

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.85-88

## НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОНЧ ХИССА В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ И СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Никитенко<sup>1</sup>, Ю.В. Федоренко<sup>1</sup>, О.М. Лебедь<sup>1</sup>, Ю. Маннинен<sup>2</sup>, Н.Г. Клейменова<sup>3</sup>,  
С.В. Пильгаев<sup>1</sup>, А.В. Ларченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Апатиты, Россия

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

<sup>3</sup>Институт физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

**Аннотация.** Представлены результаты одновременных наземных наблюдений ОНЧ аврорального хисса в двух пространственно разнесенных точках ( $L \sim 5.5$ ). Наблюдения проведены на финской станции Каннуслехто и в российской обсерватории Ловозеро. В обл. Ловозеро осуществляется непрерывная регистрация горизонтальных компонент напряженности магнитного поля и вертикальной компоненты напряженности электрического поля. В Каннуслехто наблюдения вертикальной компоненты электрического поля (в дополнении к наблюдениям магнитных компонент) стали проводиться в ноябре 2018 года. Регистраторы ОНЧ излучений были тщательно откалиброваны. Проведена оценка положения области выхода аврорального хисса, учитывая случайный характер изменения во времени значений углов прихода вектора Пойнтинга. Разработана модель распространения аврорального хисса в ионосфере и волноводе Земля - ионосфера. Модель применена для оценки положения области выхода ОНЧ аврорального хисса. Показано, что вид плотности распределения азимутальных углов прихода зависит от взаимного положения области выхода и точки наблюдений.

### Введение

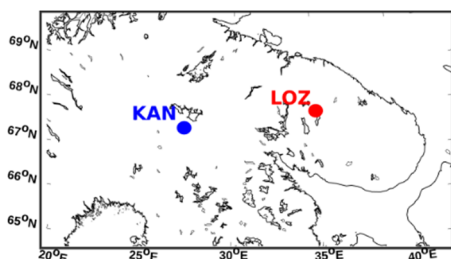
Авроральный хисс - один из типов естественных ОНЧ (очень низкочастотных, от сотен герц до десятков килогерц) излучений, наиболее часто регистрируемых у земной поверхности в авроральных широтах. Эти излучения распространяются к земной поверхности на моде вистлеров. Как правило, они наблюдаются в вечернем и ночном секторах авроральной зоны. Генерация аврорального хисса возникает в результате развития черенковской неустойчивости во время высыпаний электронов с энергиями от нескольких эВ до 10 кэВ. Наземные наблюдения показывают, что возникновение аврорального хисса обычно сопровождается возникновением дуги полярных сияний [Sazhin et al., 1993; LaBelle and Treumann, 2002]. При исследовании аврорального хисса по данным наземных наблюдений особый интерес представляет связь динамики области выхода этих излучений с динамикой полярных сияний. Также при сопоставлении наземных данных со спутниковыми особое внимание уделяется исследованию связи возникновения аврорального хисса с потоками авроральных электронов и с их функцией распределения.

Авроральный хисс входит в разряд естественных шумовых излучений. Значения параметров поля, например, угла прихода волн в точку наблюдений, изменяются во времени случайным образом. При исследовании динамики области выхода таких излучений важно учитывать статистические особенности изменения параметров поля во времени. В данной работе представлен метод оценки динамики положения области выхода аврорального хисса по данным наземных наблюдений в пространственно разнесенных точках в высоких широтах.

### Приемник ОНЧ излучений

В данной работе исследуются ОНЧ излучения, которые были зарегистрированы на станциях Каннуслехто (KAN, северная Финляндия) и Ловозеро (LOZ, Россия), расположенных на близких  $L$ -оболочках ( $L \sim 5.5$ ) и разнесенных по долготе на 400 км. На рис. 1 представлена карта расположения станций. Обе станции оснащены идентичными регистраторами ОНЧ излучений, способными измерять горизонтальные компоненты напряженности магнитного поля ( $H_x, H_y$ ) и вертикальную компоненту напряженности электрического поля  $E_z$ . Регистрация компонент  $H_x, H_y$  ведется на две взаимно перпендикулярные рамочные антенны. Измерения компоненты  $E_z$  ведутся с использованием дипольной антенны. Приемники обладают точной привязкой к мировому времени, максимальная ошибка не превышает 1 мкс. Для осуществления сравнения результатов наблюдений в двух точках проведена точная калибровка антенн регистраторов. Для калибровки магнитных антенн использован калибровочный тороид. Контролируя силу тока, создается магнитный поток через рамку антенны известной величины. Калибровка электрической антенны выполнена с использованием ее

эквивалента, что позволяет измерить фазо-частотную характеристику. Амплитудно-частотная характеристика оценена по отношению  $E_z/H_t$  сигналов атмосфериков на частотах ниже поперечного резонанса волновода Земля - ионосфера (то есть ниже 1.8 кГц). Здесь  $H_t = \sqrt{H_x^2 + H_y^2}$ .

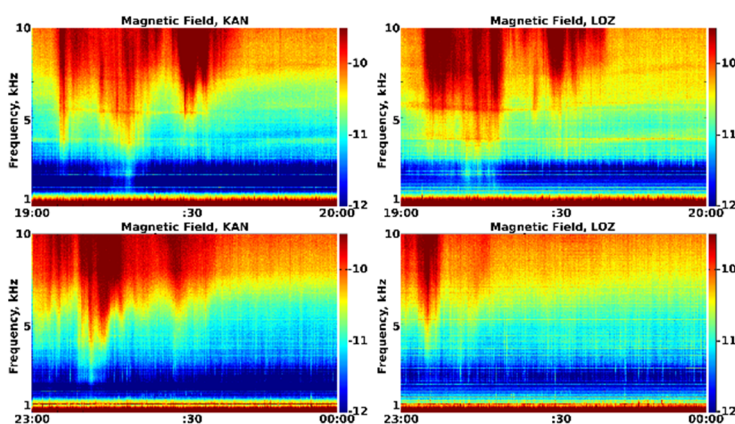


**Рисунок 1.** Карта расположения точек регистрации ОНЧ излучений.

### Обработка данных

В данной работе исследуются особенности распространения аврорального хисса на выделенных частотах. Для этого записи компонент электромагнитного поля фильтровались полосовым фильтром с центральной частотой 8500 Гц, расположенной в окрестности максимума интенсивности этих излучений. Ширина полосы фильтра выбрана равной 1000 Гц. Такая полоса является достаточно узкой, чтобы исключить влияние на результаты измерений эффектов генерации и распространения в диспергирующей среде – ионосфере, и достаточно широкой для достижения статистической устойчивости.

Для исследования динамики положения области выхода будем рассматривать распределение плотности потока энергии по углам прихода  $p_s(\varphi)$ . В данной работе угол прихода волны в точку наблюдений будем определять как угол, который составляет вектор, обратный вектору Пойнтинга, с первой осью выбранной системы координат. Мы используем систему координат, в которой ось X направлена на север, ось Y – на восток, ось Z – вниз, начало координат находится в точке наблюдений. Для построения распределения, считая земную поверхность бесконечно проводящей плоскостью, для каждого отсчета данных мы рассчитывали компоненты вектора Пойнтинга. После этого усредняли эти значения на интервале 0,1 секунды. Затем рассчитывались азимутальные углы прихода и плотность потока энергии для каждого отсчета данных. Диапазон возможных углов прихода  $[0, 360)$  разбивался на равные сектора, после чего рассчитывалось среднее значение плотности потока энергии в каждом секторе. Результаты расчетов представлялись в полярных координатах. Максимум распределения  $p_s(\varphi)$  указывает на наиболее вероятное направление на область выхода ОНЧ излучений. Более подробно метод расчета распределения  $p_s(\varphi)$  описан в работе [Лебедь и др., 2019].



**Рисунок 2.** Спектрограммы аврорального хисса, зарегистрированного в KAN и LOZ 8 декабря 2018 в 19:00 – 20:00 UT (слева) и 19 декабря в 23:00 – 24:00 UT (справа).

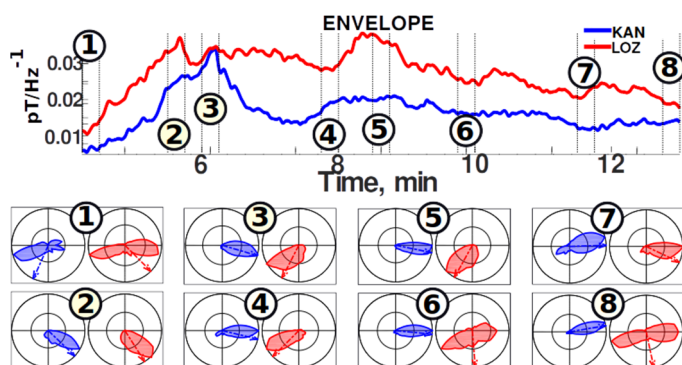
азимутальным углам прихода  $p_s(\varphi)$  в различные интервалы времени длительностью 15 секунд. Интервалы под номерами 1, 6 и 8 выбраны в окрестности минимумов амплитуды напряженности магнитного поля, интервалы 2, 3, 4, 5 и 7 – в окрестности максимумов. Из рисунка видно, что распределения  $p_s(\varphi)$ , рассчитанные на интервалах 1, 6 и 8 по данным наблюдений в LOZ, имеют два максимума. Эти максимумы указывают на то, что излучения в LOZ приходят с двух сторон – с востока и запада. Распределения  $p_s(\varphi)$  в KAN указывают на то, что в эти моменты времени энергия в точку наблюдений приходит сначала с запада (интервал 1), а затем с востока (интервалы 6, 8). Мы связываем наблюдаемые распределения с существованием в ионосфере большой области выхода, вытянутой в направлении восток – запад. Предположительно размеры этой области соизмеримы с размерами авроральной дуги. На фоне таких излучений возникают кратковременные ОНЧ всплески. В интервал 2 распределения  $p_s(\varphi)$  достаточно “узкие”, а их максимумы указывают на юго-восток. При этом амплитуда  $H_t$  в LOZ несколько выше, чем в KAN. Это означает что волны

### Наблюдения

Рассмотрим динамику распределения плотности энергии по углам прихода для нескольких случаев аврорального хисса, зарегистрированного в KAN и LOZ в декабре 2018 года. На рис. 2 представлены примеры спектрограмм излучений, зарегистрированных в KAN и LOZ 8 декабря 2018 в 19:00 – 20:00 UT (слева) и 19 декабря в 23:00 – 24:00 UT (справа).

Рассмотрим фрагмент аврорального хисса, зарегистрированного 08 декабря 2018 года в 19:04:15 – 19:13:00 UT. На рис. 3 представлены огибающая амплитуды горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля  $H_t$  и распределения плотности энергии излучений по

приходят в точки наблюдений с юго-востока, и, соответственно, LOZ находится несколько ближе к области выхода этих всплесков. Спустя 15 секунд (интервал 3) картина меняется. Распределения  $p_s(\varphi)$  указывают на то, что область выхода находится южнее обеих точек наблюдения. Равенство амплитуд в LOZ и KAN говорит о том, что расстояние от обеих точек до центра симметрии области выхода одинаковое. В интервалы 4 и 5 распределения  $p_s(\varphi)$  в KAN становятся “уже”, а в LOZ, наоборот, - “шире”. В это время в LOZ наблюдается увеличение амплитуды  $H_t$ . Вероятно, такая картина вызвана перемещением области выхода в восточном направлении, то есть в направлении к LOZ. Распределения  $p_s(\varphi)$ , рассчитанные в интервал 7, показывают, что ОНЧ всплески исчезают и начинают преобладать “фоновые” излучения.



**Рисунок 3.** Огибающие амплитуды горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода аврорального хисса, зарегистрированного 08 декабря 2018 года в 19:04:15 – 19:13:00 UT. Синим цветом представлены графики, рассчитанные по данным наблюдений в KAN, красным – по данным наблюдений в LOZ.

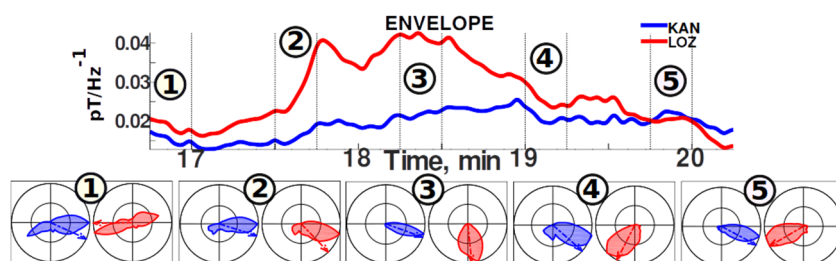
указывают на то, что область засветки находится южнее обеих точек наблюдения. Практически равные амплитуды  $H_t$  в обеих точках означают, что расстояния от центра области выхода до LOZ и KAN примерно одинаковые. В интервал 5 картина аналогична той, что наблюдается в интервал 4. В данном случае уменьшение амплитуды в KAN и LOZ говорит об изменении характера генерации, а не о динамике положения области засветки. В интервал 5 наблюдаются распределения  $p_s(\varphi)$  и амплитуды  $H_t$  аналогичные тем, которые наблюдались в интервал 4. По-видимому, в течение следующих 45 секунд положение области выхода не меняется.

Амплитуда  $H_t$  и распределения  $p_s(\varphi)$  аврорального хисса, зарегистрированного 08 декабря 2018 года в 23:02:15 - 23:08:30 UT, представлены на рис. 5. Это пример, отличающийся от предыдущих примеров и иллюстрирующий еще одну типичную картину динамики параметров поля аврорального хисса. Для всех пяти выбранных интервалов распределения  $p_s(\varphi)$  показывают, что в LOZ преобладает западное направление прихода волн в точку наблюдений. В KAN в интервалы 1, 2 и 5 волны приходят также с запада. В интервалы 3 и 4 распределения  $p_s(\varphi)$  имеют два максимума, причем в эти моменты амплитуда  $H_t$  в LOZ больше, чем в KAN. Наблюдаемые изменения распределений  $p_s(\varphi)$  в обеих точках могут быть интерпретированы либо как существование фонового излучения с пространственными флуктуациями интенсивности области засветки, либо одновременного существования двух или более областей засветки, расположенных между точками наблюдений и западнее KAN.

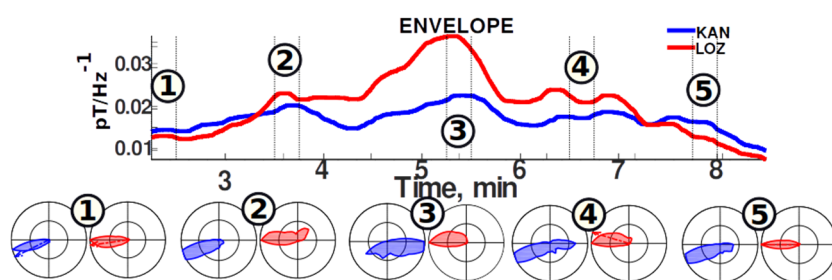
### Обсуждение результатов и выводы

Результаты наземных наблюдений согласуются с результатами моделирования распространения аврорального хисса от области генерации до земной поверхности, представленными в работе [Лебедь и др., 2019]. Когда центр поля рассеянных на ионосферных неоднородностях волн находится вблизи точки наблюдений, распределение  $p_s(\varphi)$  выглядит довольно широким (рис. 3 и 4). Если бы этот центр находился в окрестности точки наблюдений, то распределение  $p_s(\varphi)$  стремилось к равномерному. При удалении от центра распределение сужается, что позволяет точно определить направление на источник. Если существует одновременно несколько источников, то распределение  $p_s(\varphi)$  может быстро меняться во времени и в некоторых случаях иметь несколько мод. Такая картина наблюдается в случае регистрации аврорального хисса, представленного на рис. 5.

Всплеск 8 декабря 2018 года в 19:16:45 - 19:20:15 UT (рис. 4). Сначала (интервал 1) наблюдаются фоновые излучения. Распределения  $p_s(\varphi)$  в обеих точках имеют два максимума. Как и в предыдущем случае, область выхода вытянута вдоль параллели. В 19:17:30 возникает ОНЧ всплеск. В этот момент (интервал 2) максимумы распределения  $p_s(\varphi)$  в LOZ и KAN указывают на приход волн в точки наблюдений с востока. При этом амплитуда  $H_t$  в LOZ больше, чем в KAN. Эти факты означают, что в этот момент область выхода находится ближе к LOZ. Затем область выхода перемещается в юго-западном направлении. В интервал 3 распределения  $p_s(\varphi)$  показывают, что область выхода к югу от LOZ и к юго-востоку от KAN. При этом амплитуда  $H_t$  в LOZ значительно больше, чем в KAN. Вероятно, такие отличия в амплитуде вызваны тем, что область выхода достаточно сильно локализована – около 100-150 км в радиусе. В интервал 4 распределения  $p_s(\varphi)$



**Рисунок 4.** Огибающие амплитуды горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода аврального хисса, зарегистрированного 08 декабря 2018 года в 19:16:45 - 19:20:15 UT.



**Рисунок 5.** Огибающие амплитуды горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля и распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода аврального хисса, зарегистрированного 08 декабря 2018 года в 23:02:15 - 23:08:30 UT.

Предложен метод оценки положения области выхода аврального хисса к земной поверхности. Метод основан на построении распределений плотности потока энергии излучений по азимутальным углам прихода в узкой полосе частот. Показано, что с его помощью возможно проведение локализации области выхода по данным наземных наблюдений. Показано, что для рассмотренных случаев регистрации ОНЧ аврального хисса размеры области выхода сравнимы или меньше расстояния между станциями. Вероятность наблюдения отдельных всплесков в LOZ или KAN зависит от взаимного расположения области выхода и точки наблюдений.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-52-50025 ЯФ\_a (НАС).

### Литература

- Sazhin, S. S., Bullough, K., Hayakawa, M. (1993) Auroral hiss: a review // *Planet. Space Sci.*, 41, 153–166, doi:10.1016/0032-0633(93)90045-4
- LaBelle, J., Treumann, R. (2002) Auroral Radio Emissions, 1. Hisses, Roars, and Bursts // *Space Science Reviews*, 101(3), 295–440, doi: 10.1023/A:1020850022070
- Лебедь, О.М., Федоренко, Ю.В., Маннинен, Ю., Клейменова, Н.Г., Никитенко, А.С. (2019) Моделирование прохождения аврального хисса от области генерации к земной поверхности // *Геомагнетизм и Аэрономия*, V. 59, No.5, P.618-627, doi:10.1134/S0016794019050079