

ВСПЛЕСКИ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЙ ТИПА “АВРОРАЛЬНЫЙ ХИСС” НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА $L \sim 5.5$ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

© 2019 г. Н. Г. Клейменова^{1, *}, Ю. Маннинен², Л. И. Громова³,
С. В. Громов³, Т. Турунен²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

²Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

³Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: kleimen@ifz.ru

Поступила в редакцию 07.11.2018 г.

После доработки 08.11.2018 г.

Принята к публикации 24.01.2019 г.

Исследованы геомагнитные условия во время появления на земной поверхности ОНЧ-излучений типа “авроральный хисс”, представляющих собой шумовые всплески на частотах выше 5–6 кГц. Работа основана на анализе данных наблюдений “авроральный хисс” в авроральных широтах северной Финляндии на ст. Каннуслехто (КАН, $L \sim 5.5$) во время зимних кампаний 2013–2018 гг. Показано, что всплески “аврорального хисса” наиболее часто наблюдаются в интервале 20–01 MLT при небольшой геомагнитной активности ($Kp < 3$). Установлено, что всплески типичны для подготовительной фазы (growth phase) магнитосферной суббури, с началом суббури (break-up сияний) всплески внезапно прекращаются, по-видимому, за счет резкого возрастания поглощения ОНЧ-волн в ионосфере. Всплески часто сопровождаются генерацией геомагнитных пульсаций $Pi2$. Наблюдения ОНЧ показали, что в главную фазу магнитных бурь всплесков “аврорального хисса” на земной поверхности не наблюдается, однако они типичны для фазы восстановления бури. По модельным данным получено, что во время появления всплесков “аврорального хисса” ст. КАН обычно проецируется в приэкваториальную область аврорального овала или в зону диффузного высыпания более энергичных электронов, т.е. в более низкие широты, чем типичное положение полярных сияний в это время.

DOI: 10.1134/S0016794019030088

1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из типичных естественных ОНЧ (очень низкочастотных) излучений, наблюдаемых на земной поверхности в высоких широтах, являются всплески “аврорального хисса” [Helliwell, 1965], тесно связанные с полярными сияниями [Burton and Boardman, 1933; Ellis, 1957; Martin et al., 1960; Jørgensen and Ungstrup, 1962; Morozumi, 1965; Ungstrup, 1966; Harang, 1969 и многие др.] Несмотря на очень большое число статей, посвященных исследованиям этого типа ОНЧ-излучений, многие вопросы связи их с другими геофизическими явлениями и геомагнитной активностью остаются невыясненными.

“Авроральный хисс” представляет собой электромагнитные волны свистовой моды с широким шумовым спектром от 3–5 кГц до нескольких сотен кГц. Общепринятый в мировой практике термин “хисс” часто переводится на русский язык как “шипения”, но в научной литературе

вряд ли целесообразно использовать этот не очень благозвучный перевод и, по нашему мнению, лучше пользоваться международным термином “auroral hiss” — “авроральный хисс” в дальнейшем (АХ). Первая публикация о наземных наблюдениях АХ была более 80 лет назад [Burton and Boardman, 1933]. Интерес к этим излучениям возрос лишь в 60–70-е гг. прошлого века с развитием техники регистрации ОНЧ-волн и после создания классификации различных типов естественных ОНЧ-излучений, приведенной в монографии [Helliwell, 1965], не потерявшей актуальности и в наши дни.

Существует общепризнанное мнение, что генерация АХ происходит над ионосферой на высотах порядка 5–20 тыс. км за счет черенковской неустойчивости высыпающихся электронов [Ellis, 1957; Jørgensen, 1968; Maggs, 1976; Makita, 1979]. В отличие от ОНЧ-хоров и квази-периодических излучений, АХ в сопряженных областях

Арктики и Антарктики не наблюдаются одновременно [Sato et al., 1980]. Это подтверждает тот факт, что генерация АХ происходит не в экваториальной плоскости магнитосферы, а над ионосферой.

АХ характеризуется очень четкой низкочастотной отсечкой на частоте от 2 кГц до ~6 кГц [Harang and Larsen, 1965; Barrington et al., 1971 и др.]. Частота отсечки уменьшается с широтой, достигая 2 кГц на геомагнитной широте ~70°. Эта отсечка соответствует частоте нижнего гибридного резонанса (НГР) окружающей плазмы, поэтому АХ раньше нередко называли НГР-излучениями [Brice and Smith, 1965; McEwen and Barrington, 1967]. Частотное обрезание ОНЧ-волн происходит потому, что свистовая мода ОНЧ-волн, распространяясь вблизи резонансного конуса, отражается в точке, где ее частота совпадает с частотой НГР. Верхняя частота АХ может достигать сотен кГц, но всегда ниже локальной гирочастоты электронов или электронной плазменной частоты, той, которая в данной точке ниже.

Морфологические характеристики АХ, установленные по данным наземных и спутниковых наблюдений, подробно обсуждались во многих публикациях и ряде обзоров, например, [Makita, 1979; Sazhin et al., 1993; LaBelle and Treumann, 2002]. Кратко перечислим основные характеристики АХ на земной поверхности.

Максимум появления АХ на земной поверхности отмечается в вечернее и предполуночное время на геомагнитных широтах ~65°–70° например, [Harang and Larsen, 1965; Morozumi, 1965; Jørgensen, 1966; Haykawa et al., 1975] и многие др.. На низкоорбитальных спутниках АХ регистрируется почти при каждом пересечении авроральных широт в вечернее и ночное время с максимумом интенсивности на геомагнитных широтах ~68°–72° например, [Gurnett, 1966; Hughes et al., 1971]. В сезонном ходе появления АХ на земной поверхности наблюдается четкий максимум зимой и минимум летом [Harang, 1968; Spasojevic, 2016].

Наиболее типичной формой АХ на земной поверхности являются группы отдельных иррегулярных резких всплесков неструктурированного шума длительностью от 1 мин до 10–20 мин [Harang and Larsen, 1965; Вершинин и др., 1974; Haykawa et al., 1975; Srivastava, 1976]. Всплески излучений короче 10 мин в работах [Martin et al., 1960; Morozumi, 1965; Kokubun et al., 1972; Tanaka et al., 1976; Makita, 1979] называют импульсным (impulsive) АХ, а более длительные — непрерывным (continuous) АХ. Согласно этим работам импульсный АХ характеризуется очень широким спектром до десятков или даже сотен кГц и часто сопровождается усилением яркости полярных сияний в зените или их резкими движениями. Непрерывный АХ имеет более узкополосный

спектр, обычно ниже 30 кГц и сопровождается спокойными устойчивыми дугами полярных сияний, наблюдаемыми к полюсу от ОНЧ-приемника например, [Srivastava, 1976; Nishino et al., 1982]. Максимальная интенсивность как импульсных, так и непрерывных АХ на земной поверхности и на низкоорбитальных спутниках наблюдается на частоте ~10 кГц, например, [Jørgensen, 1968; Gurnett and Frank, 1972].

Всплески АХ на земной поверхности обычно достаточно локальны [Harang and Larsen, 1965; Jørgensen, 1966; Srivastava, 1976; Makita, 1979]. Так, Harang and Larsen [1965] показали, что интенсивность всплесков АХ может значительно различаться в обс. Тромсе ($\Phi \sim 70^\circ$) и Кируна ($\Phi \sim 65^\circ$), расстояние между которыми порядка 250 км. К такому же выводу пришел и Jørgensen [1966], сравнивая между собой данные ОНЧ-наблюдений в полосе частот 4–9 кГц на 13 высокоширотных станциях.

Многими исследователями была установлена четкая связь АХ не только с полярными сияниями, но и с высыпанием частиц с энергией меньше 10 кэВ, например, [Gurnett, 1966; Gurnett and Frank, 1972; Hoffman and Laaspere, 1972; Laaspere and Hoffman, 1976, Ondoh et al., 1981]. При этом импульсный АХ сопровождался структурированными потоками высыпавшихся электронов с энергией больше 1 кэВ, а непрерывный АХ — меньше 1 кэВ [Hoffman and Laaspere, 1972; Ondoh et al., 1981]. Однако в работе [LaBelle and Treumann, 2002] указывается, что, вполне вероятно, что генерация АХ и полярных сияний происходит на разных высотах и за счет разных популяций электронов.

Интенсивность всплесков АХ, наблюдаемых на земной поверхности, на 2–4 порядка ниже, чем аврорального хисса, зарегистрированного на спутниках например, [Barrington et al., 1971; Gurnett and Frank, 1972]. Только незначительная часть излучений выходит к земной поверхности, поскольку теоретически через ионосферу могут пройти только волны с почти вертикальной волновой нормалью, попадающей в конус прохождения (~10°–12°). Так, Srivastava [1974], сопоставляя данные одновременных наблюдений АХ на спутнике Injun-5 и двух наземных станциях на Аляске, обнаружил, что из 8 зарегистрированных на спутнике случаев АХ, только один наблюдался на земной поверхности. Ранее Gurnett [1966] сообщал, что из 140 случаев, наблюдаемых на спутнике АХ, только два сопровождалась одновременным появлением АХ на Земле. Одна из возможных моделей распространения АХ от области генерации до земной поверхности рассмотрена в работе [Sonwalkar and Harikumar, 2000]. Однако к настоящему времени не существует адекватной модели меха-

низма распространения АХ от места предполагаемой генерации до земной поверхности.

Изучение связи появления всплесков АХ с геомагнитными возмущениями проводилось многими исследователями, однако полученные результаты часто противоречивы. Так, в ранних работах [Jørgensen and Ungstrup, 1962] утверждалось, что появление АХ на земной поверхности не связано с геомагнитной активностью, и в авроральных широтах всплески АХ появляются равновероятно как в магнитовозмущенное, так и в магнитоспокойное время. Несколько позднее Harang and Larsen [1965], по данным на тех же геомагнитных широтах пришли к выводу, что всплески АХ типичны именно для геомагнитных возмущений. При этом при слабой и умеренной магнитной активности связь между этими явлениями положительная, а при сильной — отрицательная. Заметим, что известно, например, [Harang and Larsen, 1965; Распопов и Клейменова, 1977; Клейменова и др., 1968], что отсутствие всплесков ОНЧ во время больших геомагнитных возмущений является результатом поглощения ОНЧ-волн в ионосфере, так как в такое время резко возрастает риометрическое поглощение, вызванное усилением высыпавшихся в ионосферу потоков электронов.

По данным [Hayakawa et al., 1975; Tanaka et al., 1976; Makita, 1979] вероятность появления всплесков АХ в обс. Syowa ($\Phi = 70^\circ$) возрастает при увеличении значения Kp -индекса от 0 до 5, при этом появление импульсных всплесков АХ отмечается в фазу развития (expansion phase) магнитосферной суббури, когда полярные сияния наблюдаются в зените станции. В работе [Makita, 1979] сообщалось, что в большинстве случаев появление импульсных АХ в этой обсерватории сопровождалось возрастанием AE -индекса, в то время как появление непрерывного АХ не было связано с геомагнитной активностью. О связи околополуденных всплесков АХ с развитием отрицательной магнитной бухты сообщалось и в работе [Kokubun et al., 1972]. Однако в работе [Jørgensen, 1968] такой связи не было обнаружено. В то же время Harang and Larsen [1965] установили, что в вечернем секторе всплески АХ, как правило, сопровождались положительными, а не отрицательными магнитными возмущениями. Связь АХ с магнитными бурями, насколько нам известно, в литературе вообще не обсуждалась.

Целью данной работы является исследование особенностей геомагнитных возмущений во время появления всплесков АХ в авроральных широтах на финской ОНЧ-станции Каннуслехта (КАН), расположенной в 40 км к северо-западу от обс. Соданкюля. Подавляющее большинство предыдущих исследований АХ было основано на наблюдениях в высоких геомагнитных широтах вблизи полярной границы аврорального овала, в основ-

ном, на антарктической обс. Syowa (-70°) и обс. South Pole (-74°). Наши исследования основаны на более низкоширотных наблюдениях ($\sim 64^\circ$), т.е. в экваториальной области аврорального овала, где характеристики АХ могут значительно отличаться от характеристик более высокоширотных излучений. Следует отметить, что спутниковые измерения, например, [Gurnett, 1966; Ondoh et al., 1981] показали, что наиболее интенсивные АХ в полосе частот 5–30 кГц регистрируются над ионосферой на геомагнитных широтах порядка 65° – 75° , т.е. на более высоких широтах, чем КАН.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Наши исследования основаны на ОНЧ-наблюдениях на севере Финляндии в Каннуслехто (КАН, географические координаты: $\phi = 67.74^\circ$ N, $\lambda = 26.27^\circ$ E, исправленные геомагнитные: $\Phi = 64.2^\circ$; $\Lambda = 107.9^\circ$, $L \sim 5.5$) во время зимних кампаний 2013–2018 гг., поскольку именно зимой отмечается максимум появления АХ на земной поверхности, например, [Harang, 1968; Spasojevic, 2016]. Волны в диапазоне 0.2–39 кГц принимаются на две взаимно перпендикулярные рамочные антенны с эффективной площадью ~ 2300 м² каждая. Это позволяет определять горизонтальные углы прихода волн, но не их азимут (вектор Пойнтинга), так как нет вертикальной электрической антенны. Подробное описание измерительной аппаратуры с пороговой чувствительностью $\sim 10^{-14}$ нТл²/Гц приведено в работе [Manninen, 2005].

Анализ высокочувствительных ОНЧ-наблюдений в КАН показал, несмотря на то, что станция расположена в авроральных широтах, импульсные атмосферные помехи дальних грозových разрядов почти полностью экранируют ОНЧ-волны магнитосферных источников на частотах выше 5–6 кГц. Для подавления атмосферных помех был разработан и применен специальный метод цифровой фильтрации импульсов короче 20 мс. После фильтрации вычислялись часовые и одноминутные динамические спектры (спектрограммы) ОНЧ-излучений, которые в полосе частот 0–16 кГц выставляются на сайте обс. Соданкюля (<http://sgo.fi/DataArchive/VLFData/QuicklookPlots/>).

1. Для более детального анализа характеристик АХ были выбраны 10 зимних месяцев 2016–2018 гг. ОНЧ-наблюдений в КАН, во время которых не было никаких перерывов в записи (январь, ноябрь, декабрь 2016 г.; январь, февраль, март, декабрь 2017 г. и январь, февраль, март 2018 г.). Из этих 302 дней наблюдений всплески АХ отмечались в 132, т.е. в 44% всех дней. Близкий результат был получен и при наблюдении АХ на антарктической ст. South Pole (геомагнитная ши-

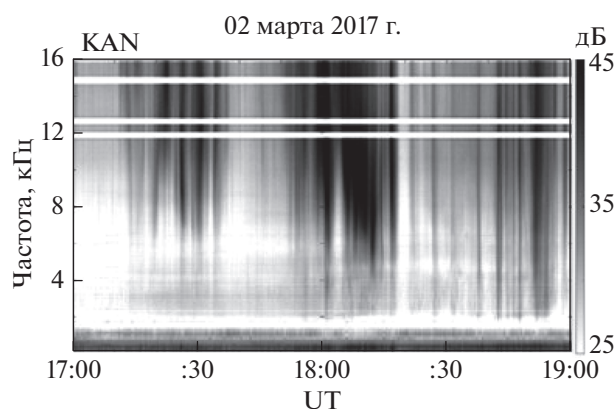


Рис. 1. Пример динамического спектра (спектрограммы) всплесков аврорального хисса (АХ). По вертикальной оси — относительная интенсивность излучений в дБ, 0 дБ соответствует 10^{-14} нТл²/Гц. Белые горизонтальные полосы — трассы сигналов навигационных СДВ-радиопередатчиков.

рота -74°) [Spasojevic, 2016]. Заметим, что на спутниках авроральный хисс регистрируется почти при каждом пересечении спутником авроральных широт в вечернее и ночное время [например, Gurnett, 1966, Barrington et al., 1971; Ondoh et al., 1981].

Динамические спектры АХ в КАН, показали, что в подавляющем большинстве случаев АХ представляет собой последовательность серий коротких (1–2 мин) импульсных всплесков шумовых излучений, чередующихся с более длительными (от 3 до 20 мин) всплесками. Часто наблюдается суперпозиция этих излучений. На рисунке 1 приведен пример 2 часовой спектрограммы АХ в черно-белом варианте. Первичные спектрограммы строятся в цветном изображении и поэтому имеют не только значительно большую наглядность, но и значительно большее разрешение.

Во многих работах, например, [Tanaka et al., 1976; Makita, 1979] и ряде др. всплески АХ разделялись на импульсные (короче 10 мин) и непрерывные (от 10 мин до часа и более). Эти результаты были получены по данным аналоговой регистрации на бумажных самописцах (chart records) в выделенных частотных полосах ОНЧ. Такой метод регистрации не позволял проводить детальный анализ динамических спектров волн. В противоположность этому, в КАН проводится цифровая регистрация ОНЧ-излучений, что позволяет получать спектрограммы волн с различным временным разрешением. Кроме того, современная регистрирующая аппаратура на 1–2 порядка выше по чувствительности. Анализ спектрограмм АХ в КАН в полосе 0–16 кГц показал, что спектры более коротких (1–2 мин) и более длинных (5–20 мин) всплесков АХ отличаются практически лишь своей длительностью. При

этом, если отдельные короткие всплески следуют друг за другом с интервалом одна минута и меньше, то создается картина длительного шумового излучения меняющейся интенсивности, напоминающая непрерывный хисс на аналоговой записи бумажных самописцев, поэтому при анализе всплесков АХ мы не разделяли их на импульсные и непрерывные.

Поляризационный анализ ОНЧ-наблюдений в КАН показал, что АХ всегда представляет собой право поляризованные волны. Такой же вывод был получен ранее во всех приведенных в литературе результатах наземных исследований. Это означает, что область выхода АХ из ионосферы всегда располагается не далее 300–400 км от наземного приемника.

В случаях, когда метеоусловия позволяли регистрацию полярных сияний, мы проводили сопоставление появления всплесков АХ в КАН с развитием полярных сияний по данным all-sky камер в скандинавских обсерваториях Соданкюля (SOD), Абиско (ABK) и Килписярви (KIL). Было установлено, что, как правило, всплески АХ в КАН сопровождаются развитием (уярчением) полярных сияний, но не в расположенной в ~ 40 км обс. SOD ($\Phi = 63.9^\circ$), а в более высоких широтах, в ABK ($\Phi = 65.3^\circ$) или KIL, ($\Phi = 65.9^\circ$), т.е. на расстоянии 250–300 км к северо-западу от КАН. Близкие результаты были получены и ранее в некоторых работах, например, [Nishino et al., 1982]. Но этот вопрос в данной работе не обсуждается и будет отдельно детально рассмотрен в будущем.

2. Суточный ход появления всплесков АХ в КАН был построен по данным перечисленных выше 10 месяцев зимних сеансов 2016–2018 гг. Было установлено, что всплески АХ, в основном, наблюдаются в интервале 17–23 UT, что соответствует 20–01 MLT, с максимумом в 21–23 MLT (рис. 2а), т.е. до локальной полуночи. На рисунке 2б приведена карта из работы [Jørgensen, 1966] наиболее частого появления АХ на нескольких высокоширотных станциях в разные часы местного магнитного времени. На эту схему мы нанесли данные, полученные в КАН (штриховая кривая). Видно их хорошее совпадение, особенно с данными Тромсе (Tr).

3. Рассмотрим геомагнитные условия, во время которых регистрировались всплески АХ в КАН. Прежде всего, было отмечено, что наиболее часто всплески АХ наблюдались в слабо и умеренно возмущенных условиях при значении индексов планетарной магнитной активности $Kp < 3$ и $Dst = 20 \pm 10$ нТл. Известно, что вероятность выхода ОНЧ-излучений к земной поверхности во многом определяется уровнем поглощения ОНЧ-волн при прохождении их через ионосферу. Степень поглощения ОНЧ-волн в ионосфере контролируется уровнем ионосферной возму-

щенности, показателем которой является величина риометрического поглощения. Наш анализ наблюдений показали, что ОНЧ-излучения в КАН не регистрируются при риометрическом поглощении больше 1.5–2.0 дБ, так как они поглощаются в ионосфере. Такой же вывод был получен и ранее при наземных ОНЧ-наблюдениях, например, [Harang and Larsen, 1965; Makita, 1979, Sazhin et al., 1993].

Из рассмотренных 132 событий АХ (дней, когда были зарегистрированы эти излучения) в 95 случаях (в 72% событий) всплески АХ наблюдались в подготовительную фазу суббури (growth phase), в 19 случаях (14%) – на фоне небольших знакопеременных геомагнитных возмущений и в 18 (14%) – в магнитоспокойное или очень слабо-возмущенное время при $Kp = 0-1$. Таким образом, подавляющее большинство всплесков АХ в КАН наблюдалось перед магнитосферной суббурей, начало которой (break-up сияний) мгновенно “прекращало” АХ за счет внезапного резкого возрастания риометрического поглощения, вызванного усиленным высыпанием суббуревых электронов.

Для исследования уровня геомагнитной возмущенности в долготном секторе КАН, были использованы локальные геомагнитные индексы IE , IL и IU , аналогичные планетарным индексам авроральной активности AE , AL и AU , но построенные по данным скандинавской сети магнитометров IMAGE [http://space.fmi.fi/image]. На рисунке 3 показано распределение значений IE и IU во время появления всплесков АХ. Видно, что подавляющее большинство событий наблюдалось в умеренно возмущенных условиях при $IE \sim 100-250$ нТл и IU меньше 50 нТл. В спокойных условиях при значениях $IE < 50$ нТл всплески АХ были зарегистрированы лишь в нескольких случаях.

В качестве примера рассмотрим событие 07 марта 2017 г. в интервале 17–19 UT, когда по данным [http://sgodata.sgo.fi/pub_rio] риометрическое поглощение на скандинавском меридиане было меньше 1 дБ. На рисунке 4 приведена спектрограмма АХ и значения индексов IL и IU , а также магнитограммы отдельных станций профиля IMAGE [http://space.fmi.fi/image]. Видно, что наиболее сильный всплеск АХ был зарегистрирован в интервале 17:30–17:40 UT при небольших значениях индекса локальной суббуревой активности ($IL \sim 200$ нТл) и развитии слабого (~ 120 нТл) бухтообразного возмущения в SOR, т.е. на расстоянии 350 км к северу от КАН при спокойных условиях в окрестности КАН. С увеличением геомагнитной возмущенности (до $IL \sim -600$ нТл) и появлением относительно большой (~ -550 нТл) суббури в BJN (71.4°), всплески АХ прекратились даже при отсутствии магнитных возмущений в SOD, расположенной в 40 км к юго-востоку от

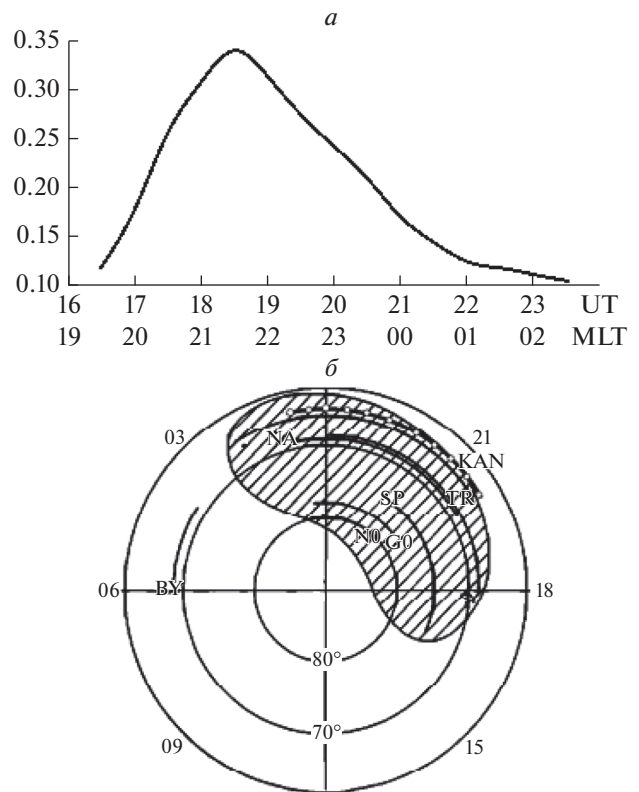


Рис. 2. Суточный ход появления всплесков аврорального хисса (АХ) в КАН в единицах, нормированных на число случаев – (а) и сопоставление пространственно-временного распределения появления АХ в КАН с данными других станций из работы Jørgensen [1966] – (б). Штриховая линия – суточный ход АХ в КАН.

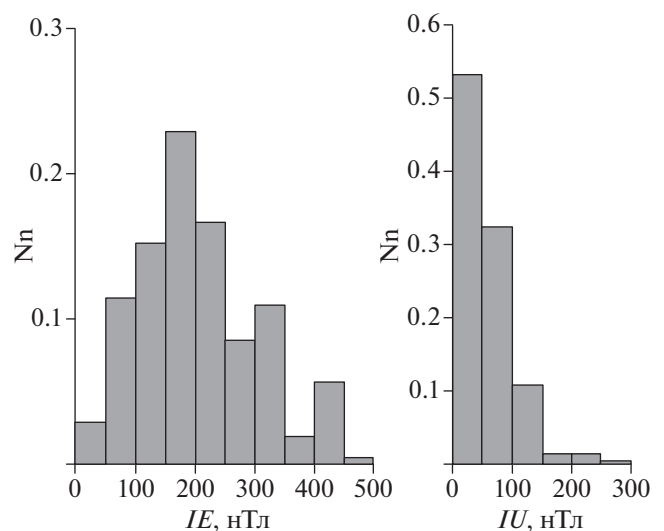


Рис. 3. Гистограммы распределения значений IE и IU – индексов локальной геомагнитной активности на скандинавском профиле IMAGE во время всплесков АХ в КАН. По вертикальной оси – относительные величины, нормированные на число случаев.

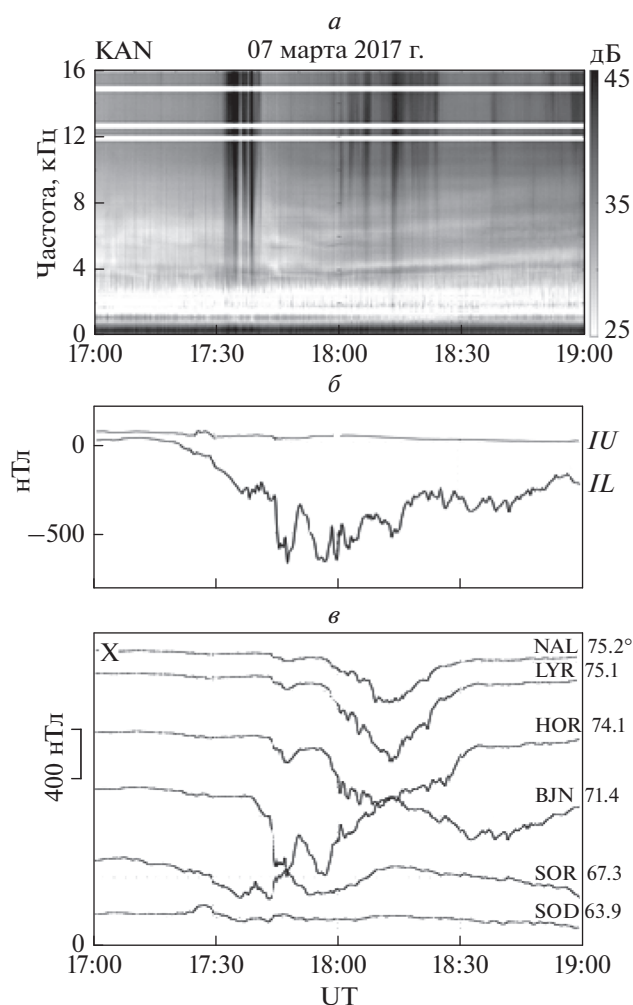


Рис. 4. ОНЧ-спектрограмма для события AX 07 марта 2017 — (а); I и L -индексы геомагнитной активности на профиле IMAGE — (б); магнитограммы отдельных станций профиля IMAGE [http://space.fmi.fi/image] — (в), международные коды и геомагнитные широты станций показаны справа.

КАН. Всплески AX возобновились около 18 UT после окончания суббури в BJN и перемещения геомагнитной активности в полярные широты (HOR-NAL). Таким образом, развитие магнитосферной суббури в BJN “выключило” AX даже при отсутствии значительного риометрического поглощения.

4. В зависимости от энергии высыпающихся электронов в высокоширотной магнитосфере выделяется несколько зон, положение которых в зависимости от уровня планетарной геомагнитной активности (индексы Dst и AL) может быть определено по модели [http://webapps.pgia.ru], основанной на статистическом анализе данных низкоорбитальных спутников DMSP F6, F7. Рассмотрим положение проекции КАН (рис. 5) во время события 07 марта 2017 г. в 17:35 UT и 18:10 UT. Основная зона (область 1) — это область дискрет-

ных высыпаний в авроральном овале (auroral oval precipitation — AOP), экваториальная граница которой совпадает с экваториальной границей овала дискретных полярных сияний. Экваториальнее этой зоны располагается диффузная авроральная зона (diffuse auroral zone — DAZ) более жестких высыпаний (область 2), совпадающая с областью диффузных полярных сияний. Вблизи полярной границы аврорального овала расположена зона 3 мягких диффузных высыпаний (soft diffuse precipitation — SDP).

Видно (рис. 5а), что во время первого интенсивного всплеска AX в 17:35 UT ст. КАН проектируется в зону 2 относительно жестких диффузных высыпаний. Во время второй более длительной серии менее интенсивных всплесков AX, когда планетарная авроральная геомагнитная активность возросла, AL -индекс изменился от -340 нТл (рис. 5а) до -590 нТл (рис. 5б), произошло некоторое расширение аврорального овала, и проекция КАН оказалась в зоне 1 (т.е. AOP). Заметим, что во втором случае локальная геомагнитная активность на скандинавском меридиане не увеличилась, а, наоборот, несколько уменьшилась, IL -индекс изменился от ~ -600 нТл до ~ -500 нТл (рис. 4б). Наблюдаемое возрастание планетарной активности (индекс AL) явилось результатом развития магнитных возмущений восточнее КАН, т.е. в предполуночном секторе Земли, что подтверждается магнитограммами авроральной обс. Диксон [http://www.geophys.aari.ru/], которые здесь не приводятся.

При анализе данных 10 месяцев ОНЧ-наблюдений в КАН была выявлена общая закономерность положения КАН относительно высокоширотных зон вторжений электронов. В типичных условиях появления всплесков AX ст. КАН находилась экваториальнее области авроральных высыпаний или вблизи ее границы. С увеличением магнитной активности авроральный овал расширялся, и ст. КАН оказывалась внутри овала (зона 1) ближе к его экваториальной границе. Таким образом, проекция КАН в слабо и умеренно возмущенных условиях находилась экваториальнее области типичного развития полярных сияний. Как было отмечено выше, анализ отдельных случаев показал, что во время всплесков AX полярные сияния наблюдаются на более высоких широтах. Такой же результат был получен ранее, например, в работе [Nishino et al., 1982].

5. Во время зимних сеансов ОНЧ-наблюдений 2013–2018 гг. было отмечено всего 12 магнитных бурь, из которых 7 бурь с минимумом $Dst \sim -(45-60)$ нТл, 3 бури с $Dst \sim -100$ нТл и только одна сильная буря с $Dst \sim -170$ нТл. Заметим, что анализируемый период приходится на фазу спада 24-го цикла солнечной активности, во время которой было значительно меньше магнитных бурь,

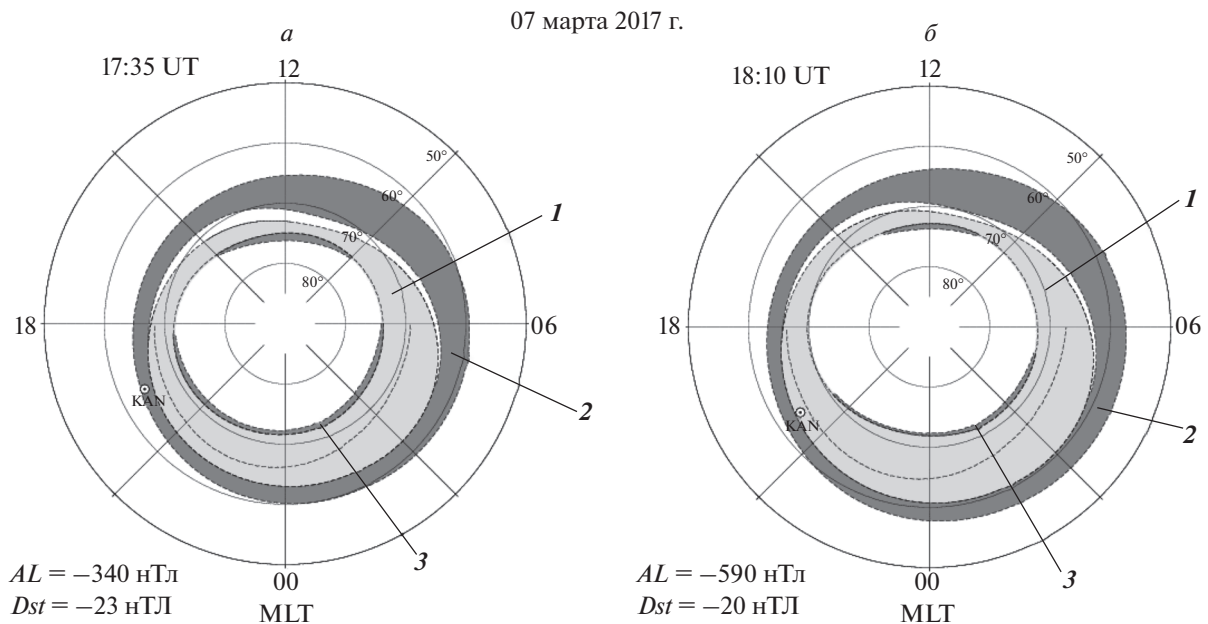


Рис. 5. Пример положения станции КАН относительно различных зон авроральных высыпаний по модели [http://webapps.pgia.ru], основанной на значениях планетарных индексов геомагнитной активности Dst и AL (приведены в левом нижнем углу каждого графика): 1 – зона дискретных высыпаний аврорального овала (АОР), 2 – зона диффузного, более жесткого высыпания (DAZ), 3 – зона мягких диффузных высыпаний (SDP).

чем в такой же фазе предшествующего 23-го цикла. Анализ наземных наблюдений в КАН показал, что в главную фазу всех этих бурь, даже в случае риометрического поглощения меньше 1.5 дБ, всплесков АХ, как правило, не наблюдалось. Можно предположить, что это является результатом перемещения области генерации АХ в более низкие широты во время больших геомагнитных возмущений. В ранних работах например, Клейменова и др., [1968] сообщалось о наблюдениях АХ в главную фазу бури в субавроральных широтах (ст. Согра). К сожалению, в настоящее время регистрация ОНЧ-излучений на скандинавском меридиане на таких широтах не проводится.

Однако было установлено, что всплески АХ регистрировались в восстановительную фазу всех рассмотренных бурь. На рисунке 6 приведены вариации Dst -индекса во время двух магнитных бурь. Вертикальными стрелками показаны моменты всплесков АХ. Видно отсутствие всплесков АХ в главную фазу магнитных бурь и их появление в восстановительную фазу. При этом обычно всплески АХ наблюдались перед суббурей и резко прекращались с началом суббури и break-up полярных сияний.

6. В наших ранних работах например, [Troitskaia and Kleimenova, 1972; Распопов и Клейменова, 1977; Kleimenova et al., 1978] было замечено, что всплески АХ часто сопровождаются возбуждением геомагнитных пульсаций $Pi2$, типичных для развития суббури [Rostoker, 1968]. Сопоставление наблюдений всплесков АХ в КАН и данных

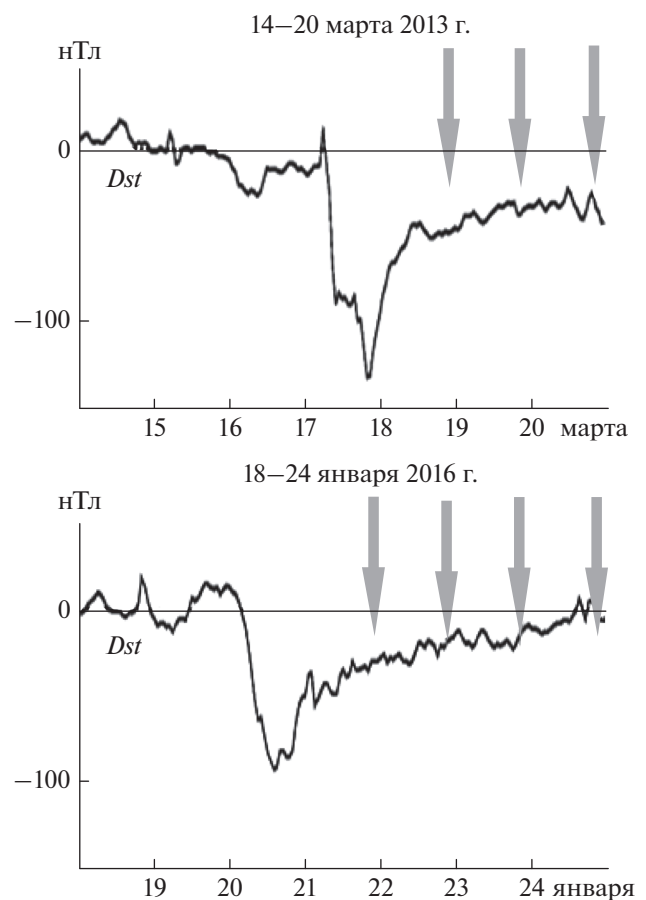


Рис. 6. Пример появления всплесков АХ (показаны вертикальными стрелками) во время двух магнитных бурь (вариации Dst -индекса).

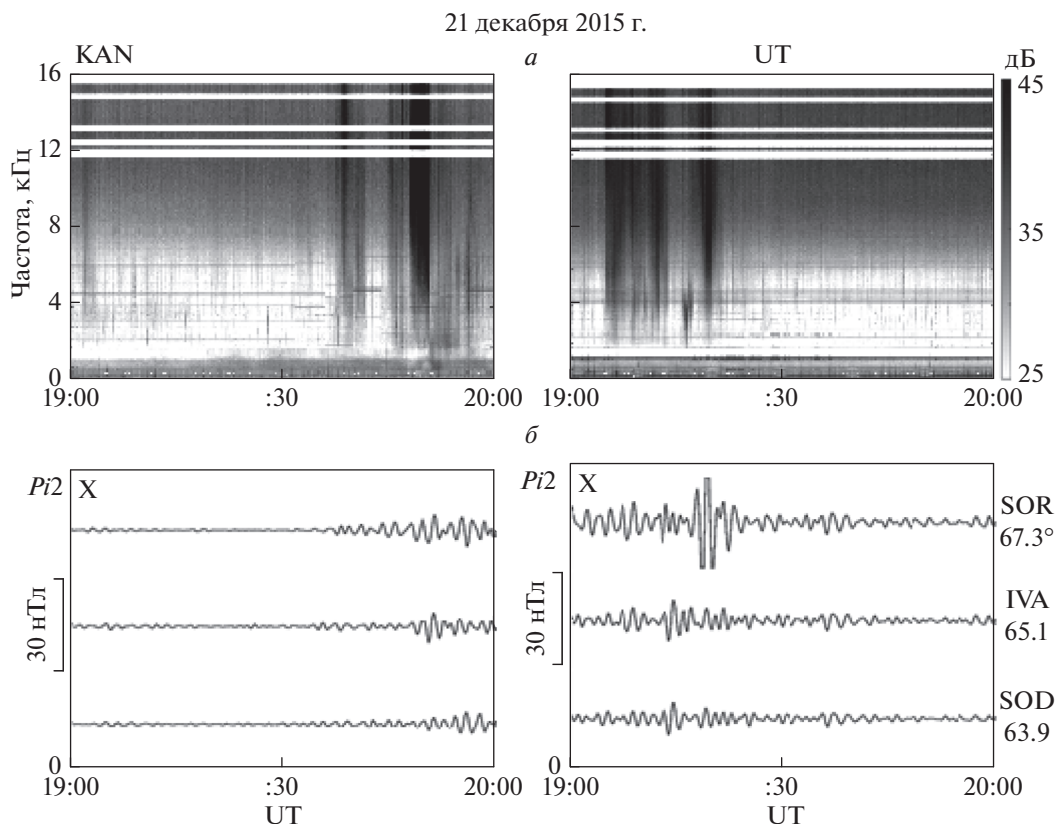


Рис. 7. Примеры геомагнитных пульсаций диапазона $Pi2$ (8–20 мГц) на профиле IMAGE во время всплесков аврорального хисса в КАН.

магнитных измерений на профиле IMAGE, отфильтрованных в полосе частот $Pi2$ (8–20 мГц), подтвердило, что эти ОНЧ-излучения и $Pi2$ -пульсации в подготовительную фазу магнитосферной суббури обычно наблюдаются одновременно. При этом начало серий всплесков АХ и геомагнитных пульсаций $Pi2$ практически совпадает, но четкой корреляции между отдельными всплесками АХ и $Pi2$ -пульсаций, как правило, не наблюдается. Не отмечено и линейной связи между интенсивностью всплесков АХ и амплитудой геомагнитных пульсаций. Амплитуда $Pi2$ -пульсаций больше на станциях, расположенных южнее КАН. Можно предположить, что АХ и $Pi2$ имеют общий источник, связанный с вторжением авроральных электронов, но разные механизмы генерации. На рисунке 7 приведен пример одновременной регистрации ОНЧ-излучений и геомагнитных пульсаций на нескольких станциях профиля IMAGE (коды станций и их геомагнитные широты показаны справа).

3. ОБСУЖДЕНИЕ

Итак, всплески АХ наблюдаются в авроральных широтах в вечерне-ночном секторе, т.е. в об-

ласти, соответствующей движущемуся к западу изгибу полярных сияний (westward traveling surge), где усиливаются вытекающие продольные токи, носителями которых являются потоки высыпающихся авроральных электронов с энергией 0.1–10 кэВ. Общепринято, что генерация АХ связана с черенковской неустойчивостью таких электронов на высотах ~5–20 тыс. км над ионосферой например, [Maggs, 1976; Sazhin et al., 1993], и др.

Вероятность появления ОНЧ-излучений на земной поверхности контролируется уровнем риометрического поглощения, которое возрастает с увеличением геомагнитной активности. Таким образом, становится понятным, почему всплески АХ наблюдаются в КАН только при слабой и умеренной геомагнитной планетарной ($Kp < 3$) и локальной ($IE \sim 100\text{--}250$ нТл) активности и отсутствуют в главную фазу магнитной бури.

Заметим, что, как сказано в разделе Введение, АХ наблюдается на спутниках над ионосферой практически при каждом пересечении спутником авроральных широт в вечернее и ночное время. Это значит, что АХ является типичным явлением авроральной магнитосферы в ночном секторе Земли. Однако к земной поверхности эти излучения могут выйти только при определенных условиях.

Можно предположить, что отдельные, локализованные в пространстве и времени более интенсивные потоки высыпавшихся электронов могут привести к генерации отдельных, более интенсивных всплесков АХ, длительность которых определяется длительностью соответствующих электронных потоков. Хаотическое появление отдельных всплесков АХ на земной поверхности может быть индикатором хаотичного появления таких потоков.

4. ВЫВОДЫ

Выполнен анализ ОНЧ-излучений типа “авроральный хисс” (АХ) по данным наблюдений в северной Финляндии на ст. Каннуслахто (КАН, $L \sim 5.5$) в 2013–2018 гг. Эти излучения представляют собой ночные шумовые всплески длительностью несколько минут в полосе частот от 3–6 кГц до 40 кГц и более с максимумом интенсивности на частоте 10 кГц. Такие всплески АХ наблюдались 132 дня из проанализированных 302 дней.

Установлено, что всплески АХ в КАН регистрируются при слабой и умеренной планетарной геомагнитной активности ($Kp < 3$) и индексе локальной геомагнитной активности $IE \sim 100$ –250 нТл.

Анализ данных показал, что всплески АХ типичны (более 70% случаев) для подготовительной фазы (growth phase) магнитосферной суббури. Начало суббури (break-up сияний) “выключает” всплески АХ, что, по-видимому, связано с быстрым возрастанием поглощения ОНЧ-волн в ионосфере, вызванным вторжением авроральных электронов.

Показано, что в главную фазу магнитной бури всплесков АХ, как правило, не наблюдается, но они появляются в фазу восстановления каждой бури, когда геомагнитная активность затухает.

Исследовано положение проекции КАН во время появления всплесков АХ относительно высокоширотных зон вторжений авроральных электронов по модели [http://webapps.pgia.ru]. Установлено, что в типичных условиях появления всплесков АХ на ст. КАН проектируется в экваториальную область аврорального овала или в зону диффузного высыпания более жестких электронов вблизи границы овала. С увеличением магнитной активности авроральный овал расширяется, и станция КАН оказывается внутри аврорального овала, но в более низких широтах, чем типичное положение полярных сияний в это время.

5. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной поддержке Финской академии наук грант № 287988 и ча-

стичной поддержке Программы Президиума РАН № 28.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вершинин Е.Ф., Горшков Ю.Н., Пономарев Е.А. Геофизические условия появления всплесков ОНЧ излучений аврорального класса // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Вып. 30. С. 19–32. 1974.
- Клейменова Н.Г., Троицкая В.А., Виньерон Ж. Связь среднеширотных ОНЧ с магнитной активностью // Геомагнетизм и аэронаука. Т. 8. № 3. С. 529–533. 1968.
- Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 3. ОНЧ излучения. Л. ЛГУ. 145 с. 1977.
- Barrington R.E., Hartz T.R., Harvey R.W. Diurnal distribution of ELF, VLF and LF noise at high latitudes as observed by Alouette 2 // J. Geophys. Res. V. 76. P. 5278–5291. 1971.
- Brice N.M., Smith R.L. Lower hybrid resonance emissions // J. Geophys. Res. V. 70. № 1. P. 71–78. 1965.
- Burton E.T., Boardman E.M. Audio-frequency atmospheric // Proc. IRE. V. 21. № 10. P. 1476–1496. 1933.
- Ellis G.R. Low frequency radio emissions from auroras // J. Atmos. Terr. Phys. V. 10. P. 302–306. 1957.
- Gurnett D.A. A satellite study of VLF hiss // J. Geophys. Res. V. 71. P. 5599–5615. 1966.
- Gurnett D.A., Frank L. A. VLF hiss and related plasma observations in the polar magnetosphere // J. Geophys. Res. V. 77. P. 172–190. 1972. doi 10.1029/JA077i001p00172
- 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. doi 10.1016/0021-9169(65)90013-9
- Harang L. VLF emissions observed at stations close to the auroral zone and at stations on lower latitudes // J. Atmos. Terr. Phys. V. 30. № 6. P. 1143–1160. 1968.
- Harang L. Radio noise from aurora // Planet. Space. Sci. V. 30. № 7. P. 869–877. 1969.
- Haykawa 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.
- Helliwell R.A. Whistler and related ionospheric phenomena. Stanford. Stanford Univ. Press. 349 p. 1965.
- Hoffman R.A., Laaspere T. Comparison of very-low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from twoOGO 4 experiments // J. Geophys. Res. V. 77. P. 640–650. 1972. doi 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., Ungstrup E. Direct observation of correlation between auroras and hiss in Greenland // Nature. V. 194. P. 462–463. 1962.
- Jørgensen T.S. Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events // J. Geophys. Res. V. 71. P. 1367–1375. 1966. doi 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.
- *Kleimenova N.G., Golikov Yu.V., Korotova G.I., Titova E.E.* The relationship between auroral hiss, Pi2 geomagnetic pulsations and aurora // *J. Geomagn. Geoelectr.* V. 30. P. 363–364. 1978.
- *Kokubun S., Makita K., Hirasawa T.* VLF-LF hiss during polar substorm // *Geophys. Res. Lett.* V. 26. P. 138–41. 1972.
- *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. doi 10.1029/JA081i004p00524
- *LaBelle J., Treumann R.* Auroral radio emissions, 1. Hisses, roars, and bursts // *Space Sci. Rev.* V. 101. № 3. P. 295–440. 2002.
- *Maggs J.E.* Coherent generation of VLF hiss // *J. Geophys. Res.* V. 81. P. 1707–1724. 1976.
- *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 ELFVLF emissions in geophysical research, Sodankylä Geophysical Observatory Publications. № 98. 177 p. Oulu: Oulu Univ. Press. 2005. [<http://www.sgo.fi/Publications/SGO/thesis/Manninen-Jyrki.pdf>].
- *Martin L.H., Helliwell R.A., Marks K.R.* Association between aurora and very low-frequency hiss observed at Byrd Station, Antarctica // *Nature* V. 187. P. 751–753. 1960.
- *McEwen D.J., Barrington R.E.* Some characteristics of the lower hybrid resonance noise bands observed by Alouette-1 satellite // *Can. J. Phys.* V. 45. № 1. P. 13–19. 1967.
- *Morozumi H.M.* Diurnal variation of auroral zone geophysical disturbances // *Rep. Ionos. Space Res. Japan.* V. 19. P. 286–298. 1965.
- *Nishino M., Tanaka Y., Iwai A., Kamada T.* Comparison between the arrival direction of auroral hiss and the location of aurora observed at Syowa station // *Mem. Nat. Inst. Polar Res.* № 22. P. 35–45. 1982.
- *Ondoh N., Nakamura Y., Murasami T.* Characteristics of VLF saucers and auroral hisses from ISIS satellites received at Syowa station, Antarctica // *Mem. Nat. Inst. Polar Res.* № 18. P. 54–71. 1981.
- *Rostoker G.* Macrostructure of geomagnetic bays // *J. Geophys. Res.* V. 73. № 13. P. 4217–4229. 1968.
- *Sato M., Hayakawa M., Fukunishi H.* Conjugacy of ELF-VLF emissions near L = 6 // *J. Atmos. Terr. Phys.* V. 42. № 11–12. P. 911–928. 1980.
- *Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M.* Auroral hiss: a review // *Planet. Space Sci.* V. 41. P. 153–166. 1993.
- *Srivastava R.N.* Propagation of VLF emissions in the magnetosphere and ionosphere // *Planet. Space Sci.* V. 22. P. 1545–1564. 1974.
- *Srivastava, R.N.* VLF hiss, visual aurora and the geomagnetic activity // *Planet. Space Sci.* V. 24. P. 375–379. 1976. doi 10.1016/0032-0633(76)90050-7
- *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. doi 10.1029/1999JA000302
- *Spasojevic M.* Statistics of auroral hiss and relationship to auroral boundaries and upward current regions // *J. Geophys. Res. Space.* V. 121. P. 7547–7560. 2016. doi 10.1002/2016JA022851
- *Tanaka Y., Hayakawa M., Nishino M.* Study of VLF auroral hiss observed at Syowa Station, Antarctica // *Mem. Nat. Inst. Polar Res.* V. 13. P. 1–58. 1976.
- *Troitskaya V.A., Kleimenova N.G.* Micropulsations and VLF emissions during substorms // *Planet. Space Sci.* V. 20. № 9. P. 1499–1519. 1972.
- *Ungstrup E.* Association between VLF emissions and flickering aurora // *J. Geophys. Res.* V. 71. P. 2395–2396. 1966.