

---

**АНАЛИЗ СОБЫТИЙ ОДНОВРЕМЕННОЙ НАЗЕМНОЙ РЕГИСТРАЦИИ  
ВСПЛЕСКОВ АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ  
И ВОЗРАСТАНИЯ РИОМЕТРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ**

**ANALYZING EVENTS OF SIMULTANEOUS GROUND-BASED REGISTRATION  
OF AURORAL HISS BURSTS  
AND RIOMETRIC ABSORPTION INCREASE**

---

**А.С. Никитенко** *Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com***О.М. Лебедь** *Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, olga.m.lebed@gmail.com***А.В. Ларченко** *Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, alexey.larchenko@gmail.com***Ю.В. Федоренко** *Полярный геофизический институт,  
Апатиты, Россия, yury.fedorenko@gmail.com***A.S. Nikitenko***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, alex.nikitenko91@gmail.com***O.M. Lebed***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, olga.m.lebed@gmail.com***A.V. Larchenko***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, alexey.larchenko@gmail.com***Yu.V. Fedorenko***Polar Geophysical Institute,  
Apatity, Russia, yury.fedorenko@gmail.com*

**Аннотация.** В работе представлены результаты анализа девяти событий одновременной наземной регистрации всплесков авроральных шипений в обсерватории «Ловозеро» и возрастных поглощения космического радишума (риометрического поглощения) в обсерваториях «Ловозеро» и «Туманный», расположенных на Кольском п-ове. Положение области повышенного поглощения мы оценивали по результатам риометрических наблюдений в этих обсерваториях и снимкам all-sky-камер в обсерватории «Ловозеро» и в близлежащих точках. Положение области приема авроральных шипений определялось по измерениям азимутального угла вектора Пойнтинга и поляризации магнитного поля шипений. Обнаружено, что для каждого рассматриваемого события область приема авроральных шипений и область повышенного риометрического поглощения находятся на разных широтах. Это может объяснить случаи одновременных наземных наблюдений рассматриваемых явлений, хотя обычно авроральные шипения исчезают при существенном повышении риометрического поглощения.

**Ключевые слова:** авроральные шипения, ионосфера, поглощение космического радишума.

**Abstract.** The paper presents the results of the analysis of nine simultaneous ground-based detection events of auroral hiss bursts at the Lovozero Observatory and cosmic radio noise absorption (riometric absorption) at the Lovozero and Tumanny observatories located on the Kola Peninsula. We have estimated the position of the area of increased absorption, using the results of riometric observations at these observatories and images from all-sky cameras in the Lovozero Observatory and nearby locations. The position of the area “illuminated” by auroral hisses was determined by measuring the azimuthal angle of the Poynting vector and the polarization of the magnetic field of the hisses. It has been found that for each event considered the area of illumination and the area of increased riometric absorption are located at different latitudes. This may explain the cases of simultaneous ground-based observations of the two phenomena in question, although auroral hisses usually disappear with a significant increase in riometric absorption.

**Keywords:** auroral hiss, ionosphere, cosmic noise absorption.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Генерация электромагнитного излучения в магнитосфере Земли представляет собой типичное проявление космической погоды. Примером такого излучения являются авроральные шипения (авроральный хисс, от англ. *hiss*) — шумовые электромагнитные волны [Sazhin et al., 1993; LaBelle, Treumann, 2002]. Шипения регистрируются в частотном диапазоне от единиц до нескольких сотен килогерц и харак-

теризуются отсутствием выраженной частотно-временной структуры на спектрограммах. Максимум интенсивности шипений находится на частотах 8–10 кГц очень низкочастотного диапазона (ОНЧ, 3–30 кГц).

Авроральные шипения распространяются в плазме в свистовом режиме. Их генерация обусловлена взаимодействием потока электронов с энергиями ниже 10 кэВ с плазмой, что приводит к развитию черен-

ковской неустойчивости [Sazhin et al., 1993; Makita, 1979; Maggs, 1976]. Авроральные хиссы являются важным индикатором взаимодействий волна–частица в магнитосфере, играющих особую роль в динамике околоземной плазмы [Makita, 1979; Spasojević, 2016; Клейменова и др., 2019]. Согласно исследованиям [Клейменова и др., 2019], генерация авроральных шипений в экваториальной части аврорального овала наиболее интенсивна на фазе роста магнитосферной суббури. Однако при наступлении брейккапа полярных сияний наблюдается резкое прекращение всплесков шипений, что, по мнению в Клейменова и др. [2019], связано с внезапным увеличением поглощения ОНЧ-волн в ионосфере.

Авроральные шипения относятся к типам излучения, наиболее часто регистрируемым у земной поверхности в высоких широтах. Их выход к Земле происходит за счет рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации в ионосфере [Sonwalkar, Harikumar, 2000].

Пространственное распределение поля шипений у земной поверхности характеризуется выраженной локальностью [Harang, Larsen, 1965; Jørgensen, 1966; Srivastava, 1976; Makita, 1979]. Наблюдения в обсерваториях «Тромсё» (испр. геом. широта  $\Phi \sim 70^\circ$ ) и «Кируна» ( $\Phi \sim 65^\circ$ ), расположенных на расстоянии  $\sim 250$  км друг от друга, выявили существенные различия между интенсивностью всплесков шипений в этих пунктах [Harang, Larsen, 1965]. Сосредоточение интенсивности авроральных шипений в локальной области у земной поверхности было обнаружено также авторами работ [Jørgensen, 1966; Srivastava, 1976] по данным наземных наблюдений на 13 станциях. В наших предыдущих работах [Никитенко и др., 2022, 2023] было установлено, что область засветки (термин, введенный нами для обозначения зоны приема шипений у земной поверхности) может иметь как небольшие размеры ( $< 400$  км), так и быть протяженной по долготе.

Наблюдения показывают, что положение области засветки связано с положением сопровождающих авроральные шипения полярных сияний [Makita, 1979], однако область засветки смещена относительно области сияний к более низким широтам. Это объясняется особенностями распространения излучения вне плазменных неоднородностей, вытянутых вдоль геомагнитных силовых линий (так называемых дактов) [Helliwell, 1965]. Данный эффект был дополнительно подтвержден исследованиями [Ozaki et al., 2008] при анализе наземных наблюдений авроральных шипений в разнесенных точках в Антарктиде.

Авроральные шипения регистрируются у земной поверхности значительно реже, чем на спутниковых высотах [Gurnett, 1966; Hughes et al., 1971]. Одной из ключевых причин этого может быть усиление поглощения ОНЧ-волн в ионосфере. В нашем исследовании [Никитенко и др., 2025] была проведена количественная оценка влияния риометрического поглощения (поглощения космического радиопшума) на условия проникновения шипений к земной поверхности с использованием модели их распространения [Лебедь и др., 2019]. Результаты показали, что

при прохождении через невозмущенную ионосферу мощность шипений у земной поверхности оказывается на 13 дБ ниже, чем на высоте 800 км. Увеличение риометрического поглощения до 0.6 дБ приводит к дополнительному ослаблению сигнала на 45–50 дБ, в результате чего мощность всплесков становится сопоставимой с уровнем собственных шумов волновода Земля–ионосфера. При достижении уровня поглощения 2.2 дБ наблюдается ослабление сигнала на 80 дБ, что фактически исключает возможность детектирования этого излучения у земной поверхности.

Хотя авроральные шипения не достигают земной поверхности при риометрическом поглощении выше 0.6 дБ, экспериментально наблюдается корреляция между их всплесками и изменениями поглощения [Harang, Larsen, 1965; Jørgensen, 1966]. Как показано в работе [Jørgensen, 1966], такая корреляция характерна для низких уровней поглощения, тогда как при значительном усилении поглощения регистрация шипений прекращается.

Во время наблюдений с 1 сентября по 31 декабря 2023 г. в обсерваториях «Ловозеро» и «Туманный» (Кольский п-ов) было обнаружено девять событий одновременной регистрации всплесков авроральных шипений и усиления риометрического поглощения. В настоящей работе с целью объяснения наблюдаемого явления представлены результаты сопоставления положения области повышенного риометрического поглощения и области засветки авроральных шипений по данным наблюдений на этих станциях.

Работа структурирована следующим образом: в разделе 1 приведено описание аппаратуры, методов подавления помех и обработки данных; раздел 2 содержит характеристику событий совместной регистрации шипений и усиления риометрического поглощения и их интерпретацию; в разделе 3 представлен анализ пространственного несоответствия зон поглощения и регистрации шипений, объясняемого механизмами рассеяния в наклонной геомагнитной структуре; в заключении обобщены ключевые результаты исследования, сформулированы основные выводы о механизмах распространения авроральных шипений и их связи с риометрическим поглощением, а также намечены перспективы дальнейших исследований.

## 1. НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

В работе используются данные наблюдений электромагнитного поля авроральных шипений в обсерватории «Ловозеро» (LOZ, геогр. к-ты  $67.97^\circ$  N,  $35.02^\circ$  E), уровня поглощения космического радиопшума в обсерваториях «Ловозеро» и «Туманный» (TUM,  $69.07^\circ$  N,  $35.73^\circ$  E), а также данные all-sky-камер в обсерваториях «Верхнетуломский» (VTU,  $68.36^\circ$  N,  $31.47^\circ$  E) и «Ловозеро». На рис. 1 представлено положение точек наблюдений.

### Аппаратура

Для регистрации электромагнитного поля авроральных шипений используется приемник, измеряю-

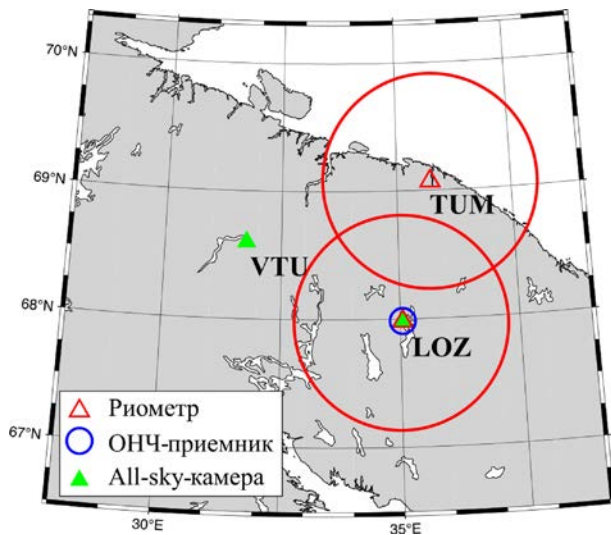


Рис. 1. Положение пунктов наблюдений. Красные окружности обозначают зоны приема антенн риометров

ший две горизонтальные компоненты магнитного поля и вертикальную компоненту электрического поля [Пильгаев и др., 2021]. С использованием этих трех компонент определяются форма и ориентация эллипса поляризации магнитного поля, а также величина и направление вектора Пойнтинга, необходимые для анализа положения области засветки авроральных шипений [Tsuruda, Ikeda, 1979, Рытов, 1966]. Измерения ведутся с точной привязкой к мировому времени [Пильгаев и др., 2021] в ОНЧ-диапазоне частот от 300 Гц до 15 кГц.

Измерения уровня поглощения космического радишума ведутся с помощью риометра, разработанного и изготовленного в Полярном геофизическом институте. Риометр регистрирует поглощение космического радишума в узком диапазоне углов относительно зенита. Прием сигнала осуществляется фазированной антенной решеткой 2×2, состоящей из трехэлементных антенн типа «волновой канал», которая на уровне −3 дБ имеет узкую диаграмму направленности — около 44°, благодаря чему обеспечивается ослабление помех от наземных источников на 15–20 дБ по сравнению с антенной с широкой диаграммой направленности. Регистрация поглощения космического радишума ведется в полосе частот от 37.5 до 39.5 МГц, что позволяет подавить узкополосные помехи за счет их распознавания и исключения из обработки. Значения риометрического поглощения получены вычитанием из данных кривой суточного хода поглощения космического шума в спокойных геомагнитных условиях.

Разработанные риометры обладают высоким пространственным разрешением. На рис. 1 приведены зоны приема антенн риометров, обозначенные красными окружностями с центрами в точках LOZ и TUM. Если представить источник радиосигнала в виде полусферы с постоянной яркостью каждой ее точки, то можно выделить область, в пределах которой будет сосредоточена та или иная часть мощности, принимаемой антенной риометра от всей светящейся полусферы. Зону приема мы определяем на высоте 90 км, где происходит максимальное поглощение космического радишума [Hargreaves, 1969]. В дан-

ном случае зона приема — это область, в которой принимаемая антенной мощность составляет 90 % всей принимаемой мощности, т. е. если в зоне приема возникает поглощение 3 дБ, а вне зоны приема ничего не изменится, риометр покажет поглощение 2.7 дБ.

### Подавление помех

Данные наземных наблюдений электромагнитного поля в диапазоне частот ниже 15 кГц сильно зашумлены разного рода помехами, в основном импульсными сигналами атмосфериков — электромагнитных сигналов, возбуждаемых в результате разряда молнии. Согласно нашим наблюдениям, время регистрации атмосфериков может занимать до 30–40 % часового интервала наблюдений. Другой тип помехи — гармоники узкополосных сигналов сети 50 Гц и передатчика «Зевс». Для анализа авроральных шипений мы проводим подавление этих сигналов в записях компонент поля.

Алгоритм детектирования атмосфериков основан на анализе огибающей горизонтальной компоненты магнитного поля  $H_t$  [Manninen et al., 2021]. Детектирование импульсов осуществляется посредством идентификации сигналов, амплитуда которых превышает установленный пороговый уровень  $H_{tr}$ . Границы импульса определяются по точкам изменения знака производной огибающей. Если значения огибающей в точках, где определены границы, превышают порог, то фрагмент расценивается как последовательность импульсов. В этом случае итеративно производится расширение границ до ближайших точек перехода через порог  $H_{tr}$ . Выделенные импульсы (или их последовательности) исключаются из всех трех компонент поля. Образовавшиеся пропуски заполняются методом линейной интерполяции.

Пороговый уровень  $H_{tr}$  устанавливается адаптивно по формуле  $H_{tr} = 2.45 \sigma_{орт}$ , где  $\sigma_{орт}$  представляет собой квантиль порядка 0.25 распределения  $H_t$ , что позволяет сохранить мощные всплески шипений. Квантили вычисляются на коротких временных интервалах разбиения огибающей  $H_t$ . На рис. 2, а, в показаны временная зависимость квантилей распределения  $p(H_t)$  и отношение сигнал/шум для различных порядков квантилей, рассчитанные для наблюдений в LOZ 30.11.2023 (17:06:40–17:18:20 UT). Сигнал определялся как среднеквадратическое отклонение значений огибающей между красными штриховыми линиями (см. рис. 2, в), шум — как среднеквадратическое отклонение значений слева от черной штриховой линии. Анализ показывает, что всплески хисса четко выделяются при квантилях менее 0.5 и оптимальное отношение сигнал/шум достигается при квантиле 0.25. На рис. 2, б, г представлены спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля до и после подавления атмосфериков, демонстрирующие, что исходный всплеск шипений полностью маскировался атмосфериками.

Для подавления помех сети 50 Гц и передатчика «Зевс» на спектре записей компонент поля вырезаются гармоники в пределах их полосы. Полученные сегменты заполняются комплексным белым дельта-коррелированным гауссовым шумом, ковариационная

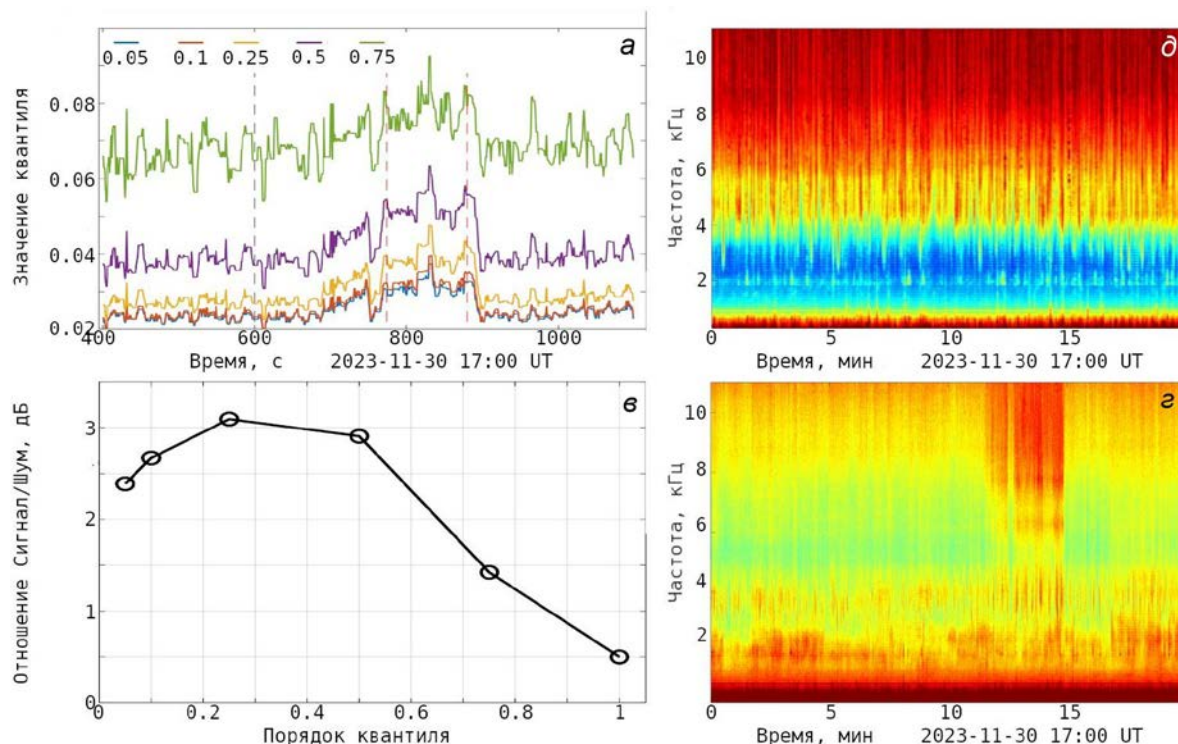


Рис. 2. Временная зависимость квантилей распределения  $p(H_z)$  (а), отношение сигнал/шум для различных порядков квантилей (б), спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля до (б) и после (з) подавления атмосферных поглощений, рассчитанные для наблюдений в 17:00–17:20 UT 30.11.2023 в LOZ

матрица [Рытов, 1966] которого соответствует средней матрице, вычисленной из спектров по краям вырезанного фрагмента.

### Оценка положения области засветки авроральных шипений

Для определения пространственного положения области засветки авроральных шипений применяется анализ двух ключевых параметров: поляризации и направления прихода излучения.

Поляризация регистрируемого излучения широко используется для оценки расстояния до центра засвеченной области [Tsuruda et al., 1982; Machida, Tsuruda, 1984; Yearby, Smith, 1994; Titova et al., 2015; Manninen et al., 2018, 2021]. Согласно теории распространения электромагнитных волн, в ионосферной плазме в ОНЧ-диапазоне могут распространяться только волны с правой круговой поляризацией (относительно направления геомагнитного поля) [Stix, 1992]. В правополяризованной волне вектор магнитного поля вращается в плоскости поперек направления распространения волны в том же направлении, что и электрон в геомагнитном поле [Stix, 1992]. Из ионосферы к земной поверхности выходят правополяризованные волны, поэтому в окрестности центра области засветки наблюдается излучение с правой поляризацией [Никитенко и др., 2022; Yearby, Smith 1994; Manninen et al., 2018, 2021]. Левополяризованное излучение регистрируется на удалении от центра области засветки вследствие отражения волн от верхней анизотропной стенки волновода Земля–ионосфера и доминирования отраженной

волны над прямой [Xu et al., 2019; Никитенко и др., 2022].

Для количественной оценки поляризации излучений мы используем индекс круговой поляризации  $P_c$  [Рытов, 1966], который принимает значения от  $-1$  до  $1$ : при  $P_c > 0$  поляризация волны правая, при  $P_c < 0$  — левая, при  $P_c = 0$  — линейная. Если  $|P_c| = 1$ , то поляризация круговая.

Для оценки направления прихода волн в точку наблюдений мы используем обратный азимут вектора Пойнтинга — угол, который составляет вектор, обратный вектору Пойнтинга, с направлением на север [Никитенко и др., 2022; Manninen et al., 2021].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

С 1 сентября по 31 декабря 2023 г. было зарегистрировано девять событий одновременных всплесков авроральных шипений и усиления риометрического поглощения (рис. 3): 10 декабря, 18:00–18:20 UT (1); 5 декабря, 19:50–20:10 UT (2); 13 декабря, 22:40–23:00 UT (3); 22 ноября, 18:10–18:30 UT (4); 5 декабря, 19:10–19:30 UT (5); 26 октября, 19:10–19:30 UT (6); 9 ноября, 17:10–17:30 UT (7); 21 декабря, 00:00–00:20 UT (8); 22 ноября, 15:00–15:20 UT (9). На рис. 3 приведены спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля для этих событий с нанесенными на них вариациями риометрического поглощения в LOZ и TUM. В рассматриваемых случаях уровень риометрического поглощения варьирует от 0.25 до 1–1.2 дБ, при которых наземная регистрация шипений невозможна [Никитенко и др., 2025].

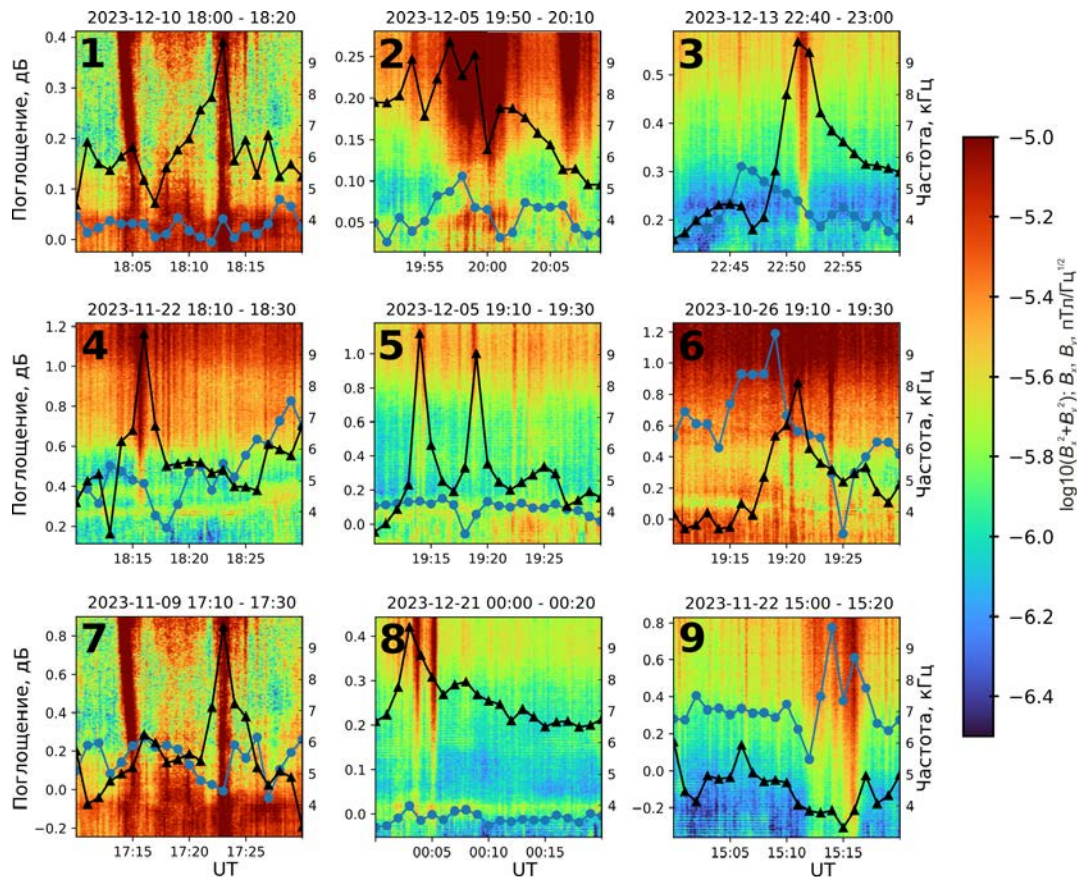


Рис. 3. Спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля для событий одновременной регистрации всплесков авроральных шипений и повышения риометрического поглощения с нанесенными на них вариациями риометрического поглощения в LOZ (синяя кривая) и TUM (черная кривая)

В событиях 1–5, 7, 8 всплески поглощения, сопровождающие всплески шипений, регистрируются только в TUM (см. рис. 3), тогда как в LOZ практически отсутствуют даже слабые всплески поглощения. В событии 9 рост поглощения регистрируется в LOZ при отсутствии каких-либо вариаций поглощения в TUM. В событии 6 всплеск шипений регистрируется при равных значениях риометрического поглощения в LOZ и TUM.

В событиях 1–5, 7, 8, по-видимому, экваториальная граница области с повышенным уровнем поглощения в ионосфере находится по широте выше LOZ. Поскольку зоны приема в LOZ и TUM частично пересекаются (см. рис. 1), при нахождении этой границы ближе к LOZ в этой обсерватории также должно регистрироваться усиление поглощения. Поскольку этого не происходит, мы предполагаем, что экваториальная граница области повышенного поглощения находится в окрестности TUM. В событии 6 регистрируется одинаковый уровень поглощения в обоих пунктах, т. е. в это время центр области повышенного поглощения находится между LOZ и TUM. В событии 9 отсутствуют какие-либо вариации поглощения в TUM. В этот момент полярная граница области повышенного поглощения находится за пределами границы зоны приема в TUM, ближе к LOZ.

Выдвинутые предположения о положении области повышенного поглощения подтверждаются положе-

нием полярных сияний в рассматриваемых событиях. На рис. 4 приведены снимки all-sky-камер в LOZ и VTU, сделанные во время максимума интенсивности всплесков авроральных шипений для событий 2–4, 5 (два всплеска) и 7–9.

В событии 9 (увеличение уровня поглощения только в LOZ) по данным LOZ дуга находится чуть южнее этой точки (см. рис. 4, з). Считая, что размеры области повышенного поглощения по широте определяются размерами дуги сияний, можно предположить, что экваториальная граница этой области находится в 30–50 км к югу от LOZ.

В остальных событиях авроральная активность имеет место севернее LOZ (рис. 4, а–ж). Стоит отметить, что во время события 1 (10 декабря 18:00–18:20 UT) благоприятные погодные условия позволяли наблюдать полярные сияния в обсерватории «Кево» (Швеция, 69.76° N, 27.01° E), расположенной примерно в 400 км к северо-западу от LOZ. Согласно снимкам all-sky-камеры (данные не приведены) авроральная активность в этом событии наблюдалась на более высоких широтах, чем широта LOZ, причем экваториальная граница сияний находилась на расстоянии не менее 100 км к северу от LOZ.

Мы проанализировали особенности вариаций поляризации и направления прихода всплесков авроральных шипений в LOZ, чтобы оценить положение их области засветки. На рис. 5 и 6 представлены обратный азимут вектора Пойнтинга и индекс круго-

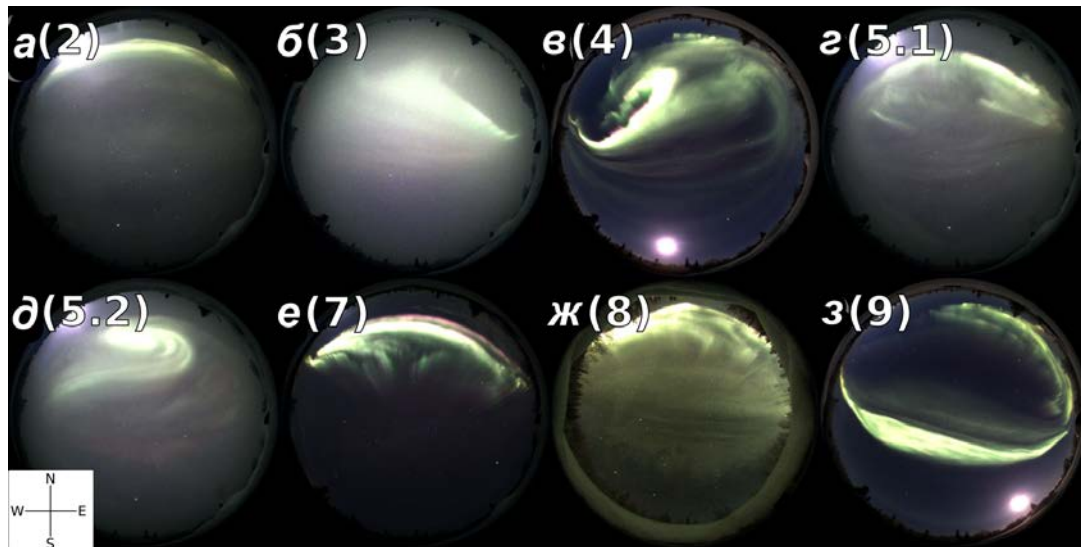


Рис. 4. Снимки all-sky-камер, установленных в LOZ (а–е, з) и VTU (ж), сделанные в десятисекундные интервалы, соответствующие максимуму всплесков авроральных шипений для событий 2–5, 7–9: 5 декабря 19:59:00–19:59:10 UT (а); 13 декабря 22:51:30–22:51:40 UT (б), 22 ноября 18:15:40–18:15:50 UT (в); 5 декабря 19:14:20–19:14:30 UT (г); 5 декабря 19:18:30–19:18:40 UT (д); 9 ноября 17:23:00–17:23:10 UT (е), 21 декабря 00:03:30–00:03:40 UT (ж); 22 ноября 15:16:00–15:16:10 UT (з)

вой поляризации для рассматриваемых событий. Как видно из рис. 5, только в событии 8 (21 декабря 00:00–00:20 UT) авроральные шипения приходят в точку наблюдений с запада, т. е. центр области засветки находится на одной широте с LOZ. Судя по вариациям направления прихода на частотах выше 5 кГц, в событиях 1–7 и 9 авроральные шипения приходят в точку наблюдений с более низких широт, в основном с юго-запада или юго-востока. В событиях 1, 7 и 9 на частотах ниже ~5 кГц регистрируется излучение, по-видимому, другого типа, приходящее с севера и северо-востока.

Согласно результатам расчета индекса круговой поляризации все рассматриваемые всплески авроральных шипений имеют правую поляризацию (см. рис. 6). Практически круговая правая поляризация, когда индекс  $P_c$  принимает значения, близкие к единице, наблюдается в событии 7 (9 ноября 17:10–17:30 UT), т. е. центр области засветки авроральных шипений находится довольно близко к LOZ. В остальных событиях поляризация эллиптическая и центр области засветки находится на некотором удалении от LOZ.

Таким образом, всплески на частотах ниже ~5 кГц, приходящие в LOZ с севера и северо-востока, имеют левую поляризацию в событии 1, т. е. их область засветки далека от LOZ, и правую поляризацию, близкую к круговой, в событиях 7, 9, т. е. их область засветки близка к LOZ.

### 3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно результатам анализа в рассматриваемых событиях регистрируется локальная по широте область повышенного риометрического поглощения. В событиях 1–5, 7 экваториальная граница этой области находится в окрестности TUM (см. рис. 3),

в событии 6 центр этой области находится между LOZ и TUM, в событии 9 полярная граница этой области находится в 30–50 км к югу от LOZ.

Результаты анализа азимутальных углов прихода авроральных шипений в точку наблюдений и поляризации их магнитного поля показывают, что во всех рассматриваемых событиях положение области повышенного риометрического поглощения не совпадает с положением области засветки авроральных шипений. В событии 8 центр области засветки авроральных шипений находится на широте LOZ к западу от нее. При этом, согласно наблюдениям сияний в обсерватории «Кево», экваториальная граница области повышенного поглощения находится не менее чем в 100 км к северу от LOZ. Во всех остальных событиях центр области засветки авроральных шипений находится на более низких широтах, чем экваториальная граница области повышенного риометрического поглощения.

На рис. 7 представлена адаптированная схема выхода авроральных шипений к земной поверхности [Makita, 1979; Ozaki et al., 2008]. Авроральные шипения рассеиваются на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере, где коэффициент преломления  $n \geq 5$ . Из закона Снеллиуса [Stix, 1992] следует, что выйти к земной поверхности, где показатель преломления равен единице, способны только волны с волновыми нормальными, близкими к вертикали. Пучки высыпавшихся энергичных электронов, возбуждающих шипения и обуславливающих усиление поглощения космического радишума в нижней ионосфере, проходят в ионосферу, где вызывают полярные сияния, вдоль линий геомагнитного поля. Поскольку рассеяние происходит довольно высоко (800 км и выше) [Sonwalkar, Harikumar, 2000; Никитенко и др., 2023; Shklyar, Nagano, 1998; Kuzichev, 2012], из-за наклона

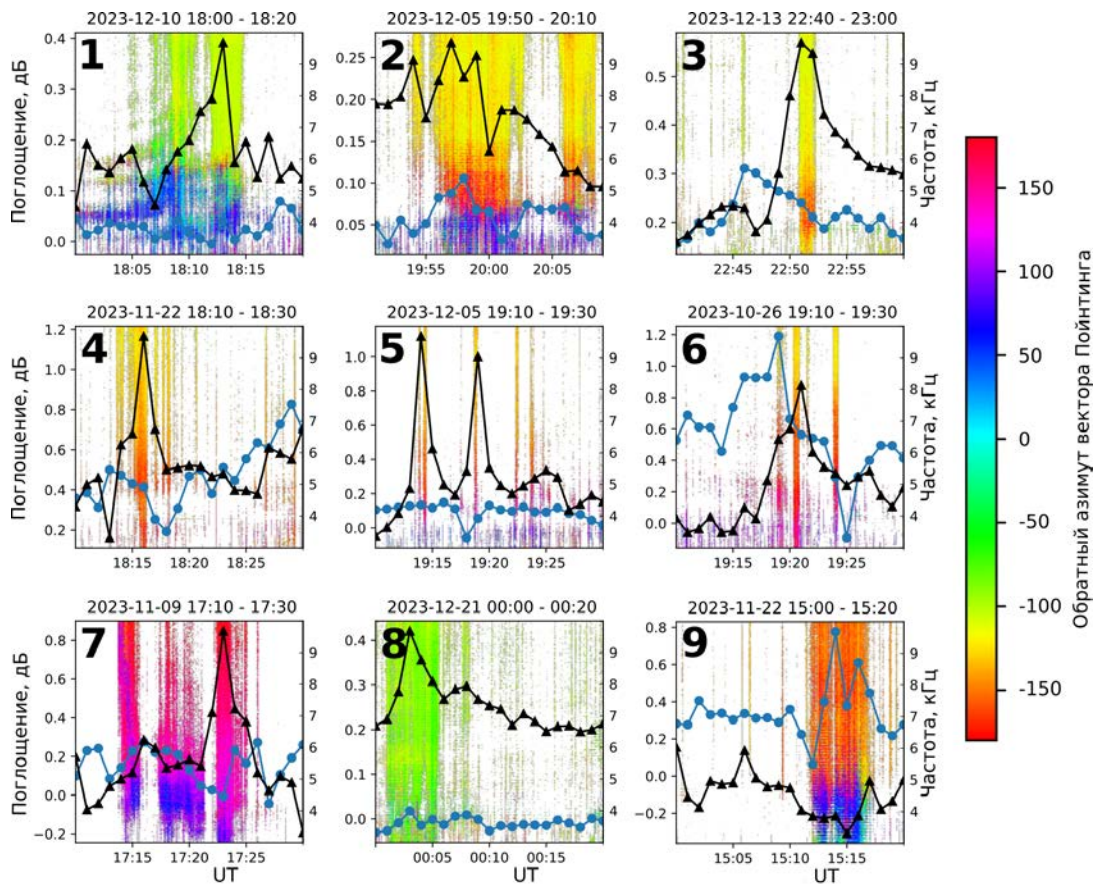


Рис. 5. Обратный азимут вектора Пойнтинга для событий 1–9 (см. рис. 2)

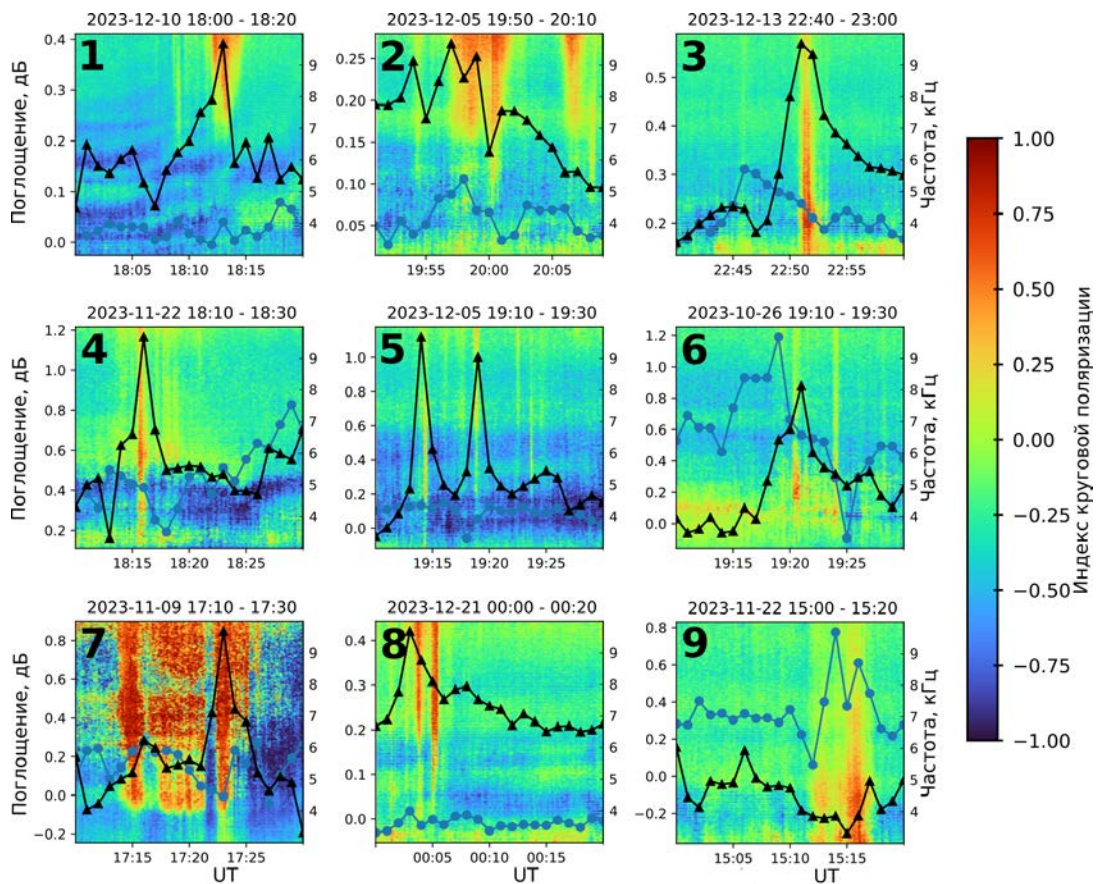


Рис. 6. Индекс круговой поляризации для событий 1–9 (см. рис. 2)

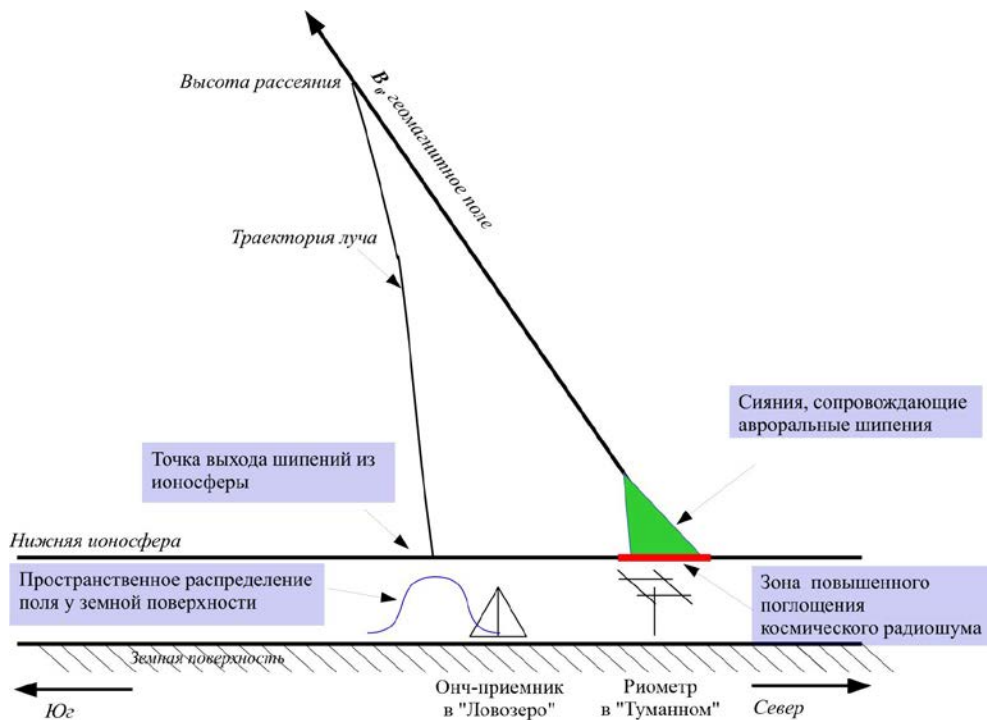


Рис. 7. Адаптированная схема выхода авроральных шипений к земной поверхности (из работ [Makita, 1979; Ozaki et al., 2008])

геомагнитного поля расстояние между основанием силовой линии и центром области засветки может достигать нескольких сотен километров. Из-за этого эффекта авроральные шипения будут зарегистрированы на меньших широтах, чем сопровождающие их сияния и, как следствие, область повышенного риометрического поглощения.

Дополнительным аргументом в пользу локальности области повышенного поглощения служит регистрация двух пространственно-разнесенных всплесков ОНЧ-излучения в событиях 1, 7 и 9. В событиях 7 и 9 идентичная частотно-временная структура низкоширотного и высокоширотного всплесков указывает на их общую природу, связанную с авроральным шипением. В событии 1 низкочастотная составляющая ( $< 5$  кГц) второго всплеска, вероятно, имеет иное происхождение.

В событиях 7 и 9 всплески с направлением прихода с более высоких широт могут быть следствием формирования в меридиональной плоскости двух пучков квазиэлектростатических волн, возбуждающих авроральные шипения [Никитенко и др., 2023]. Они могут быть также результатом рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях пучка, распространяющегося к полюсу от силовой линии, на которой происходила генерация шипений. Одновременная регистрация двух разнесенных по широте областей засветки авроральных шипений при возрастании риометрического поглощения может указывать на локальность области повышенного поглощения по широте. В противном случае более высокоширотный всплеск, распространяясь к земной поверхности, при попадании в область повышенного риометрического поглощения не регистрировался бы из-за затухания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты анализа девяти событий одновременной регистрации всплесков авроральных шипений и возрастания риометрического поглощения. В некоторых событиях уровень поглощения достигал значений, при которых, согласно результатам работы [Никитенко и др., 2025], шипения не могут выйти к земной поверхности из-за затухания в нижней ионосфере.

Сопоставление положения области засветки авроральных шипений и области повышенного риометрического поглощения по данным наземных наблюдений в обсерваториях «Ловозеро» и «Туманный» показало, что центры области засветки шипений смещены относительно области повышенного риометрического поглощения к более низким широтам. Данные оптических наблюдений с помощью камер всего неба подтвердили пространственное разделение этих областей. Установлено, что в исследуемых событиях область полярных сияний, вызывающих возрастания риометрического поглощения, смещена к более высоким широтам относительно области засветки шипений.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что пучок энергичных электронов, ответственный за генерацию шипений и возникновение полярных сияний, создает в нижней ионосфере ограниченную область повышенного риометрического поглощения. Вследствие узкого конуса прохождения волн с частотой ниже 15 кГц авроральные шипения после рассеяния в верхней ионосфере на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации выходят к земной поверхности на более низких широтах, чем те, на которых находится область повышенного

риометрического поглощения [Makita, 1979; Ozaki et al., 2008].

Предложенный механизм объясняет одновременную регистрацию всплесков авроральных шипений и высоких уровней риометрического поглощения (более ~0.6 дБ), которые, согласно модельным оценкам, должны полностью подавлять распространение ОНЧ-излучения к земной поверхности. Верификация данной модели возможна с помощью трехмерного моделирования распространения ОНЧ-волн с учетом реальной структуры ионосферы, а также совместного анализа данных спутниковых (in situ) и наземных измерений для прямого определения высот и локализации рассеяния.

Работа поддержана грантом РНФ № 24-27-20048 «Оценка состояния ионосферы в арктической зоне по результатам наземных измерений электромагнитного поля авроральных шипений в очень низкочастотном диапазоне и риометрического поглощения».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Клейменова Н., Маннинен Ю., Громова Л. и др. Всплески ОНЧ-излучений типа «авроральный хисс» на земной поверхности на  $L \sim 5.5$  и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019, т. 59, № 3, с. 291–300. DOI: [10.1134/S0016794019030088](https://doi.org/10.1134/S0016794019030088).
- Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2019, т. 59, № 5, с. 618–627. DOI: [10.1134/S0016794019050079](https://doi.org/10.1134/S0016794019050079).
- Никитенко А.С., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В. и др. Пространственная структура области засветки ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в авроральных широтах. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2022, т. 62, № 3, с. 336–344. DOI: [10.31857/S0016794022030129](https://doi.org/10.31857/S0016794022030129).
- Никитенко А.С., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование пространственной структуры волнового поля аврорального хисса и сравнение с результатами наземных наблюдений. *Известия РАН. Сер. Физическая*. 2023, т. 87, № 1, с. 134–140. DOI: [10.31857/S0367676522700259](https://doi.org/10.31857/S0367676522700259).
- Никитенко А.С., Лебедь О.М., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. Анализ влияния роста риометрического поглощения на выход авроральных шипений к земной поверхности. *Солнечно-земная физика*. 2025, т. 11, № 1, с. 70–76. DOI: [10.12737/szf-111202508](https://doi.org/10.12737/szf-111202508) / Nikitenko A.S., Lebed O.M., Larchenko A.V., Fedorenko Yu.V. Analysis of the effect of cosmic noise absorption increase on propagation of auroral hiss to the ground. *Sol.-Terr. Phys.* 2025, vol. 11, iss. 1, pp. 63–69. DOI: [10.12737/stp-111202508](https://doi.org/10.12737/stp-111202508).
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. и др. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени. *ИТЭ*. 2021, № 5, с. 115–125. DOI: [10.31857/S0032816221040248](https://doi.org/10.31857/S0032816221040248).
- Рыгов С.М. *Введение в статистическую радиофизику*. М.: Наука, 1966, 404 с.
- Jørgensen T.S. Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, iss. 5, pp. 1367–1375. DOI: [10.1029/JZ071i005p01367](https://doi.org/10.1029/JZ071i005p01367).
- Gurnett D.A. A satellite study of VLF hiss. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, pp. 5599–5615.
- 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.* 1965, vol. 27, pp. 481–497. DOI: [10.1016/0021-9169\(65\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(65)90013-9).
- Hargreaves J.K. Auroral absorption of HF radio waves in the ionosphere: A review of results from the first decade of riometry. *Proc. IEEE*. 1969, vol. 57, pp. 1348–1373. DOI: [10.1109/PROC.1969.7275](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7275).
- Helliwell R.A. *Whistler and Related Ionospheric Phenomena*. Stanford Univ. Press, 1965, 349 p.
- Hughes A.R.W., Kaiser T.R., Bullough K. The frequency of occurrence of VLF radio emissions at high latitudes. *Space Res.* 1971, vol. 11, pp. 1323–1330.
- Kuzichev I.V. On whistler mode wave scattering from density irregularities in the upper ionosphere. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2012, vol. 117, iss. A6. DOI: [10.1029/2011JA017130](https://doi.org/10.1029/2011JA017130).
- LaBelle J., Treumann R.A. Auroral Radio Emissions, 1. Hisses, Roars, and Bursts. *Space Sci. Rev.* 2002, vol. 101, pp. 295–440. DOI: [10.1023/A:1020850022070](https://doi.org/10.1023/A:1020850022070).
- Machida S., Tsuruda K. Intensity and polarization characteristics of whistlers deduced from multi-station observations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1984, vol. 89, iss. A3, pp. 1675–1682. DOI: [10.1029/JA089iA03p01675](https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01675).
- Maggs J.E. Coherent generation of VLF hiss. *J. Geophys. Res.* 1976, vol. 81, pp. 1707–1724. DOI: [10.1029/JA081i010p01707](https://doi.org/10.1029/JA081i010p01707).
- Makita K. VLF/LF hiss emissions associated with aurora. *Mem. Nat. Inst. Polar Res. Ser. A*. 1979, iss. 16, pp. 1–126.
- Manninen J., Kleimenova N., Turunen T., Gromova L. New high-frequency (7–12 kHz) quasi-periodic VLF emissions observed on the ground at  $L \sim 5.5$ . *Ann. Geophys.* 2018, vol. 36, pp. 915–923. DOI: [10.5194/angeo-36-915-2018](https://doi.org/10.5194/angeo-36-915-2018).
- Manninen J., Kleimenova N., Turunen T., et al. New type of short high-frequency VLF patches (“VLF birds”) above 4–5 kHz. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2021, vol. 126, E2020JA028601. DOI: [10.1029/2020JA028601](https://doi.org/10.1029/2020JA028601).
- Ozaki M., Yagitani S., Nagano I., et al. Localization of VLF ionospheric exit point by comparison of multipoint ground-based observation with full-wave analysis. *Polar Sci.* 2008, vol. 2, iss. 4, pp. 237–249. DOI: [10.1016/j.polar.2008.09.001](https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.09.001).
- Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M. Auroral hiss: a review. *Planetary and Space Sci.* 1993, vol. 41, pp. 153–166. DOI: [10.1016/0032-0633\(93\)90045-4](https://doi.org/10.1016/0032-0633(93)90045-4).
- Shklyar D.R., Nagano I. On VLF wave scattering in plasma with density irregularities. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998, vol. 103, iss. A12, pp. 29515–29526. DOI: [10.1029/98JA02311](https://doi.org/10.1029/98JA02311).
- Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000, vol. 105, iss. A8, pp. 18867–18883. DOI: [10.1029/1999JA00030](https://doi.org/10.1029/1999JA00030).
- Spasojevic M. Statistics of auroral hiss and relationship to auroral boundaries and upward current regions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 7547–7560. DOI: [10.1002/2016JA022851](https://doi.org/10.1002/2016JA022851).
- Srivastava R.N. VLF hiss, visual aurora and the geomagnetic activity. *Planetary and Space Sci.* 1976, vol. 24, pp. 375–379. DOI: [10.1016/0032-0633\(76\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0032-0633(76)90050-7).
- Stix T. *Waves in Plasmas*. American Institute of Physics, 1992, 579 p.
- Titova E.E., Kozelov B.V., Demekhov A.G., et al. Identification of the source of quasiperiodic VLF emissions using ground-based and Van Allen Probes satellite observations. *Geophys. Res. Lett.* 2015, vol. 42, pp. 6137–6145. DOI: [10.1002/2015GL064911](https://doi.org/10.1002/2015GL064911).
- Tsuruda K., Ikeda M. Comparison of three different types of VLF direction-finding techniques. *J. Geophys. Res.* 1979, vol. 84, iss. A9, pp. 5325–5332. DOI: [10.1029/JA084iA09p05325](https://doi.org/10.1029/JA084iA09p05325).
- Tsuruda K., Machida S., Terasawa T., et al. High spatial attenuation of the Siple transmitter signal and natural VLF chorus observed at ground-based chain stations near Roberval, Quebec. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1982, vol. 87, iss. A2, pp. 742–750. DOI: [10.1029/JA087iA02p00742](https://doi.org/10.1029/JA087iA02p00742).

- Xu T., Rietveld M., Wu J., et al. Polarization analysis of ELF/VLF waves generated by beating of two HF waves in the polar ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2019, vol. 196, 105133. DOI: [10.1016/j.jastp.2019.105133](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105133).
- Yearby K.H., Smith A.J. The polarization of whistlers received on the ground near  $L=4$ . *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994, vol. 56, pp. 1499–1512. DOI: [10.1016/0021-9169\(94\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)90117-1).

*Как цитировать эту статью:*

Никитенко А.С., Лебедь О.М. Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. Влияние облачности на пространственное распределение проводимости в атмосфере. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 64–73. <https://doi.org/10.12737/szf-121202608>.