

УДК 550.388.2

## ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ОБЛАСТИ ЗАСВЕТКИ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ

© 2022 г. А. С. Никитенко<sup>1</sup> \*, Ю. Маннинен<sup>2</sup>, Ю. В. Федоренко<sup>1</sup>, Н. Г. Клейменова<sup>3</sup>,  
М. В. Кузнецова<sup>1</sup>, А. В. Ларченко<sup>1</sup>, Е. Б. Бекетова<sup>4</sup>, С. В. Пильгаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

<sup>2</sup>Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН),  
г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Филиал Мурманского арктического государственного университета  
в г. Апатиты, г. Апатиты (Мурманская обл.), Россия

\*e-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

Поступила в редакцию 28.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Представлены результаты наземных наблюдений всплесков ОНЧ аврорального хисса в обсерваториях Ловозеро (Россия) и Каннуслахто (Финляндия), расположенных на близких геомагнитных широтах и разнесенных по долготе на расстояние ~400 км. Проанализировано 22 события, зарегистрированных с 7 ноября 2018 г. по 9 февраля 2020 г. Выявлено 4 типа пространственной структуры области засветки аврорального хисса: (1) область засветки имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; (2) область засветки вытянута по долготе; (3) область засветки перемещается по долготе; (4) смешанный тип. Для каждого типа сформулированы отличительные особенности временных вариаций горизонтальной компоненты магнитного поля, индекса круговой поляризации, отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного поля и распределения плотности потока энергии по углам прихода на частоте 8 кГц. Мы предполагаем, что размеры и положение области засветки ОНЧ аврорального хисса могут быть индикатором положения и поперечных размеров области, занятой мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации в верхней ионосфере.

DOI: 10.31857/S0016794022030129

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Авроральный хисс — один из типов естественных магнитосферных ОНЧ (очень низкочастотные волны, от сотен Гц до десятков кГц) излучений, регистрируемых у земной поверхности. Эти излучения могут занимать широкую полосу частот — от единиц до сотен кГц. Максимум интенсивности хисса отмечен в полосе частот 8–10 кГц [Makita, 1979]. На земной поверхности авроральный хисс наблюдается на геомагнитных широтах 65°–70° [Harang and Larsen, 1965; Morozumi, 1965; Jørgensen, 1966; Naykawa et al., 1975] и типичен для подготовительной фазы магнитосферной суббури [Клейменова и др., 2019; Manninen et al., 2020]. Низкоорбитальные спутники регистрируют хисс практически при каждом пересечении авроральных широт в вечернее и ночное время [Gurnett, 1966; Hughes et al., 1971].

Генерация хисса происходит в высокоширотной области магнитосферы на высотах 5–20 тыс. км за счет развития черенковской неустойчивости электронов с энергиями меньше 10 кэВ [Jørgensen, 1968; Maggs, 1976; Makita, 1979]. Многочисленные спутниковые наблюдения показывают, что всплески аврорального хисса коррелируют с потоками мягких электронов с энергиями ниже 1 кэВ [Hoffman and Laaspere, 1972; Laaspere and Hoffman, 1976; Mosier and Gurnett, 1972]. Волновая нормаль генерируемых волн лежит вблизи резонансного конуса [Maggs, 1976; Sazhin et al., 1993], который для волн ОНЧ-диапазона близок к 90°. Такие волны называют квазиэлектростатическими [Sonwalkar, 2000]. Волны ОНЧ-диапазона с волновыми нормальными вблизи резонансного конуса не способны выйти к земной поверхности [Budden, 1985]. Они могут отразиться или в верхней ионосфере на высоте, где их частота становится

равной локальной частоте нижнегибридного резонанса [Kimura, 1966], или в нижней ионосфере, где происходит полное внутреннее отражение волн из-за непопадания волновых нормалей в конус выхода, определяемый из закона Снеллиуса [Budden, 1985].

Основным механизмом, обеспечивающим выход квазиэлектростатических волн к земной поверхности, считается их рассеяние на мелко-масштабных (порядка сотен метров) неоднородностях плотности электронной концентрации в ионосфере на высотах меньше 5000 км [Sonwalkar, 2000]. На земной поверхности регистрируются рассеянные волны, волновые нормали которых попали в конус выхода [Sonwalkar, 2000; Лебедь и др., 2019].

На основе сравнения результатов моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до наземного наблюдателя с результатами наземных наблюдений аврорального хисса было показано [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021], что рассеянные волны “засвечивают” область на земной поверхности (далее область засветки), положение и размер которой определяются положением и поперечным размером области в верхней ионосфере, занятой мелко-масштабными неоднородностями электронной концентрации. Область засветки (как и область, занятая неоднородностями) локальна и может быть как вытянутой по долготе на расстояние вплоть до 400–600 км, так и иметь относительно малые размеры по широте и долготе (~100 км) [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021]. Локальная по широте область была также обнаружена экспериментально в ходе одновременных наземных наблюдений аврорального хисса в авроральных и приполярных широтах [Пильгаев и др., 2020]. Сопоставление результатов моделирования распространения аврорального хисса и данных наземных наблюдений хисса позволило сделать вывод, что при анализе таких излучений использование распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода привносит дополнительную информацию о положении области засветки и, соответственно, области в ионосфере, занятой неоднородностями, относительно точки регистрации [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021]. При этом локализация этих областей может быть проведена даже по данным наблюдений только на одной станции.

Целью данной работы является исследование особенностей пространственной структуры области засветки и соответствующих им особенностей временных вариаций параметров поля аврорального хисса по данным наземных наблюдений в авроральных широтах в двух разнесенных по долготе точках.

## 2. ДАННЫЕ

Одновременные наземные ОНЧ-наблюдения проводятся в obs. Ловозеро (LOZ, Россия, географические координаты:  $\varphi = 67.97^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 35.02^\circ \text{ E}$ , исправленные геомагнитные координаты:  $\Phi = 64.7^\circ$ ,  $\Lambda = 113.1^\circ$ ) и на финской ст. Каннуслахто (KAN, географические координаты:  $\varphi = 67.74^\circ \text{ N}$ ,  $\lambda = 26.27^\circ \text{ E}$ , исправленные геомагнитные координаты:  $\Phi = 64.6^\circ$ ,  $\Lambda = 105.6^\circ$ ), расположенных на близких геомагнитных широтах и разнесенных по долготе на ~400 км (рис. 1). В этих точках ведется регистрация горизонтальных компонент напряженности магнитного поля  $H_x$ ,  $H_y$  с использованием взаимно ортогональных рамочных антенн и вертикальной компоненты напряженности электрического поля  $E_z$  с помощью вертикального диполя. Регистрирующая аппаратура имеет схожие частотные характеристики, отличается низким уровнем собственных шумов и имеет точную привязку данных к мировому времени. Более подробно устройство приемников приведено в работах [Маннинен, 2005; Пильгаев и др., 2021]. Для сравнения результатов наблюдений в двух точках проведена тщательная калибровка регистраторов с использованием метода, изложенного в работе [Пильгаев и др., 2021]. Для достижения высокой точности калибровки использован генератор с привязкой волновой формы сигнала к сигналу GPS/GLONASS-приемника [Пильгаев и др., 2017, 2018].

## 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Записи компонент ОНЧ-поля обычно зашумлены атмосфериками — импульсными электромагнитными сигналами, вызванными грозовыми разрядами. Для подавления этих сигналов применен метод, используемый в работе [Лебедь и др., 2019]. На временной форме каждой компоненты поля производился поиск атмосфериков. Выделенные атмосферика удалялись, а полученные зазоры заменялись отрезком прямой, соединяющей крайние отсчеты сигнала. Анализ поля всплесков аврорального хисса производился в выделенной полосе частот в окрестности максимума интенсивности аврорального хисса (8–10 кГц) [Makita, 1979]. Для этого записи компонент поля были подвергнуты фильтрации полосовым фильтром с центральной частотой 8 кГц и шириной полосы 1 кГц. Рассматривались временные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля  $H_t = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ , индекса круговой поляризации ( $P_c$ ), отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного ( $|E_z|/H_t$ ) и распределения плотности потока энергии по углам прихода волн в точку наблюдений ( $p(\varphi)$ ).

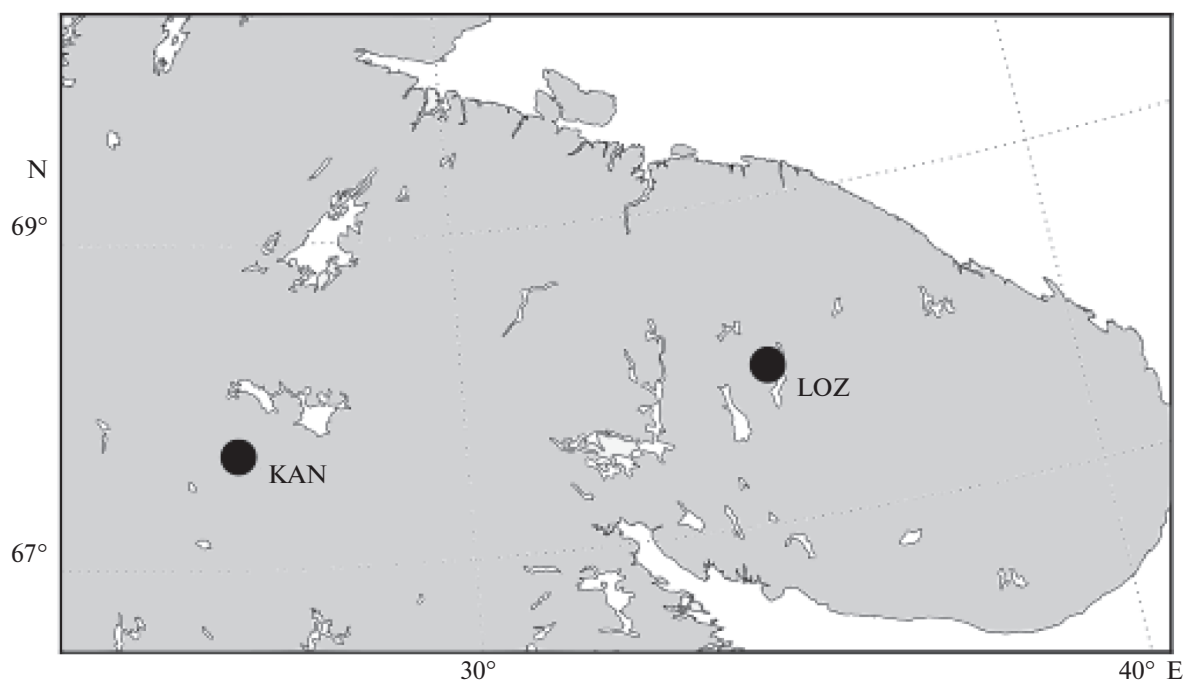


Рис. 1. Карта расположения точек ОНЧ-наблюдений Каннуслехто (KAN) и Ловозеро (LOZ) в географических координатах.

Индекс круговой поляризации рассчитывался, как  $P_c = 2\text{Im}(\tilde{H}_x \tilde{H}_y^*) / (\tilde{H}_x^2 + \tilde{H}_y^2)$ , [Рытов, 1976]. Здесь  $\tilde{H}_x$ ,  $\tilde{H}_y$  – отфильтрованные записи компонент магнитного поля, представленные в виде комплексных аналитических сигналов [Рытов, 1976], символ  $\text{Im}$  означает мнимую часть от выражения в скобках, звездочкой обозначено комплексное сопряжение. Индекс круговой поляризации отрицателен для лево-поляризованных волн и положителен для право-поляризованных. При значениях  $\pm 1$  поляризация круговая, а при  $P_c = 0$  – поляризация линейная.

Отношение вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного ( $|E_z|/H_t$ ) пропорционально синусу угла падения регистрируемой волны [Makita, 1979; Tsuruda, 1979]. Распределения плотности потока энергии по углам прихода волн в точку наблюдений  $p(\varphi)$  показывают величину плотности потока энергии регистрируемых излучений, попадающую в тот или иной интервал углов прихода волн. Максимум распределения  $p(\varphi)$  показывает наиболее вероятное направление прихода волн в точку наблюдений, а ширина распределения характеризует разброс направлений потока энергии относительно максимума. Форма распределения зависит от взаимного положения точки наблюдений и области засветки и, соответственно, области в ионосфере, занятой мелкомасштабными

неоднородностями [Лебедь и др., 2019, Никитенко и др., 2021]. При расположении точки наблюдений в центре области засветки, плотность потока энергии распределена практически равномерно по всему диапазону углов прихода –  $0^\circ$ – $360^\circ$ . По мере удаления от центра в распределении появляется выраженный максимум, указывающий на центр области засветки, и уменьшается ширина распределения [Лебедь и др., 2019]. В данной работе мы рассчитывали распределения плотности потока энергии по углам прихода волн в точку наблюдений  $p(\varphi)$  для 15-ти секундных интервалов с перекрытием 50%.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследовались всплески аврорального хисса, зарегистрированные в KAN и LOZ с 07 ноября 2018 г. по 9 февраля 2020 г. Для анализа выбрано 22 события регистрации аврорального хисса с отношением сигнал/шум на обеих станциях не меньше 10 дБ и длительностью, не превышающей 10–15 мин. Эти события были разделены на 4 группы по особенностям поведения параметров поля  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$ : 1) индекс круговой поляризации и отношение  $|E_z|/H_t$  слабо меняются во времени и существенно отличаются в двух точках; 2) индекс круговой поляризации и отношение  $|E_z|/H_t$  слабо меняются во времени и прини-

мают близкие значения в двух точках; 3) параметры  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  испытывают плавные вариации; 4) параметры  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  испытывают скачкообразные вариации. Ниже рассмотрены наиболее типичные события из каждой группы и предложена интерпретация этих событий.

#### 4.1. Область засветки с размерами, малыми относительно расстояния между станциями

Рассмотрим авроральный хисс, зарегистрированный на станциях KAN и LOZ 20 декабря 2018 в 19:17–19:37 UT. На рисунке 2а представлены временные вариации параметров  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  на обеих станциях в данном интервале. Как видно из рисунка, в LOZ амплитуда горизонтальной компоненты ( $H_t$ ) в 3–5 раз выше, чем в KAN. С 19:23 по 19:28 UT индекс круговой поляризации  $P_c$  меняется мало и составляет около 0.8. Это означает, что в данный момент регистрируются волны с правой, близкой к круговой, поляризацией [Лебедь, 2019; Никитенко, 2021; Рытов, 1976]. При этом отношение  $|E_z|/H_t$  уменьшается практически в два раза по сравнению с началом всплеска в 19:23 UT (рис. 2а), что, по-видимому, вызвано существованием в этот момент волн с малыми углами падения. Плотность потока энергии распределена практически равномерно, то есть волны приходят в точку наблюдений со всех направлений [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021].

На станции KAN индекс круговой поляризации  $P_c$  в течение всего всплеска близок к нулю, а отношение  $|E_z|/H_t$  от начала всплеска к его концу увеличивается в полтора раза. В данной точке регистрируются практически линейно поляризованные волны, с углами падения выше, чем в LOZ. Распределение плотности потока энергии по углам прихода  $p(\varphi)$  в KAN имеет выраженный максимум примерно на  $80^\circ$ , а разброс по углам составляет около  $60^\circ$ – $80^\circ$ . В используемой системе координат азимутальный угол отсчитывается по часовой стрелке от направления на север, то есть в данном случае волны приходят в точку наблюдений преимущественно с востока, где расположена ст. LOZ.

Правая, близкая к круговой, поляризация волн ( $P_c = 0.8$ ) и широкое распределение  $p(\varphi)$ , наблюдаемые в LOZ, означают, что в данном случае точка наблюдений находится вблизи центра области засветки рассеянных волн [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021]. Уменьшение отношения  $|E_z|/H_t$  подтверждает этот вывод. Линейная поляризация волн и малый разброс по углам в распределении  $p(\varphi)$  в KAN указывают на расположение этой точки вдали от центра области засветки, где, по-видимому, уже начинает домини-

ровать волна, испытывавшая отражения от стенок волновода Земля–ионосфера [Лебедь и др., 2019; Никитенко и др., 2021]. Это подтверждается и наблюдаемым в этой точке увеличением отношения  $|E_z|/H_t$ . Поскольку расстояние между станциями KAN и LOZ составляет около 400 км, можно предположить, что в данном случае область засветки имела размеры в 2–3 раза меньше расстояния между станциями. Обнаружено еще 4 подобных события, в двух из которых центр области засветки находился в окрестности ст. KAN, а в двух других – вблизи LOZ.

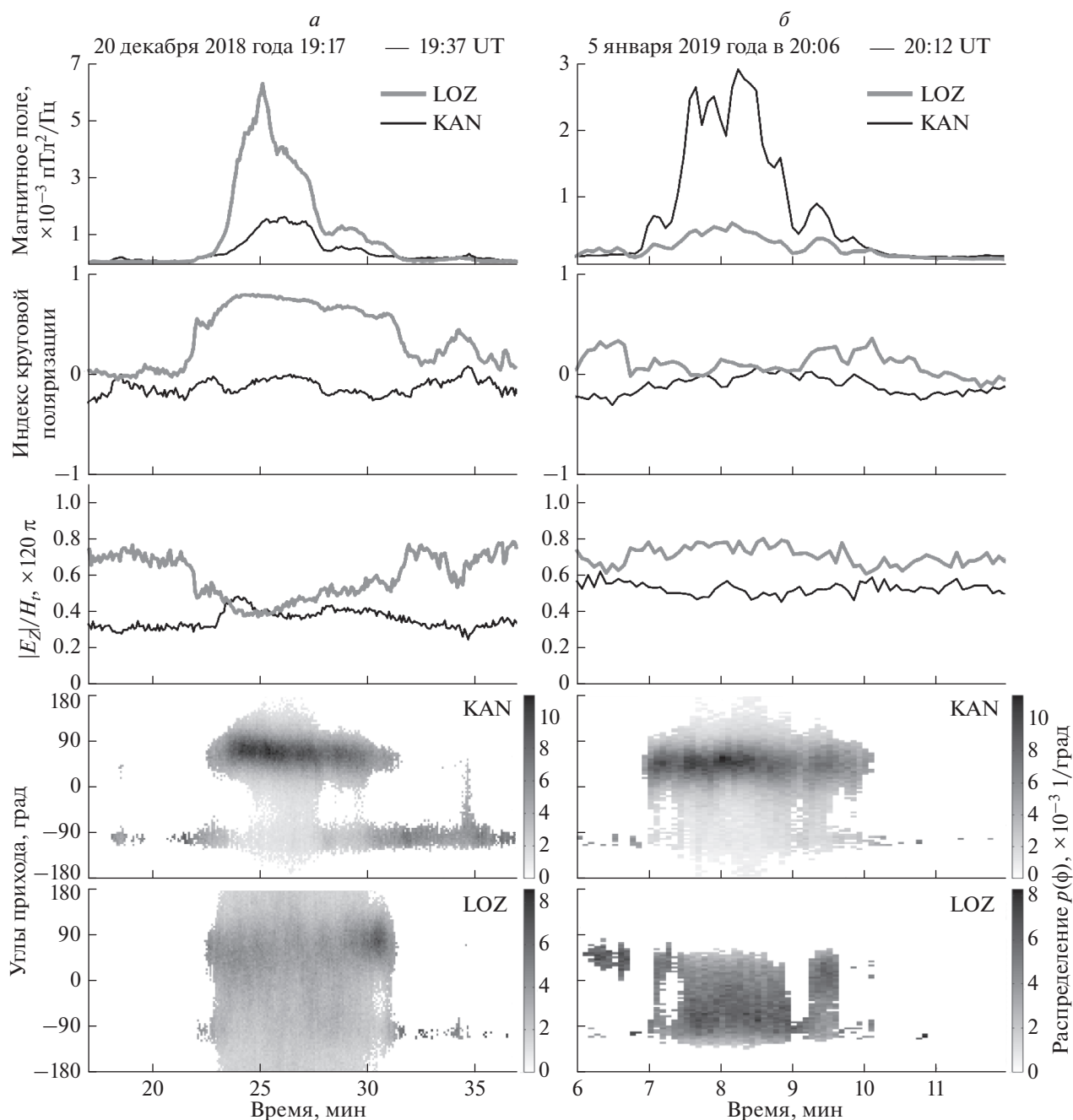
#### 4.2. Область засветки, вытянутая по долготе

На рисунке 2б представлены вариации параметров  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  во время регистрации аврорального хисса 5 января 2019 г. в 20:06–20:12 UT. На станциях KAN и LOZ индекс круговой поляризации  $P_c$  принимает близкие значения ( $P_c \sim 0$ ), т.е. в данном случае на обеих станциях регистрируются волны с линейной поляризацией. Отношение  $|E_z|/H_t$  на станциях не меняется в течение всплеска, поэтому можно предположить, что в точках наблюдений регистрируются волны, испытывавшие отражения от стенок волновода Земля–ионосфера. Максимум распределения  $p(\varphi)$  в KAN находится примерно на  $45^\circ$ , а в LOZ на  $-60^\circ$ . В данном случае область засветки находилась на более высоких широтах, чем KAN и LOZ.

Наблюдаемые временные вариации параметров поля отличаются от рассмотренных в предыдущем примере. Они могут быть объяснены только существованием в данный момент области засветки, вытянутой по долготе. При этом ее долготные размеры сравнимы или превышают расстояние между станциями. Поскольку амплитуда горизонтальной компоненты магнитного поля в KAN выше, чем в LOZ (рис. 2б), по-видимому, в рассматриваемом примере центр области засветки рассеянных волн находится ближе к KAN. Подобные вариации обнаружены еще в пяти событиях из 22-х.

#### 4.3. Перемещение области засветки по долготе

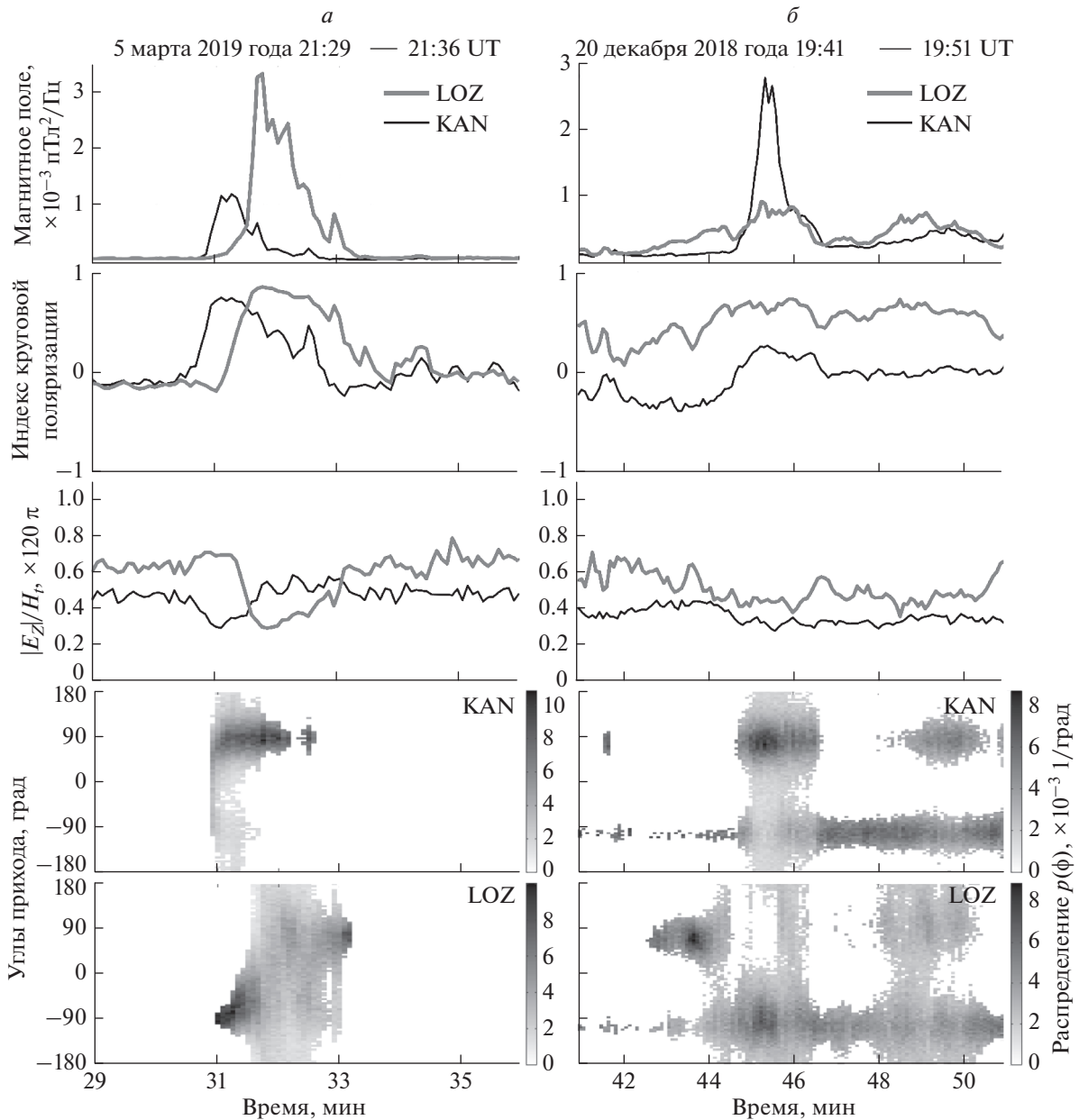
В трех событиях регистрации аврорального хисса из 22-х отмечены вариации параметров поля  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  схожие представленным на рис. 3а, рассчитанным для случая регистрации аврорального хисса 5 марта 2019 21:29–21:36 UT. В 21:31:15 UT в KAN амплитуда вариаций  $H_t$  и индекс круговой поляризации  $P_c$  достигают максимумов ( $P_c = 0.75$ ). От начала всплеска к этому моменту отношение  $|E_z|/H_t$  уменьшается почти в два раза. Распределение плотности потока энер-



**Рис. 2.** (сверху вниз) Временные вариации горизонтальной компоненты магнитного поля  $H_t$ , индекса круговой поляризации  $P_c$ , отношения вертикальной компоненты напряженности электрического поля к горизонтальной компоненте напряженности магнитного  $|E_z|/H_t$ , распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга  $p(\varphi)$  на частоте 8 кГц на станциях KAN и LOZ для события регистрации аврорального хисса: (а) – 20 декабря 2018 г. 19:17–19:37 UT, (б) – 5 января 2019 года в 20:06–20:12 UT.

гии по углам прихода  $p(\varphi)$  практически равномерно (рис. 3а). По-видимому, в этот момент центр области засветки находится в окрестности ст. KAN аналогично рассмотренному ранее событию 20 декабря 2018 в 19:17–19:37 UT, когда этот центр находился в окрестности LOZ. Затем про-

исходит плавное уменьшение амплитуды вариаций  $H_t$  и индекса круговой поляризации  $P_c$ , увеличение значений отношения  $|E_z|/H_t$ , а также уменьшение разброса в распределении  $p(\varphi)$ . К концу всплеска (около 21:33 UT) индекс круго-



**Рис. 3.** (То же самое, что на рис. 2) Параметры  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\phi)$  на частоте 8 кГц на станциях KAN и LOZ для события регистрации аврорального хисса: (а) – 5 марта 2019 г. 21:29–21:36 UT, (б) – 20 декабря 2018 г. 19:41–19:51 UT.

вой поляризации  $P_c \sim 0$ , отношение  $|E_z|/H_t$  увеличивается почти в два раза относительно значений в 21:31:15 UT, а максимум распределения  $p(\phi)$  находится примерно на  $90^\circ$  с разбросом по углам  $50^\circ$ – $60^\circ$ . Согласно представленным выше рассуждениям, в этот момент в KAN с востока приходят волны, испытавшие одно или несколько отражений от стенок волновода Земля–ионосфера.

На станции LOZ наблюдаются похожие вариации параметров поля с некоторой временной задержкой. Максимумы  $H_t$  и  $P_c$ , а также минимум

$|E_z|/H_t$ , наблюдаются около 21:31:45 UT (через 30 с после наблюдения их в KAN). В 21:31 UT максимум распределения  $p(\phi)$  находится на  $-(80^\circ$ – $90^\circ)$ , что означает западное направление прихода волн (со стороны станции KAN), где появился авроральный хисс. Затем разброс плотности потока энергии по обратному азимуту увеличивается. Около 21:31:45 UT распределение  $p(\phi)$  становится практически равномерным. В этот момент центр области засветки находится вблизи станции LOZ. После этого разброс в углах начи-

нает уменьшаться. В 21:33:15 UT максимум распределения находится на  $75^\circ$  (восточное направление прихода), а разброс составляет около  $50^\circ$ .

В рассмотренном примере, по-видимому, происходит перемещение области засветки и, соответственно, области рассеяния по долготе в направлении запад-восток, как и в работе [Лебедь, 2019]. Наблюдаемые в LOZ значения амплитуды горизонтальной компоненты магнитного поля выше, чем в KAN, могут быть вызваны особенностями генерации аврорального хисса. В одном из трех событий данного типа перемещение области засветки происходит с востока на запад.

#### 4.4. Смешанный тип

Наиболее часто (8 случаев из 22) на станциях KAN и LOZ регистрируются всплески аврорального хисса, которые не могут быть объяснены существованием упомянутых выше простых конфигураций области засветки. Ниже рассмотрено одно из таких событий.

На рисунке 3б показаны вариации параметров  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  для 20 декабря 2018 19:41–19:51 UT. Наблюдаемые в LOZ достаточно высокие значения индекса круговой поляризации  $P_c$  (0.6–0.7) и небольшое уменьшение отношения  $|E_z|/H_t$  относительно начала всплеска свидетельствуют о расположении данной точки на некотором удалении от центра области засветки. Отсутствие существенных временных вариаций этих параметров позволяет предположить отсутствие изменений в положении области засветки в течение развития всплеска. При этом вариации распределения  $p(\varphi)$  показывают, что в 19:44 UT происходит резкая смена направления прихода волн с восточного на западное. В 19:48 UT разброс в распределении увеличивается, означая приближение области засветки к точке наблюдений. В KAN при этом до 19:44 UT отсутствуют всплески аврорального хисса, а в 19:44 UT регистрируется мощный всплеск длительностью около минуты. Индекс круговой поляризации  $P_c$  равен около 0.2, отношение  $|E_z|/H_t$  относительно начала всплеска уменьшается на 0.1. Максимум распределения  $p(\varphi)$  находится примерно на  $75^\circ$ , означая приход всплеска с направления восток–северо-восток, а разброс в распределении составляет примерно  $90^\circ$ . После окончания этого всплеска в KAN регистрируется другой менее мощный всплеск, который согласно распределению  $p(\varphi)$  приходит в точку наблюдений с востока (рис. 3б).

Наблюдаемые вариации параметров  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  в KAN и LOZ, а также резкие изменения формы распределений  $p(\varphi)$  не подходят под опи-

санные выше конфигурации области засветки. По-видимому, в данный момент на фоне продолжительного всплеска, центр поля которого находился в окрестности LOZ, возник более мощный всплеск в направлении восток–северо-восток от KAN. Изменение распределения  $p(\varphi)$  в LOZ в 19:44 UT, вероятно, обусловлено существованием именно этого всплеска. Суперпозиция волн двух источников, вероятно, вызвала наблюдаемые нетипично малые значения параметров  $P_c$  и  $|E_z|/H_t$  в KAN.

Заметим, что обсуждаемое событие было зарегистрировано сразу после всплеска аврорального хисса, обсуждаемого выше в разделе 3.1, когда интенсивность излучений в LOZ была значительно больше, чем в KAN, и область засветки имела размеры в 2–3 раза меньше расстояния между станциями. Однако примерно через 10 мин ситуация изменилась, появился новый, более мощный всплеск в окрестности KAN, и авроральный хисс стал более интенсивным в KAN. Сопоставление особенностей положения области засветки ОНЧ в этих двух событиях свидетельствует о быстрой динамике развития плазменных процессов в ионосфере, что проявляется в быстром изменении параметров аврорального хисса.

Мы предполагаем, что размеры и положение области засветки ОНЧ аврорального хисса могут быть индикатором положения и поперечных размеров области, занятой мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации в верхней ионосфере. К сожалению, пока не имеется инструментальных ионосферных измерений, подтверждающих это предположение, однако полученные результаты представляют интерес и для исследования распределения ионосферных неоднородностей.

Заметим, что все рассмотренные выше события наблюдались в подготовительную фазу суббури. Полученные результаты свидетельствуют о том, что подготовительная фаза суббури развивается немонотонно, и в ионосфере авроральных широт возможно появление изменяющихся со временем локальных мелкомасштабных неоднородностей, косвенным индикатором положения которых может быть пространственное положение области засветки ОНЧ аврорального хисса.

## 5. ВЫВОДЫ

Проанализировано 22 случая аврорального хисса длительностью не превышающей 10–15 мин, зарегистрированных с 7 ноября 2018 г. по 9 февраля 2020 г. в обсерваториях Ловозеро (Россия) и Каннуслахто (Финляндия), расположенных на близких геомагнитных широтах и разнесенных по долготе на расстояние  $\sim 400$  км.

Исследование особенностей временных вариаций на частоте 8 кГц (максимум интенсивности аврорального хисса) горизонтальной компоненты магнитного поля, индекса круговой поляризации, отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного поля и распределения плотности потока энергии по углам прихода позволило выделить 4 типа пространственной структуры области засветки аврорального хисса: (1) область засветки имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; (2) область засветки вытянута по долготе; (3) область засветки перемещается по долготе; (4) смешанный тип.

Экспериментально показано, что при существовании малой области засветки в точке наблюдений, расположенной ближе к центру области, индекс круговой поляризации и отношение  $|E_z|/H_t$  и существенно отличаются от наблюдаемых в соседней точке. Распределения плотности потока энергии по углам прихода  $p(\varphi)$  в ближней точке имеют значительно больший разброс по углам, чем в удаленной точке.

В случае вытянутой области засветки индекс круговой поляризации и отношение  $|E_z|/H_t$  принимают близкие значения на обеих точках наблюдений, а максимумы распределения  $p(\varphi)$  указывают примерно на центр области.

При перемещении области засветки по долготу на обеих точках наблюдаются похожие вариации параметров  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $|E_z|/H_t$  и  $p(\varphi)$  с некоторой задержкой, определяемой направлением перемещения области засветки.

В случае смешанного типа в точках наблюдений регистрируются скачкообразные изменения параметров поля, означающие существование нескольких областей засветки.

Мы предполагаем, что размеры и положение области засветки ОНЧ аврорального хисса может быть индикатором положения и поперечных размеров области, занятой мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации в верхней ионосфере.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.И., Громов С.В., Турунен Т. Всплески ОНЧ-излучений типа “авроральный хисс” на земной поверхности на  $L \sim 5.5$  и геомагнитные возмущения // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 59. № 3. С. 291–300. 2019.  
<https://doi.org/10.1134/S0016794019030088>
- 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 аэрoномия. Т. 59. № 5. С. 618–627. 2019.  
<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 // Изв. РАН. Сер. физ. Т. 85. № 3. С. 398–403. 2021.  
<https://doi.org/10.31857/s0367676521030200>
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Лебедь О.М., Филатов М.В., Никитенко А.С., Федоренко Ю.В. Устройство для калибровки регистраторов электромагнитного поля // Тр. Кольского научного центра РАН. № 3. С. 75–80. 2017.
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М. Генератор сигналов специальной формы для калибровки регистраторов электромагнитного поля // Приборы и техника эксперимента. № 6. С. 49–55. 2018.  
<https://doi.org/10.1134/S0032816218060125>
- Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Никитенко А.С., Ларченко А.В., Филатов М.В., Лебедь О.М., Фролов И.Е., Козлов Б.В. Первые результаты ОНЧ-наблюдений во время полярной экспедиции “Трансарктика 2019” // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 60. № 2. С. 216–219. 2020.  
<https://doi.org/10.31857/s0016794020020121>
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Филатов М.В., Никитенко А.С. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени // Приборы и техника эксперимента. № 5. С. 115–125. 2021.  
<https://doi.org/10.31857/s0032816221040248>
- Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. М.: Наука, 1976. 494 с.
- Budden K. The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere. Cambridge: Cambridge University Press. 1985. 669 с.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511564321>
- Gurnett D.A. A satellite study of VLF hiss // J. Geophys. Res. V. 71. P. 5599–5615. 1966.  
<https://doi.org/10.1029/JZ071i023p05599>
- Harang L., Larsen R. Radio wave emissions in the VLF-band observed near the auroral zone—I. Occurrence of emissions during disturbances // J. Atmos. Terr. Phys. V. 27. P. 481–497. 1965.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(65\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(65)90013-9)
- Hayakawa M., Tanaka Y., Otsu I. The morphologies of low-latitude and auroral VLF hiss // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. № 3. P. 517–529. 1975.  
[https://doi.org/10.1016/0021-9169\(75\)90178-6](https://doi.org/10.1016/0021-9169(75)90178-6)
- 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 // J. Geophys. Res. V. 77. P. 640–650. 1972.  
<https://doi.org/10.1029/JA077i004p00640>
- Hughes A.R.W., Kaiser T.R., Bullough K. The frequency of occurrence of VLF radio emissions at high latitudes // Space Res. V. 11. P. 1323–1330. 1971.
- Jørgensen T.S. Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events // J. Geophys.



- Res. V. 71. P. 1367–1375. 1966.  
<https://doi.org/10.1029/JZ071i005p01367>
- *Jørgensen T.S.* Investigation auroral hiss measured on OGO-2 and Byrd station in terms of incoherent Cherenkov radiation // *J. Geophys. Res.* V. 73. P. 1055–1069. 1968.  
<https://doi.org/10.1029/JA073i003p01055>
- *Kimura I.* Effects of Ions on Whistler-Mode Ray Tracing // *Radio Science.* V. 1. № 3. P. 269–283. 1966.  
<https://doi.org/10.1002/rds196613269>
- *Laaspere T., Hoffman R.A.* New results on the correlation between low-energy electrons and auroral hiss // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 524–530. 1976.  
<https://doi.org/10.1029/JA081i004p00524>
- *Makita K.* VLF/LF hiss emissions associated with aurora // *Mem. Nat. Inst. Polar Res. Tokyo. Ser. A.* № 16. P. 1–126. 1979.
- *Manninen J.* Some aspects of ELF\_VLF emissions in geophysical research, Sodankyla Geophysical Observatory Publications. № 98. 177 p. 2005. Oulu Univ. Press. Finland. [<http://www.sgo.fi/Publications/SGO/thesis/Manninen-Jyrki.pdf>].
- *Manninen J., Kleimenova N., Kozlovsky A., Fedorenko Y., Gromova L., Turunen T.* Ground-based auroral hiss recorded in Northern Finland with reference to magnetic substorms // *Geophys. Res. Lett.* V. 47. 2020.  
<https://doi.org/10.1029/2019GL086285>
- *Morozumi H.M.* Diurnal variation of auroral zone geophysical disturbances // *Rep. Ionos. Space Res. Japan.* V. 19. P. 286–298. 1965.
- *Mosier S.R., Gurnett D.A.* Observed correlations between auroral and VLF emissions // *J. Geophys. Res.* V. 77. № 7. P. 1137–1145. 1972.  
<https://doi.org/10.1029/JA077i007p01137>
- *Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M.* Auroral hiss: a review // *Planet. Space Sci.* V. 41. P. 153–166. 1993.  
[https://doi.org/10.1016/0032-0633\(93\)90045-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90045-4)
- *Sonwalkar V.S., Harikumar J.* An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // *J. Geophys. Res.* V. 105. P. 18.867–18.884. 2000.  
<https://doi.org/10.1029/1999JA000302>
- *Tsuruda K., Ikeda M.* Comparison of three different types of VLF direction-finding techniques // *J. Geophys. Res.* V. 84 (A9). P. 5325–5332. 1979.  
<https://doi.org/10.1029/JA084iA09p05325>