатических волн распространяясь к земле, формирует в меридиональной плоскости два разнесенных по широте пучка лучей. Два пучка формируются независимо от частоты волн и энергии электронов, ответственных за генерацию. Один пучок находится к экватору от силовой линии геомагнитного поля, на которой произошла генерация аврорального хисса, другой – к полюсу. Стоит отметить, что в случае распределения энергии электронов в виде дельта функции и генерации квазиэлектростатических волн на конкретной высоте распределение широты лучей в меридиональной плоскости имеет вид двух дельта функций. Одна из них соответствует направлению компоненты волнового вектора к экватору, другая – к полюсу.

На частоте 4 кГц ширина пучков по широте и их отклонение от силовой линии геомагнитного поля, на которой происходила генерация, меньше по сравнению с частотой 8 кГц. Полученный эффект, вероятно, вызван более высокими значениями показателя преломления на частотах 4 кГц, чем на 8 кГц. Энергия электронов, ответственных за генерацию волн, слабо влияет на ширину пучков. Однако максимумы эмпирических плотностей распределения для энергии электронов 5 кэВ находятся ближе к силовой линии генерации, чем для 1 кэВ (рис. 1). По-видимому, это вызвано из-за генерации квазиэлектростатических волн под малыми углами к резонансному конусу [Sonwalkar and Harikumar, 2000], который для 5 кэВ меньше, чем для 1 кэВ.

Данный эффект позволяет объяснить одновременную регистрацию всплесков аврорального хисса в авроральной и приполярной зонах, обсуждаемую в работе [Никитенко и др., 2021]. Полученные результаты моделирования дают основание полагать, что наблюдения аврорального хисса в этих точках при расположении областей с неоднородностями, центры которых находятся на геомагнитных широтах $\Phi \sim 63^\circ$ и $\Phi \sim 72^\circ$, могло быть обусловлено существованием источника на геомагнитных широтах 67° – 69° .

Выводы

Мы провели моделирование генерации и распространения аврорального хисса в магнитосфере и ионосфере Земли на частотах 4 и 8 кГц. Модель учитывает пространственное распределение актов генерации по высоте и геомагнитной широте, а также распределение азимутальных углов поперечных компонент волнового вектора генерируемых квазиэлектростатических волн в диапазоне 0–360 градусов. Было показано, что при распространении аврорального хисса к земной поверхности, формируется совокупность квазиэлектростатических волн, которая в меридиональной плоскости представляет собой два пучка лучей, расположенных к полюсу и к экватору от силовой линии, на которой происходила генерация. Ширина пучков по широте зависит, в основном, от частоты и больше на 8 кГц, чем на 4 кГц. Лучи сильнее отклоняются от силовой линии генерации на частоте 8 кГц, чем на 4 кГц. При этом максимумы распределения широты лучей на высоте НГР отражения при генерации более энергичными электронами расположены ближе к силовой линии генерации, чем в случае генерации менее энергичными электронами.

Данный эффект позволяет объяснить результаты одновременных наземных наблюдений аврорального хисса в авроральной и приполярной зонах, обсуждаемых в работе [Никитенко и др., 2021].

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн»).

Список литературы

Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Никитенко А.С. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. т. 59. № 5, с. 618–627. <https://doi.org/10.1134/S0016794019050079>.

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2021. т. 85. № 3, с. 398–403. <https://doi.org/10.31857/s0367676521030200>.

Никитенко А.С., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Кузнецова М.В., Ларченко А.В., Бекетова Е.Б., Пильгаев С.В. Пространственная структура области засветки ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в авроральных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2022. т. 62. № 3, с. 336–344. <https://doi.org/10.31857/S0016794022030129>.

Beghin C., Rauch J.L., Bosqued J.M. Electrostatic plasma waves and HF auroral hiss generated at low altitude // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1989, v. 94, A2. p. 1359–1378. <https://doi.org/10.1029/JA094iA02p01359>.

Bell T.F., Ngo H.D. Electrostatic waves stimulated by coherent VLF signals propagating in and near the inner radiation belt // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1988, v. 93, A4, p. 2599–2618. <https://doi.org/10.1029/JA093iA04p02599>.

[https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php].

Hoffman R.A., Laaspere T. Comparison of very-low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from two Ogo 4 experiments // *Journal of Geophysical Research*. 1972, v. 77, № 4, p. 640–650. <https://doi.org/10.1029/JA077i004p00640>.

Jørgensen T.S. Interpretation of auroral hiss measured on OGO 2 and at Byrd Station in terms of incoherent Cerenkov Radiation // *Journal of Geophysical Research*. 1968, v. 73, № 3, p. 1055–1069. <https://doi.org/10.1029/JA073i003p01055>.

Lim T.L., Laaspere T. An evaluation of the intensity of cerenkov radiation from auroral electrons with energies down to 100 ev // *Journal of Geophysical Research*. 1972, v. 77, № 22, p. 4145–4157. <https://doi.org/10.1029/JA077i022p04145>.

Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2000, v. 105, A8, p. 18867–18883. <https://doi.org/10.1029/1999JA000302>.

Stix T. *Waves in Plasmas*. American Inst. of Physics, 1992. ISBN 9780883188590.

Walter F. *Nonducted VLF Propagation in the Magnetosphere*. Stanford University, 1969.

INVESTIGATION OF THE CONDITIONS FOR PROPAGATION OF AURORAL HISS IN THE EARTH'S MAGNETOSPHERE AND IONOSPHERE

A. S. Nikitenko^{*1}, Yu. V. Fedorenko¹, O. M. Lebed¹, A. V. Larchenko¹

¹Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

^{}E-mail: alex.nikitenko91@gmail.com*

This paper presents the results of modeling the generation and propagation of auroral hiss in the Earth's magnetosphere and ionosphere. We analysed propagation conditions responsible for simultaneous observations of the auroral hiss in the auroral zone and polar cap region. We showed that considering the auroral hiss as a sum of acts of quasi-electrostatic waves generation distributed by altitude, latitude and wave vector azimuthal angle, these waves form two beams in the meridional plane. One beam propagates toward the equator from the field line where generation occurred and the other toward to the pole. This effect can cause simultaneous observations of the auroral hiss at two latitudinally separated observational sites.

Keywords: auroral hiss, propagation of radiowaves, ionosphere.