

УДК 53.05

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2023 г. А. С. Никитенко^{1, *}, Ю. В. Федоренко¹, Ю. Маннинен², О. М. Лебедь¹, Е. Б. Бекетова³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
“Полярный геофизический институт”, Апатиты, Россия

²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

³Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования
“Мурманский арктический государственный университет” в г. Апатиты, Апатиты, Россия

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

Поступила в редакцию 29.08.2022 г.

После доработки 16.09.2022 г.

Принята к публикации 26.09.2022 г.

Представлены результаты моделирования распространения аврорального хисса от источника до земной поверхности и их сравнения с результатами наблюдений. Проанализированы условия распространения волн, способные объяснить локальность наблюдаемой на земле области засветки аврорального хисса. Показано, что квазиэлектростатические волны со случайными амплитудами, фазами и направлениями волновых нормалей, представляющие собой авроральный хисс, распространяясь к земле, образуют два пучка в меридиональной плоскости. Рассеяние этих волн на высотах 800–1300 км может быть причиной наблюдаемой локальности области засветки.

DOI: 10.31857/S0367676522700259, EDN: JVARNR

ВВЕДЕНИЕ

Авроральный хисс — один из типов магнито-сферных излучений, регистрируемых у земной поверхности в высоких широтах. Его спектр занимает широкий диапазон с максимальной интенсивностью на частотах 8–10 кГц [1].

Авроральный хисс возникает за счет механизма некогерентного черенковского излучения при равенстве проекций фазовой скорости волны и скорости электрона на силовую линию [1, 2]. Генерируемые волны набирают энергию в результате развития неустойчивости на резонансе Ландау [3]. В генерации участвуют электроны с энергиями 0.1–10 кэВ. При этом на спутниках наблюдается корреляция аврорального хисса с потоками электронов, имеющих энергию около 1 кэВ [4–6]. Гирочастота электронов и их плазменная частота уменьшаются с высотой, поэтому верхний предел высоты, на которой возможна генерация хисса, определяется наименьшей из этих двух частот.

Волновые нормали генерируемых волн лежат вблизи резонансного конуса, определяемого как конус углов по отношению к внешнему магнитному полю, на котором показатель преломления стремится к бесконечности [7]. В таких волнах электрическое поле доминирует над магнитным,

в связи с чем их принято называть квазиэлектростатическими [8].

Из-за больших углов падения квазиэлектростатические волны отражаются либо в верхней ионосфере, где частота волны становится равной локальной частоте нижнегибридного резонанса (НГР отражение) [9], либо в нижней ионосфере, где происходит их полное внутреннее отражение из-за резкого уменьшения показателя преломления. Земной поверхности способны достичь только волны с волновыми нормальными в пределах конуса выхода, определяемого из закона Снеллиуса [7]. Преодоление высоты НГР отражения и выход волн к земной поверхности происходит за счет рассеяния квазиэлектростатических волн на неоднородностях электронной концентрации с масштабами много меньше длины волны (<100 м) [9]. Рассеянные волны имеют широкий пространственный спектр, часть которого попадает в конус выхода и, таким образом, может достичь земной поверхности.

Последние наземные наблюдения аврорального хисса в разнесенных точках демонстрируют локальность области, засвеченной на земной поверхности (далее область засветки), по широте и долготе [10–12]. В данной работе исследуются условия выхода аврорального хисса к наземному

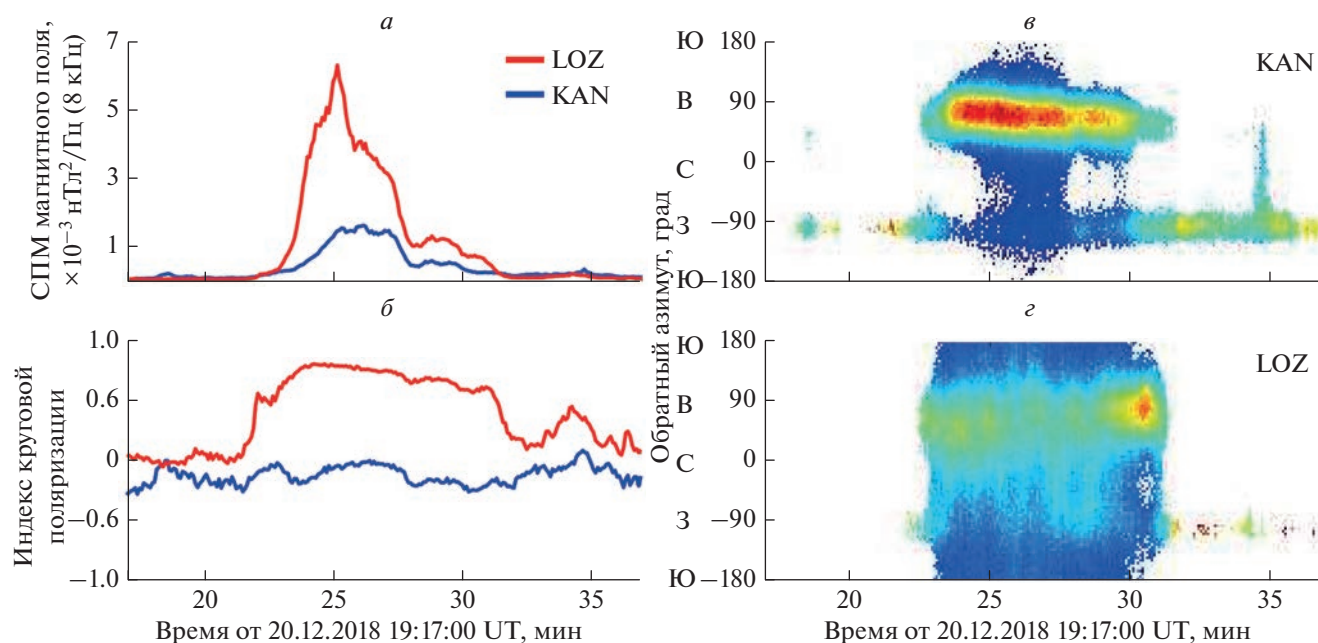


Рис. 1. Из работы [11] *a*) временные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля H_t (*a*), индекса круговой поляризации P_c (*b*) и распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга $p(\varphi)$ (*c*) на частоте 8 кГц на станциях KAN и LOZ для события 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT.

наблюдателю и особенности распространения этого излучения, способные повлечь за собой наблюдаемые локальность и малые размеры области засветки.

НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА

В данной работе мы исследовали факторы, способные обусловить обсуждаемую в работе [11] локальность области засветки аврорального хисса. Из 22 событий, зарегистрированных на станциях Ловозеро (LOZ, Россия, географические координаты: $\varphi = 67.97^\circ$ с.ш., $\lambda = 35.02^\circ$ в.д., исправленные геометрические координаты: $\Phi = 64.7^\circ$, $\Lambda = 113.1^\circ$) и Каннуслахто (KAN, $\varphi = 67.74^\circ$ N, $\lambda = 26.27^\circ$ в.д., $\Phi = 64.6^\circ$, $\Lambda = 105.6^\circ$) за два сезона наблюдений, отмечено 5 событий с размерами области засветки меньше расстояния между станциями, равного 400 км.

Рассмотрим типичный пример регистрации аврорального хисса в LOZ и KAN при локальной области засветки 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT. На рис. 1 представлены временные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля H_t , индекса круговой поляризации P_c и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода $p(\varphi)$, рассчитанные для рассматриваемого интервала времени на частоте 8 кГц (из работы [11]).

В LOZ амплитуда горизонтальной компоненты (H_t) примерно в 5 раз выше, чем в KAN. Индекс круговой поляризации P_c составляет около 0.8, означая регистрацию волн с правой, близкой к круговой, поляризацией [10, 12, 13]. Волны с такой поляризацией наблюдаются при расположении точки наблюдений в окрестности центра области засветки (другое название “область выхода”) [10, 12, 14]. Плотность потока энергии распределена практически равномерно по диапозону углов прихода 0° – 360° , что также указывает на расположение точки LOZ в окрестности центра области засветки [10, 12].

В KAN индекс круговой поляризации близок к нулю, что говорит о линейной поляризации регистрируемых волн. Распределение плотности потока энергии по углам прихода в KAN имеет выраженный максимум в направлении прихода волн с востока (со стороны LOZ), а разброс по углам составляет 60–80 градусов. Линейная поляризация волн в KAN означает расположение этой точки далеко от центра области засветки [14], что также подтверждается малым относительно LOZ разбросом по углам в распределении $p(\varphi)$. Согласно оценкам в работах [10, 12], это расстояние может достигать 400–500 км.

Наблюдаемые отличия в амплитуде магнитного поля и поляризации в LOZ и KAN объясняются локальностью области засветки [10–12, 15, 16]. Уменьшение разброса в плотности потока энер-

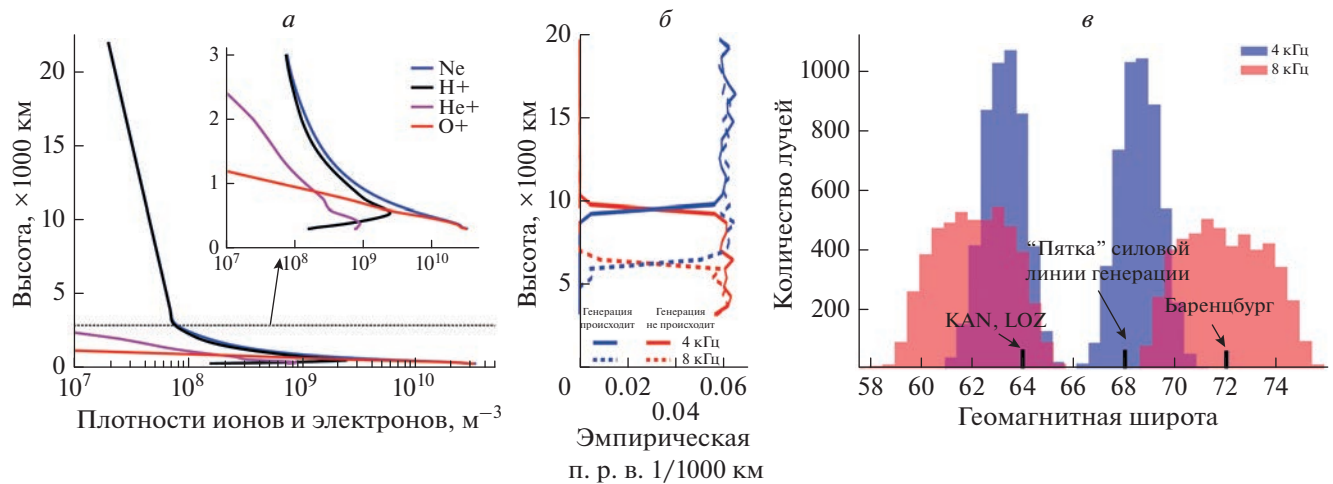


Рис. 2. Профили концентрации электронов и ионов для события 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT (а); эмпирические плотности распределения высот, на которых возможна (синие кривые) и не возможна (красные) генерация аврального хисса на частотах 4 (сплошные линии) и 8 кГц (пунктирные линии) (б); эмпирические плотности распределения широт, на которых произошло НГР отражение (в).

гии по углам прихода более чем в два раза дает основание полагать, что размеры области засветки были меньше расстояния между станциями.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВРАЛЬНОГО ХИССА ОТ ИСТОЧНИКА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В работе [9] в рамках DE (diffusive equilibrium) модели ионосферы [17] авторы моделировали рассеяние квазиэлектростатических волн на высотах порядка 3000 км. Однако, при расположении области рассеяния на этой высоте невозможно обеспечить близкую к наблюдаемой локальность области засветки на земной поверхности за счет предполагаемого уменьшения области рассеяния. В наших предыдущих работах при моделировании распространения волн, рассеянных на высотах 2000 [12] и 3000 км [10], также было показано, что в этом случае размеры области засветки превышают расстояние между станциями KAN и LOZ.

В современной модели ионосферы IRI-2016 [18] высота НГР отражения в окрестности максимума интенсивности аврального хисса (8 кГц) и в окрестности нижней границы его спектра (4 кГц) находится ниже 800 км и ниже 1200 км, соответственно. Таким образом, область рассеяния квазиэлектростатических волн может располагаться гораздо ниже 3000 км. Для выяснения связи размера области засветки с высотой области рассеяния мы провели моделирование распространения аврального хисса от области генерации до наземного наблюдателя. Мы рассматривали частоты 4 и 8 кГц и высоты области рассеяния от 800 до 2000 км с использованием профилей электронной

и ионной концентрации из модели IRI-2016 для события 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT (рис. 2а).

Электромагнитное поле аврального хисса на земной поверхности по своим свойствам весьма близко к свойствам многомерного гауссова случайного поля. Его свойства являются следствием суперпозиции множества случайных актов генерации и рассеяния квазиэлектростатических волн. Электрическое поле в области рассеяния есть сумма электрических полей квазиэлектростатических волн со случайными амплитудами, фазами и волновыми векторами. Эти волны генерируются на случайных расстояниях от области рассеяния электронами со случайными энергиями. Поток электронов имеет конечную ширину, поэтому акты генерации распределены не только по высоте, но и по широте и долготе. Эти свойства процессов генерации и распространения аврального хисса заданы в описываемой здесь модели в виде плотности распределений высоты и широты актов генерации, энергии электронов, направления перпендикулярной к силовой линии компоненты волнового вектора генерируемой волны $\vec{k}_\perp$ и амплитуд и фаз квазиэлектростатических волн. Распределение актов генерации по высоте $g(h)$ считалось равномерным в промежутке от 3000 до 20000 км, распределение плотности электронов пучка было задано в виде гауссова распределения с центром на силовой линии магнитного поля, пересекающей земную поверхность на геомагнитной широте 68 градусов, и среднеквадратичным отклонением 0.25 градуса. Скорость электронов $v_\parallel$ рассчитывалась из максвелловского распределения по энергиям $p(E) \propto E \exp(E/E_0)$, $E_0 = 5$ кэВ.

Для описания геомагнитного поля мы использовали дипольную модель. Частота столкновений электронов и ионов с нейтралами рассчитывалась согласно работам [19, 20]. Концентрации нейтралов получены с помощью модели NRLMSIS 2.0 [21]. Чтобы получить концентрации на высотах до 20000 км, мы экстраполировали экспонентой профили электронной и ионных концентраций, предоставляемые IRI-2016, от высоты 3000 км так, чтобы $N_e = 10^6 \text{ м}^{-3}$ на высоте 22000 км. Область моделирования ниже высоты рассеяния разбивалась на слои, толщина которых определялась скоростью изменения концентрации электронов.

Моделирование распространения аврорально-го хисса к земной поверхности проходило в два этапа. На первом этапе с помощью методов геометрической оптики проводился расчет распространения квазиелектростатических волн с высоты генерации (5–20 тыс. км) до высот 800–2000 км. Для этого мы использовали двумерную модель, в которой положение волнового пакета описывается с помощью замкнутой системы трех дифференциальных уравнений [22], описывающих изменения координат луча и угла между волновым вектором и нормалью к земной поверхности по времени.

На произвольной высоте из условия черенковского резонанса [1, 2] $k_{||} = k_0 \frac{v_{||}}{c}$, где $k_0 = \frac{\omega}{c}$, $\omega = 2\pi f$, $k_{||}$, $v_{||}$ – проекции волнового вектора генерируемой волны и скорости электрона на направление силовой линии магнитного поля, соответственно, мы рассчитывали продольные компоненты $k_{||}$ волновых векторов квазиелектростатических волн, а поперечные компоненты $k_{\perp}$ определялись из дисперсионного соотношения $\det(n^2 I - \vec{n} \vec{n}^T - \hat{\epsilon}) = 0$ [7, 23], где I – единичная матрица, $\vec{n}$ – вектор показателя преломления, $\hat{\epsilon}$ – тензор диэлектрической проницаемости, символ T означает транспонирование вектора $\vec{n}$. Вследствие цилиндрической симметрии задачи азимутальные координаты вектора $\vec{k}$ не определены и считались равномерно распределенными в интервале $[0, 2\pi)$.

На втором этапе проводился расчет рассеяния квазиелектростатических волн на мелкомасштабных неоднородностях. Для этого мы использовали борновское приближение [24, 25] и учитывали однократное рассеяние волн. В рамках этого приближения поле рассеянных волн считается малым по сравнению с полем первичной волны, полученной на первом этапе. Неоднородности задавались корреляционной функцией с радиусом корреляции несколько десятков метров. Пространственное ограничение области с неоднородностями

описывалось двумерной гауссовой функцией. Подробное описание метода приведено в работе [10].

Из-за резкого уменьшения показателя преломления в нижней ионосфере (100–120 км) применение методов геометрической оптики для моделирования распространения рассеянных волн к земной поверхности невозможно. Для расчета распространения с высот 800–2000 км до земной поверхности проводился поиск решения волнового уравнения в плоскостойкой среде (full-wave метод) [23]. На данном этапе для удобства расчетов мы переходили к системе координат, в которой ось $\hat{z}$ оси z направлен вертикально вверх поперек ионосферным слоям.

В качестве граничных условий на верхнем слое выступали рассчитанные компоненты электрического и магнитного полей, обусловленные током, возбуждаемым полем первичной волны в неоднородностях. Граничные условия на нижнем слое задавались как коэффициенты отражения волн от земной поверхности с вектором электрического поля в плоскости падения и поперек этой плоскости. Земная поверхность представлена в виде слоя с проводимостью $\sigma = 2 \cdot 10^{-5} \text{ См}$ и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 10$, характерных для LOZ и KAN [26]. Более подробно детали расчетов представлены в работе [10].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анализ траекторий лучей

Для выбранной модели ионосферы на частотах 4 и 8 кГц максимальное значение резонансного угла (на высотах около 20000 км) составляет примерно 70° и 80°, соответственно. При этом на высотах 3 тыс. км этот угол уже около 85° и 88° для этих частот. В случае генерации волн электронами с энергией 5 кэВ разница между углом волновой нормали к силовой линии геомагнитного поля и резонансным углом не превышает одного градуса.

На частотах 4 и 8 кГц 60 и 80 процентов запущенных лучей соответственно достигают высоты НГР отражения. На рис. 2б приведены эмпирические плотности распределения высот, на которых происходит генерация на частотах 4 и 8 кГц и на которых генерация невозможна при данных условиях. Видно, что минимально возможная высота генерации на 4 кГц составляет около 10000 км и около 6000 км на 8 кГц. Ниже генерация не происходит из-за того, что условие черенковского резонанса выполняется для волновых нормалей вне резонансного конуса или на данных высотах фазовая скорость волны становится равной нулю.

Для частот 4 и 8 кГц при данных условиях НГР отражение наступает на высотах ~1300 и ~800 км соответственно. На рис. 2в приведены эмпириче-

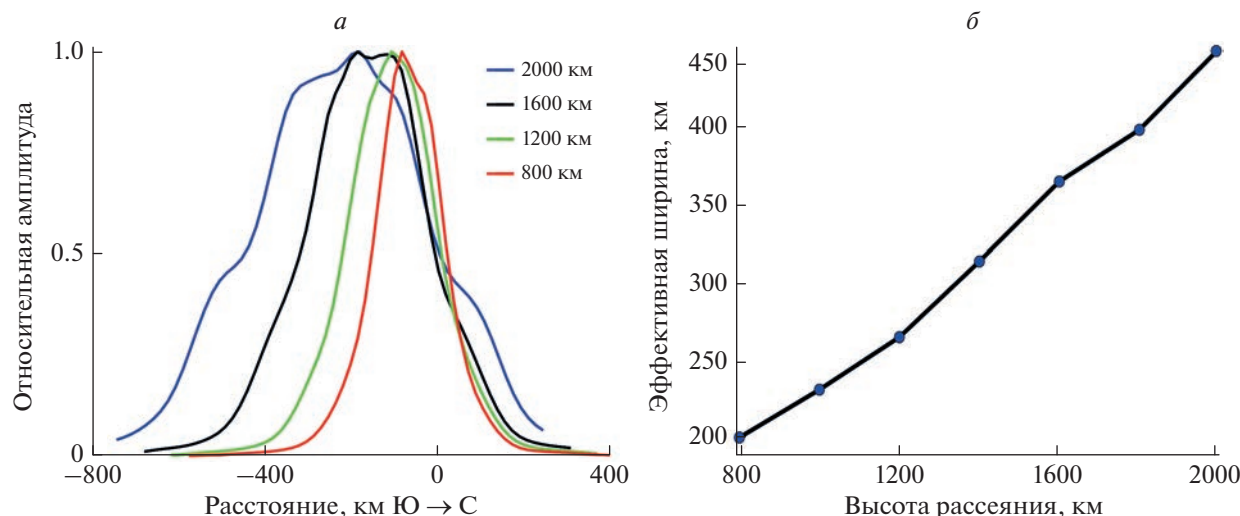


Рис. 3. Модельные распределения напряженности магнитного поля у земной поверхности в меридиональной плоскости при рассеянии квазиэлектростатических волн на области с неоднородностями шириной 50 км, расположенной на высоте 800 (красный), 1200 (зеленый), 1600 (черный) и 2000 км (а); зависимость эффективной ширины области засветки от высоты рассеяния (б).

ские плотности распределения широт, на которых произошло отражение лучей. В меридиональной плоскости при распространении к Земле формируется два пучка волн к югу и северу от силовой линии, на которой происходила генерация. Данный эффект наблюдается только при распространении пучка квазиэлектростатических волн с равномерным распределением азимутального угла перпендикулярной к геомагнитному полю компоненты волнового вектора $k_{\perp}$. Ширина распределения широт, на которых произошло отражение лучей (рис. 2в), зависит от распределений высоты актов генерации и энергии электронов и уменьшается при уменьшении ширины этих распределений. При фиксированной энергии электронов и генерации на фиксированной высоте распределение широт в меридиональной плоскости приобретает вид двух дельта функций, одна из которых соответствует направлению компоненты $k_{\perp}$ на юг, другая — на север.

Для частоты 8 кГц разброс по широте, на которой происходит отражение, и отклонение лучей от силовой линии генерации и больше по сравнению с частотой 4 кГц. Такой эффект вызван тем, что показатель преломления волн на частоте 4 кГц больше, чем на 8 кГц.

Наличие двух пучков позволяет интерпретировать обсуждаемые в работе [12] результаты одновременных наблюдений всплесков аврорального хисса 03 февраля 2019 18:30–20:00 UT на станциях LOZ, KAN и обсерватории Баренцбург (Архипелаг Шпицберген), расположенной севернее этих точек примерно на 1000 км. Проведенный авторами [12] анализ углов прихода и поля-

ризации всплесков показал, что при похожих вариациях магнитного поля на трех станциях наблюдаемые всплески не могут быть объяснены существованием одной области с неоднородностями. В KAN и LOZ регистрируются волны, рассеянные на области, центр которой находится на широте $\Phi \sim 63^\circ$. Волны, наблюдаемые в обсерватории Баренцбург, рассеивались на другой области, расположенной на широте $\Phi \sim 72^\circ$. При этом центры этих двух областей находились на близких геомагнитных меридианах ($\Lambda = 92^\circ$ и $\Lambda = 97^\circ$). Исходя из результатов моделирования, можно предположить, что в рассматриваемом событии квазиэлектростатические волны от одного источника, расположенного на широте $\Phi = 67^\circ\text{--}69^\circ$, рассеивались на двух пространственно-разнесенных областях с неоднородностями.

Распространение рассеянных волн к земной поверхности

Для исследования влияния высоты рассеяния волн на пространственную структуру поля у земной поверхности мы рассчитали эти поля на частоте 8 кГц, рассеянные на области с неоднородностями, заданной двумерной гауссовой функцией со среднеквадратичным отклонением 50 км, помещенной на высотах 800, 1200, 1600 и 2000 км.

На рис. 3а представлены рассчитанные распределения напряженности магнитного поля у земной поверхности в меридиональной плоскости $p(\Phi)$. Из рисунка видно, что с ростом высоты рассеяния растет ширина засвечиваемой области и увеличивается расстояние между подножием силовой линии, которая проходит через центр об-

ласти с неоднородностями, и максимумом распределения поля у земной поверхности.

Отклонение положения максимума области засветки от подножия силовой линии, по-видимому, вызвано тем, что на высоте рассеяния конус выхода мал и не превышает 7–10 град на частоте 8 кГц. Это приводит к практически вертикальной ориентации волновых нормалей рассеянных волн, попадающих в этот конус. Распространяясь до высот F-слоя ионосферы (300–400 км), рассеянные волны попадают в среду с увеличивающейся электронной концентрацией и, соответственно, увеличивающимся показателем преломления. В этом случае направление волновой нормали не будет претерпевать существенных изменений, и полученное отклонение будет определяться только высотой рассеяния.

Стоит отметить, что ширина области засветки увеличивается практически линейно с ростом высоты, на которой произошло рассеяние. На рис. 3б представлена зависимость эффективной ширины области засветки от высоты рассеяния. Мы определяли эффективную ширину как основание прямоугольника, площадь которого равна площади под кривой $p(\Phi)$ и высотой, равной значению максимума распределения $p(\Phi)$. При увеличении высоты рассеяния на 200 км эффективная ширина увеличивается примерно на 40 км. При рассеянии на высотах НГР отражения (800–1300 км) для используемой модели ионосферы эффективная ширина области засветки составляет 200–300 км, что способно обусловить временные вариации параметров поля в событии 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT (рис. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сравнения экспериментальных и модельных данных мы исследовали особенности распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности, обуславливающие наблюдаемую в обсерваториях Ловозеро и Каннунслехто локальность и малые по сравнению с расстоянием между станциями размеры области засветки аврорального хисса.

Выявлено, что для выбранной модели ионосферы наименьшая возможная высота генерации различается для разных частот. Для 4 кГц она составляет около 10000 км и около 6000 км для 8 кГц. При учете случайного характера генерации квазиэлектростатических волн в меридиональной плоскости формируется два пучка лучей к югу и северу от силовой линии, на которой произошла генерация. Ширина пучков по широте и отклонение лучей от силовой линии генерации на частоте 8 кГц на высоте НГР отражения выше по сравнению с частотой 4 кГц. Возникновение двух пучков волн позволяет объяснить исследованные в

работе [12] результаты одновременных наблюдений аврорального хисса в LOZ, KAN и обсерватории Баренцбург (Архипелаг Шпицберген) 03 февраля 2019 18:30–20:00 UT, когда регистрация всплесков была обусловлена существованием двух областей рассеяния с центрами на геомагнитных широтах 63° и 72° практически на одном меридиане.

Показано, что с ростом высоты рассеяния квазиэлектростатических волн в конус выхода ширины области засветки растет практически линейно. Кроме того, увеличивается расстояние между положением максимума распределения напряженности магнитного поля на земной поверхности и подножием силовой линии, на которой произошла генерация. Сравнение результатов моделирования с результатами наземных наблюдений аврорального хисса в KAN и LOZ 20 декабря 2018 года 19:17–19:37 UT показало, что рассеяние квазиэлектростатических волн на высотах НГР отражения (800–1200 км) могло вызвать наблюдаемые вариации параметров поля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jørgensen T.S. // J. Geophys. Res. 1968. V. 73. No. 3. P. 1055.
2. Lim T.L., Laaspere T. // J. Geophys. Res. 1972 V. 77. No. 22. P. 4145.
3. Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M. // Planet. Space Sci. 1993. V. 41. No. 2. P. 153.
4. Hoffman R.A., Laaspere T. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. No. 4. P. 640.
5. Mosier S.R., Gurnett D.A. // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. No. 7. P. 1137.
6. Beghin C., Rauch J.L., Bosqued J.M. // J. Geophys. Res. 1989 V. 94. No. A2. P. 1159.
7. Stix T.H. Waves in plasmas. N.Y.: Amer. Inst. Phys., 1992. 579 p.
8. Bell T.F., Ngo H.D. // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. No. A4. P. 2599.
9. Sonwalkar V.S., Harikumar J. // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. No. A8. Art. No. 18867.
10. Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. 59. № 5. С. 618; Lebed O.M., Fedorenko Yu.V., Manninen J. et al. // Geomagn. Aeron. 2019. V. 59. No. 5. P. 577.
11. Никитенко А.С., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В. и др. // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. № 3. С. 336; Nikitenko A.S., Manninen J., Fedorenko Yu.V. et al. // Geomagn. Aeron. 2022. V. 62. No. 3. P. 209.
12. Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 398; Nikitenko A.S., Lebed O.M., Fedorenko Yu.V. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 287.
13. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976.
14. Yearby K.H., Smith A.J. // J. Atmos. Terr. Phys. 1994. V. 56. No. 11. P. 1499.
15. Machida S., Tsuruda K. // J. Geophys. Res. Space Phys. 1984. V. 89. No. A3. P. 1675.

16. *Tsuruda K., Machida S., Terasawa T. et al.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 1982. V. 87. No. A2. P. 742.
17. *Inan U.S., Bell T.F.* // J. Geophys. Res. Space Phys. 1977. V. 82. No. 19. P. 2819.
18. https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php.
19. *Davies A., Lester M., Robinson T.R.* // Ann. Geophys. 1997. V. 15. No. 12. P. 1557.
20. *Banks P.* // Planet. Space Sci. 1966. V. 14. No. 11. P. 1085.
21. <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/instantrun/msis>.
22. *Walter F.* Nonducted VLF propagation in the magnetosphere. Stanford: Stanford University, 1969. 143 p.
23. *Lehtinen N.G., Inan U.S.* // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. No. A6. P. 63.
24. *Lehtinen N.G., Marshall R.A., Inan U.S.* // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. No. A7. Art. No. A00E40.
25. *Рытов С.М., Крацов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978.
26. *Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A. et al.* // Earth Planet. Sci. Lett. 2002. V. 54. P. 535.

Modeling of the auroral hiss spatial structure and comparison with the observed results

A. S. Nikitenko^{a,*}, Yu. V. Fedorenko^a, J. Manninen^b, O. M. Lebed^a, E. B. Beketova^c

^a*Polar Geophysical Institute, Apatity, 184209 Russia*

^b*Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, FIN-99600 Finland*

^c*Murmansk Arctic State University, Branch in Apatity, Apatity, 184209 Russia*

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

We present the results of the auroral hiss propagation modeling from the source region to the ground and its comparison with the observed results. We analyzed propagation conditions explaining locality of the auroral hiss illuminated area observed on the ground. It is shown that quasioleostatic waves with random amplitudes, phases and wavenormals directions representing the auroral hiss propagating to the ground form two wave beams in the meridional plane. The scattering of these waves at altitudes of 800–1300 km can cause the observed locality of the illuminated area.