

DOI: [10.12737/szf-121202610](https://doi.org/10.12737/szf-121202610)EDN: [YYBRTE](https://www.edn.ru/YYBRTE)

УДК 550.388.2

Поступила в редакцию 09.06.2025

Принята к публикации 11.11.2025

**ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ
ВО ВРЕМЯ ЭКСПЕДИЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС–41»****THE FIRST RESULTS OF OBSERVATIONS OF AURORAL HISS DURING
THE «NORTH POLE–41» EXPEDITION**

О.М. Лебедь *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, olga.m.lebed@gmail.com***С.В. Пильгаев***Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, pilgaev@pgia.ru***А.В. Ларченко** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, alexey.larchenko@gmail.com***Н.Ф. Благовещенская** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, nataly@aari.nw.ru***А.С. Калишин** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, askalishin@aari.ru***Т.Д. Борисова** *Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, borisova@aari.ru***О.Ю. Стрибный***Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия, rd1a@mail.ru***М.В. Филатов***Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, mijgun@yandex.ru***М.В. Кузнецова***Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, kuznetsova@pgia.ru***А.С. Никитенко** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com***Е.Б. Бекетова** *Филиал Мурманского арктического университета
в г. Апатиты,
Апатиты, Россия, elena.beketova@gmail.com***Ю.В. Федоренко** *Полярный геофизический институт,
Апатиты, Россия, yury.fedorenko@gmail.com***O.M. Lebed***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, olga.m.lebed@gmail.com***S.V. Pilgaev***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, pilgaev@pgia.ru***A.V. Larchenko***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, alexey.larchenko@gmail.com***N.F. Blagoveshchenskaya***Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, nataly@aari.nw.ru***A.S. Kalishin***Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, askalishin@aari.ru***T.D. Borisova***Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, borisova@aari.ru***O.Yu. Stribny***Arctic and Antarctic Research Institute,
Saint Petersburg, Russia, rd1a@mail.ru***M.V. Filatov***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, mijgun@yandex.ru***M.V. Kuznetsova***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, kuznetsova@pgia.ru***A.S. Nikitenko***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, alex.nikitenko91@gmail.com***E.B. Beketova***Apatity Branch of Murmansk Arctic University,
Apatity, Russia, elena.beketova@gmail.com***Yu.V. Fedorenko***Polar Geophysical Institute,
Apatity, Russia, yury.fedorenko@gmail.com*

Аннотация. Во время экспедиции «Северный полюс–41» были проведены одновременные измерения трех компонент электромагнитного поля в ОНЧ-диапазоне на дрейфующей ледостойкой платформе, а также на станции «Ловозеро» и в обсерватории «Баренцбург». Рассмотрены три ОНЧ-события, произошедшие в магнитоспокойных условиях. Во время двух из них (события 24.01.2023 и 12.03.2024) на трех станциях, разнесенных на расстояние до 2600 км

Abstract. During the North Pole–41 expedition, three components of the VLF electromagnetic field were simultaneously measured on a drifting ice-resistant platform and at the Lovozero and Barentsburg observatories. We consider three VLF events that occurred in magnetically quiet time. During two of them (the events on January 24, 2023 and March 12, 2024), auroral hiss bursts were recorded at three stations located in the auroral and circumpolar regions and spaced up to 2.600 km

и находящихся в авроральной и приполярной областях, были зарегистрированы всплески аврорального хисса, причем спектрально-временные характеристики всплесков на всех станциях были практически одинаковы. Факт регистрации хисса с одинаковыми свойствами на столь больших расстояниях можно объяснить в рамках предположения об однородном во всей области высыпаний потоке авроральных электронов с энергиями от 0.1 до 10 кэВ, генерирующих квазиэлектростатические волны на высотах 10–20 тыс. км, в сочетании с одновременным присутствием мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в окрестности каждой из трех станций, на которых происходит рассеяние этих волн в конус выхода к земной поверхности. Рассмотрен случай регистрации хисса (событие 25.01.2023), демонстрирующий локальность области его регистрации в течение одних суток — всплеск наблюдается сначала на одной станции, затем на другой. Вероятно, это связано с возникновением/исчезновением локальных областей мелкомасштабных неоднородностей, на которых происходит рассеяние квазиэлектростатических волн, обеспечивающее прохождение к земной поверхности.

Ключевые слова: авроральные шипения, ионосфера, ОНЧ-волна.

apart. The spectral and temporal characteristics of the bursts at all the stations were almost the same. The fact that hiss was recorded with the same properties at such large distances can be explained under the assumption of a homogeneous flow of auroral electrons with energies from 0.1 to 10 keV throughout the precipitation area, which generate quasi-electrostatic waves at altitudes 10–20 thousand km, along with the simultaneous presence of small-scale ionospheric irregularities in the vicinity of all three stations, where these waves are scattered into the propagation cone to the Earth surface. We examine the case of hiss recording (the January 25, 2023 event) demonstrating the locality of the hiss recording area during one day — a hiss burst is first observed at one station, then at another. This is probably due to the appearance/disappearance of local areas of small-scale irregularities, where quasi-electrostatic waves are scattered providing propagation to the Earth surface.

Keywords: auroral hiss, ionosphere, VLF wave.

ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотные электромагнитные излучения являются одним из источников информации о состоянии околоземной плазмы. В настоящее время, несмотря на широкое использование спутниковых данных, привлечение к анализу ОНЧ-событий результатов наземной регистрации остается актуальной задачей, особенно в высоких широтах, где высыпания заряженных частиц могут приводить к быстрым изменениям состояния ионосферы. Наземные наблюдения позволяют отделить временные вариации поля от пространственных, вызванных перемещением спутника, и исследовать динамику продолжительных во времени процессов, определяющих пространственно-временную структуру поля излучений у земной поверхности. Исследования геофизических процессов по данным наземных наблюдений электромагнитных полей ОНЧ-диапазона в приполюсных широтах Арктики представляют большой интерес для понимания физических процессов в дневном полярном каспе и полярной шапке, где имеется прямой доступ плазмы солнечного ветра к ионосфере. Это необходимо как для улучшения прогноза космической погоды, так и для изучения влияния гелиогеофизических возмущений на состояние ионосферы и, как следствие, на качество коротковолновой связи. Вследствие отсутствия постоянно действующих обсерваторий измерения электромагнитных полей ОНЧ-диапазона в приполюсных широтах Арктики выполняются во время морских экспедиций или на дрейфующих станциях.

В ходе морской экспедиции «Трансарктика–2019», организованной Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) с 20 марта по 20 мая 2019 г., научно-экспедиционное судно «Академик Трёшников» было введено в лед севернее арх. Земля Франца-Иосифа, откуда начало свой дрейф. Одной из целей экспедиции было исследование пространственно-временной структуры наблюдаемых на земной поверхности ОНЧ-излучений магнитосферного происхождения. Для этого использовался многофункциональный цифровой ОНЧ-приемник, обеспечивающий цифровую запись двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент поля с прецизионной синхронизацией с мировым временем [Пильгаев и др., 2021]. Во время этой экспедиции было зарегистрировано несколько ОНЧ-событий, в основном всплесков авроральных шипений [Пильгаев и др., 2020].

В 2022–2024 гг. специалистами ААНИИ была организована экспедиция «Северный полюс–41» (СП–41) на дрейфующей полярной станции. Низкочастотные наблюдения велись ОНЧ-приемником, идентичным примененному в экспедиции «Трансарктика–2019». Такие же приемники в стационарном варианте использовались для наблюдений в обсерватории ПГИ «Баренцбург» (78.09° N, 14.21° E), расположенной также в приполярной области, но к западу от траектории дрейфа, и на станции «Ловозеро» (67.98° N, 35.082° E), расположенной в авроральной зоне. За все время наблюдений в этой экспедиции с 1 декабря 2022 г. по 30 марта 2024 г. ОНЧ-эмиссии магнитосферного происхождения были представлены преимущественно авроральными шипениями.

Авроральные шипения (auroral hiss) являются одним из наиболее часто регистрируемых в высоких широтах типов естественных низкочастотных излучений [Makita, 1979; Sazhin et al., 1993]. В русскоязычной литературе их часто называют авроральным хиссом [Клейменова и др., 2019]. Авроральный хисс — это шумовое электромагнитное излучение, регистрируемое в ОНЧ-диапазоне (очень низкочастотном, 3–30 кГц) с максимумом интенсивности на частотах 8–10 кГц. Принято считать, что генерация аврорального хисса происходит в виде квазиэлектростатических волн в магнитосфере на высотах ~5–20 тыс. км и связана с высыпаниями мягких электронов (с энергиями от 0.1 до 10 кэВ) [Sonwalkar, Harikumar, 2000; Makita, 1979]. На низкоорбитальных спутниках авроральный хисс регистрируется почти при каждом пересечении авроральных широт в вечернее и ночное время с максимумом интенсивности на геомагнитных широтах ~68° N – 72° N [Gurnett, 1966]. Так, из 140 случаев наблюдаемых на спутнике хиссов только два сопровождалось одновременным появлением хисса на Земле. Многие авторы отмечают, что авроральное шипение обычно тесно коррелирует с локальной геомагнитной активностью, однако это утверждение спорно. В частности, в работе [Jørgensen, Ungstrup, 1962] не обнаружилась такая корреляция в данных ОНЧ по Гренландии, но в работе [Harang, Larsen, 1965] авторы показали положительную корреляцию между возникновением хисса в авроральных широтах и локальными умеренными геомагнитными возмущениями и отрицательную — в случае сильных возмущений. В работе [Manninen et al., 2020] на основе данных регистрации аврорального хисса на финской станции Каннуслахто (геомагнитная широта 64.2° N) в течение 2015–2018 гг. показано, что возникновение авроральных ОНЧ-излучений в экваториальной области овала полярных сияний является типичным признаком фазы развития суббури. За этот период времени над Скандинавией было зарегистрировано 98 изолированных и довольно мощных магнитных суббурь. В 93 % исследованных суббурь авроральный хисс регистрировался одновременно с усилением продольных токов. Продольные токи вызываются высыпаниями мягких электронов, которые являются вероятным источником аврорального хисса.

Вследствие того, что модуль горизонтальной компоненты вектора показателя преломления квазиэлектростатических волн много больше единицы, выход аврорального хисса в волновод Земля—ионосфера и его регистрация на земной поверхности возможны только после рассеяния на мелкомасштабных (соизмеримых с длиной квазиэлектростатической волны) неоднородностях электронной концентрации верхней ионосферы [Sonwalkar, Harikumar, 2000]. При этом рассеяние должно произойти до достижения квазиэлектростатическими волнами высоты, где частота нижнего гибридного резонанса (НГР) ω_{LHR} станет равной частоте волны,

$$\omega_{\text{LHR}}^2 = \frac{1}{M_{\text{eff}}} \frac{\omega_{\text{Pe}}^2 \omega_{\text{He}}^2}{\omega_{\text{Pe}}^2 + \omega_{\text{He}}^2}, \quad \frac{1}{M_{\text{eff}}} = \frac{m_e}{n_e} \sum_i \frac{n_i}{m_i}.$$

Здесь ω_{Pe} , ω_{He} — плазменная частота и гирочастота электрона; m_e , n_e — масса и концентрация электро-

нов; m_i , n_i — масса и концентрация i -ой составляющей ионов [Budden, 1985; Kimura, 1966; Stix, 1992]. Для частот 8–10 кГц значение этой высоты лежит в диапазоне 800–1200 км. Расчеты, проведенные в работе [Никитенко и др., 2023], показали, что часто наблюдаемую локальность зоны засветки авроральным хиссом земной поверхности можно объяснить только при расположении области неоднородностей на высоте, которая близка и несколько выше высоты НГР.

Размер зоны засветки на земной поверхности в основном определяется размером области неоднородностей в верхней ионосфере и размером поперечного сечения пакета квазиэлектростатических волн, падающих на эту область [Никитенко и др., 2023]. Условие черенковского резонанса [Sazhin et al., 1993], связывающее величину продольной компоненты волновой нормали генерируемой квазиэлектростатической волны с продольной скоростью электрона, не определяет направление компоненты, перпендикулярной к силовой линии магнитного поля Земли. При геометрическом моделировании распространения квазиэлектростатических волн с высот 10–20 тыс. км до высоты неоднородностей распределение направлений этой компоненты предполагалось равномерным в промежутке $[-\pi, \pi]$ [Никитенко и др., 2023]. Результаты моделирования показывают, что сечение меридиональной плоскостью области засветки неоднородностей имеет две зоны шириной 300–400 км, одна из которых находится ближе к экватору, а другая — ближе к полюсу симметрично подножию силовой линии магнитного поля, на которой происходит генерация, причем в область вблизи этой силовой линии квазиэлектростатические волны не попадают.

Для оценки минимального размера зоны засветки на земной поверхности в работе [Никитенко и др., 2023] было проведено моделирование распределения амплитуд горизонтальной компоненты магнитного поля при рассеянии квазиэлектростатических волн на области размером 50 км, расположенной на высоте 800 км. Получено, что 90 % мощности излучения попадает в окружность диаметром ~400 км, а зона, в которой среднеквадратичная амплитуда сигнала не меньше –20 дБ от максимальной, составляет ~150–200 км.

В работе [Yearby, Smith, 1994] было предложено использовать индекс поляризации V_i для оценки расстояния от точки выхода ОНЧ-волны из ионосферы до точки наблюдений. Приведенные в этой статье алгоритмы, возможно, хороши для свистов, но вряд ли подходят для ОНЧ-шипений вследствие случайного характера их поля. Более корректный анализ связи поляризации наблюдаемого на земной поверхности шипения с расстоянием был сделан в [Никитенко и др., 2021]. Из рис. 2 этой работы следует, что поляризация горизонтального магнитного поля на земной поверхности вблизи центра области рассеяния в Северном полушарии всегда правая и остается такой при удалении на 100–150 км. На расстоянии примерно 350–400 км от центра она меняется на левую. Эти расстояния слабо зависят от профиля электронной концентрации нижней ионосферы и могут быть уточнены для каждого конкретного события при помощи моделирования.

Наблюдения естественных ОНЧ-излучений в приполярных областях носят эпизодический характер, поэтому полученные в экспедиции СП–41 результаты измерений важны для понимания процессов генерации и распространения ОНЧ-волн в полярной шапке. В данной работе обсуждаются наиболее интересные результаты наблюдений всплесков аврорального хисса, зарегистрированных на дрейфующей полярной станции в нейтральных водах. Результаты наблюдений сопоставлены с наблюдениями ОНЧ-излучений в обсерватории «Баренцбург» (ВAB) и на станции «Ловозеро» (LOZ).

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспедиция «Северный полюс–41», организованная ААНИИ, проводилась со 2 октября 2022 г. по 7 мая 2024 г. на ледостойкой самодвижущейся платформе (ЛСП/LSP), которая дрейфовала под действием течений и ветра в Арктическом бассейне Северного Ледовитого океана. Особенностью данной экспедиции являлось то, что платформа представляла собой вмороженное в лед и дрейфующее вместе с ним научно-исследовательское судно «Северный полюс». На платформе велись измерения в самых разных областях науки, в частности, метеорологические, геофизические, гидроакустические, океанографические и т. д. В том числе, в 500 м от судна на льду были установлены мачты антенн многофункционального цифрового ОНЧ-приемника, обеспечивающего регистрацию двух горизонтальных магнитных (B_x, B_y) и вертикальной электрической (E_z) компонент поля с прецизионной синхронизацией с мировым временем (рис. 1, а).

Для проведения непрерывных наблюдений компонент электромагнитного поля в широком диапазоне частот (от 300 Гц до 15 кГц) использовался ОНЧ-приемник [Пильгаев и др., 2021]. Его отличительными особенностями являются гальваническое разделение цифровой и аналоговой частей, что позволяет свести к минимуму уровень промышленных помех в компоненте E_z , и прецизионная синхронизация каждого получаемого отсчета цифровых данных с мировым временем с максимальной ошибкой, не превышающей 1 мкс. Регистрация трех компонент поля позволяет определять не только стандартный набор параметров измеряемого электромагнитного поля (амплитуды и параметры эллипса поляризации), но и величину и направление вектора Пойнтинга, что значительно увеличивает информативность наблюдений. Калибровка измерительных каналов каждого из используемых ОНЧ-приемников была выполнена с помощью устройства и методики, описанных в [Пильгаев и др., 2018].

На рис. 1, б приведена карта с указанием маршрута дрейфа LSP (черная линия), а также координаты обсерватории «Баренцбург» и станции «Ловозеро» (расстояние между ними составляет 1300 км). В начале 2023 г. платформа находилась в приполюсной области, в то время как к началу 2024 г. она сместилась ближе к арх. Шпицберген. Если рассмотреть положение

платформы в геомагнитных координатах (параллели геомагнитных координат показаны на рис. 1 красными линиями, а геомагнитные широты указаны цифрами), окажется, что LSP находилась все время эксперимента между 75° N и 79° N геомагнитной широты — в области полярной шапки.

Несмотря на достаточное удаление антенн ОНЧ-приемника от основного источника помех — научно-исследовательского судна, — примерно четверть всех записей была испорчена помехой неизвестного происхождения, что заставляет более внимательно рассмотреть электромагнитную совместимость геофизических приборов, используемых в экспедиции СП–41. Также ряд наблюдений периодически прерывался из-за разных причин, в том числе из-за подвижек льда. Суммарно примерно за 1.5 года дрейфа ледовой платформы было получено около восьми месяцев записей компонент электромагнитного поля ОНЧ-диапазона.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Регистрируемый у земной поверхности авроральный хисс можно рассматривать как квазистационарный гауссов трехмерный случайный процесс с нулевым средним и медленно изменяющейся во времени ковариационной матрицей \mathbf{J} [Means, 1972; Рытов, 1966]. Для вычисления матрицы последовательности отсчетов компонент электромагнитного поля $B_x(t)$, $B_y(t)$ и $E_z(t)$ в выбранном интервале $[0, t_{\max}]$ разбиваются на N фрагментов. Длительность каждого фрагмента Δt выбирается в соответствии со скоростью изменения во времени элементов ковариационной матрицы. Элементы k -го фрагмента, $k=1 \dots N$, рассчитываются как произведение преобразований Фурье сигналов компонент в этом фрагменте $B_x(\omega)$, $B_y(\omega)$ и $E_z(\omega)$.

$$\mathbf{J}_k = \begin{bmatrix} E_z(\omega)E_z^*(\omega) & E_z(\omega)B_x^*(\omega) & E_z(\omega)B_y^*(\omega) \\ B_x(\omega)E_z^*(\omega) & B_x(\omega)B_x^*(\omega) & B_x(\omega)B_y^*(\omega) \\ B_y(\omega)E_z^*(\omega) & B_y(\omega)B_x^*(\omega) & B_y(\omega)B_y^*(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{12}^* & J_{22} & J_{23} \\ J_{13}^* & J_{23}^* & J_{33} \end{bmatrix}.$$

Здесь звездочкой обозначено комплексное сопряжение.

Исходные данные регистрации компонент электромагнитного поля на LSP нуждались в предварительной обработке, поскольку содержали всевозможные помехи — как импульсные, так и квазистационарные. К импульсным помехам относятся помехи от дальних молниевых разрядов — атмосферерики. Среднестатистическая спектральная плотность мощности атмосфериков особенно велика в диапазоне частот от 3–4 кГц до десятков килогерц, который совпадает с частотами максимума интенсивности аврорального хисса (8–10 кГц) и может превышать его

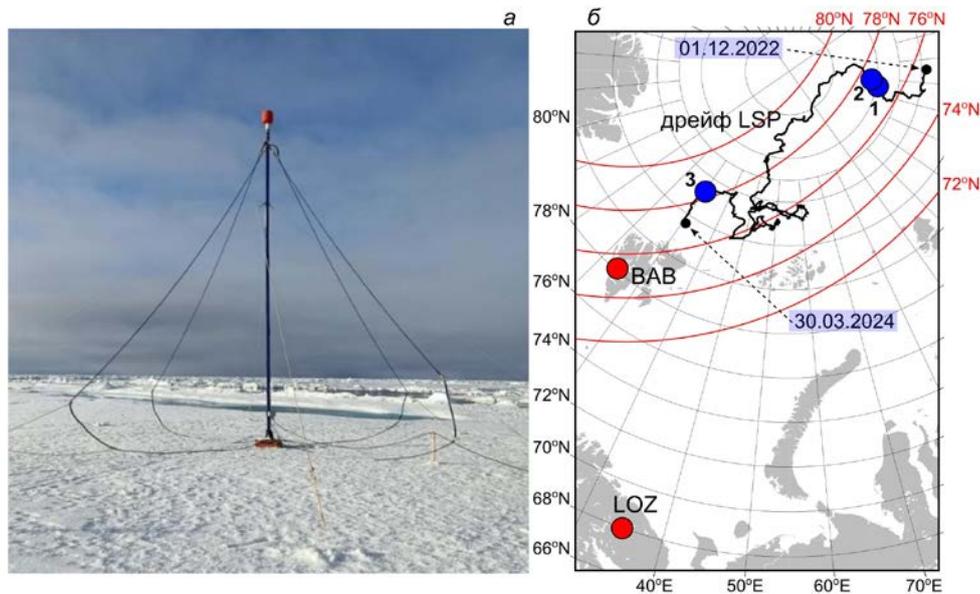


Рис. 1. Фотография с места установки антенн ОНЧ-приемника (а) и карта (б) с указанием местоположений обсерватории «Баренцбург» (BAB, арх. Шпицберген), станции «Ловозеро» (LOZ, Кольский п-ов) и дрейфа LSP (черная линия). Красные линии — параллели геомагнитных координат. Цифры — местоположение LSP во время рассматриваемых в работе событий: 1 — 24.01.2023, 12:00 UT; 2 — 25.01.2023, 04:00 и 12:00 UT; 3 — 12.03.2024, 16:00 UT

спектральную плотность мощности на несколько порядков. К квазистационарным помехам относятся гармоники частоты 50 Гц от линий электропередач, гармоники частоты 82 Гц, возникающие при включении мощного низкочастотного передатчика для связи с подводными лодками и другие квазигармонические помехи. Удаление коротких импульсных помех с широким частотным спектром возможно только во временной области, в то время как подавление медленно меняющихся во времени квазистационарных помех осуществляется в частотной области. Методы обработки сигнала опробованы и используются в настоящее время при обработке записей низкочастотных излучений на станции «Ловозеро» и в обсерватории «Баренцбург» [Лебедь и др., 2019].

Метод подавления импульсов атмосфериков, широко применяемый специалистами финской обсерватории Соданкюля для анализа ОНЧ-наблюдений на станции Каннуслахто [Manninen et al., 2013], сводится к выделению импульсов в сигнале и их исключению из дальнейшей обработки. Детектор атмосфериков срабатывает по превышению огибающей магнитного поля некоторого порога, значение которого подбирается методом проб и ошибок и далее не изменяется. Важнейшим отличием используемого в данной работе подавителя атмосфериков является применение адаптивного порога срабатывания детектора и временного окна, длительность которого определяется длительностью импульса атмосферика. Следует отметить, что полное удаление атмосфериков из записей компонент поля невозможно, поскольку нельзя разделить сигнал и наложенные на него атмосферники.

Квазистационарные помехи удалялись в диапазоне частот 200–3000 Гц, где их спектральная плотность мощности значительно превышала уровень шумов. При удалении гармоник 50 Гц вначале осу-

ществлялся поиск текущей частоты ее третьей гармоники. Затем вычислялись частоты гармоник высших порядков. Эти гармоники вырезались с помощью узкополосной фильтрации полосовым фильтром с шириной полосы пропускания, изменяющейся от 3 до 10 Гц при изменении частот гармоник от 500 Гц до 5 кГц. Предположим, что элементы ковариационной матрицы \mathbf{J} медленно меняются по частоте. В этом случае образовавшиеся после вырезания гармоник зазоры заполняются комплексным белым дельта-коррелированным во времени гауссовым шумом с ковариационной матрицей, соответствующей средней матрице, вычисленной из спектров по краям удаляемой полосы частот. Данный алгоритм также применялся для удаления гармоник помехи 82 Гц и подходит для подавления любых узкополосных сигналов помех с фиксированными или медленно изменяющимися частотами.

В данной работе с использованием элементов \mathbf{J} оценивались параметры поля аврорального хисса, такие как спектральная плотность мощности горизонтальной компоненты магнитного поля $B_i^2 = J_{22} + J_{33}$, среднеквадратичное значение горизонтальной компоненты магнитного поля $RMS_B = (B_i^2 \Delta f)^{1/2}$, где Δf — полоса частот, в которой оно вычисляется, и азимутальный угол вектора Пойнтинга $\varphi_p = \text{atan2}(-\text{Re}(J_{12}), \text{Re}(J_{13}))$. В отличие от обычной функции $\arctan(y/x)$, которая возвращает результат в диапазоне $[-\pi/2, \pi/2]$, функция $\text{atan2}(y, x)$ использует знаки аргументов для определения квадранта, в котором лежит вектор, и возвращает результат во всем диапазоне углов $[-\pi, \pi]$. Для анализа поляризации магнитного поля удобно пользоваться индексом круговой поляризации $P_c = 2\text{Im}(J_{23}) / (J_{22} + J_{33})$ [Рытов, 1966], который также выражается через эле-

менты ковариационной матрицы. Индекс круговой поляризации изменяется в промежутке $[-1, +1]$, положителен для правополяризованных волн и отрицателен для левополяризованных волн. Близость P_c к нулю говорит о линейной поляризации.

Стоит отметить, что результаты анализа углов прихода аврорального хисса зависят не только от точности измерений компонент поля, но и точности определения ориентации измерительных антенн. Особенностью экспедиции СП-41 был постоянный дрейф ледовой платформы, из-за чего положение научно-исследовательского судна, а вместе с ним и антенн ОНЧ-приемника, постоянно менялось. Несмотря на то, что в течение всего времени эксперимента велись записи азимута судна, в 2024 г. в связи с подвижками льда был проведен перенос антенн приемника и возникла необходимость верификации их направления. Для этого были использованы сигналы передатчиков радионавигационной системы РСДН-20 («Альфа»), излучающих на частотах ОНЧ-диапазона: 11.9, 12.6 и 14.9 кГц. Эти передатчики расположены в Ревде, Новосибирске, Краснодаре и Комсомольске-на-Амуре. Многочисленные исследования особенностей распространения сигналов ОНЧ-передатчиков в волноводе Земля — ионосфера показали, что на расстояниях больше 1000 км радиосигнал распространяется по дуге большого круга, соединяющей передатчик и приемник, что и было использовано при верификации. Расчет направления распространения производился по компонентам ковариационной матрицы. Сравнение получившегося в результате расчета направления распространения сигнала с ожидаемым направлением на передатчик позволило учесть при обработке текущую ориентацию антенн.

Получение дополнительной информации о случайном характере регистрируемого на земной поверхности аврорального хисса возможно при оценке плотности распределения параметров его поля. Поскольку представляет интерес направление прихода волн в точку наблюдений, чтобы учесть случайную структуру поля, мы проводили расчет распределений плотности потока энергии по азимутальному углу вектора, направление которого обратно направлению вектора Пойнтинга, — обратному азимуту $\varphi_{\text{бр}} = \varphi_p + 180^\circ$. Для этого выбирался сегмент записей компонент поля с настолько большой длиной, чтобы обеспечить статистическую устойчивость оценки распределения, и настолько малой длиной, чтобы обеспечить приемлемое разрешение во времени. Для выбранного сегмента строился его спектр и выбиралась полоса частот для оценки распределения. Для каждого отсчета, принадлежащего сегменту, рассчитывался обратный азимут $\varphi_{\text{бр}}(k)$ и поток мощности, представляемый вектором, направление которого обратно направлению вектора Пойнтинга

$$S(k) = \left[(\text{Re}(J_{12}))^2 + (\text{Re}(J_{13}))^2 \right]^{1/2},$$

где k — номер отсчета; $k=1, 2, \dots, K$, K — число отсчетов в сегменте. Диапазон возможных значений

обратного азимута $(0, 2\pi)$ был поделен на N интервалов равной ширины. После этого формировалась выборка S_1, S_2, \dots, S_N из набора K , включающая отсчеты S со значениями обратного азимута, попадающими в интервал углов с номером $i=1, 2, \dots, N$. Оценка распределения плотности потока энергии по обратному азимуту рассчитывалась как сумма элементов каждого набора S_i , деленная на K и на ширину ячейки. В этом случае максимум распределения S по обратному азимуту $\varphi_{\text{бр}}$ указывает на наиболее вероятное направление на область выхода хисса из ионосферы к земной поверхности, обратное направлению вектора потока энергии в точке наблюдения.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе мы рассмотрим несколько наиболее интересных случаев регистрации всплесков аврорального хисса на ледостойкой платформе во время эксперимента СП-41 и сравним полученные результаты с наблюдениями на станции «Ловозеро» и в обсерватории «Баренцбург».

Событие 24.01.2023

Первый рассматриваемый случай, произошедший 24.01.2023 в 12:00 UT, демонстрирует регистрацию аврорального хисса на трех станциях одновременно. Платформа находилась в это время в точке с координатами 85.8° N , 137.6° E , расстояние между платформой и станцией «Ловозеро» составляло 2600 км, а между платформой и обсерваторией «Баренцбург» — 1630 км. Для этого времени индекс $AL = -20$ нТл, $Dst = -9$ нТл, что характеризует спокойные геомагнитные условия.

На рис. 2, а приведены спектрограммы спектральной плотности мощности горизонтальной компоненты магнитного поля на трех станциях. Вертикальные темные полосы на спектрограмме, построенной по данным LSP, — это пропуски данных в исходном файле. Видно, что всплески хисса на спектрограммах на всех станциях практически совпадают. Для детального рассмотрения поведения хисса во времени, на рис. 3, а приведены RMS_B — огибающие B_r , вычисленные в полосе частот 8–9 кГц, где авроральный хисс имеет максимум интенсивности, с 12:30 до 12:46 UT. Видно, что из всего набора коротких всплесков можно выделить два, значимых по амплитуде и действительно произошедших в одинаковое время на всех трех станциях, — те, что наблюдаются на 36-й и на 39-й минутах.

Отметим, что амплитуда этих всплесков хисса на LSP была примерно в 1.5 раза больше, чем в BAV, и примерно в 2.5 раза больше, чем в LOZ. На рис. 2, в приведен индекс круговой поляризации. В LOZ и BAV он принимает значения вблизи нуля, что говорит о линейной поляризации волн. По данным LSP индекс P_c равен -0.26 и -0.37 для первого и второго всплесков хисса соответственно. Присутствующая здесь слабая левая поляризация может свидетельство-

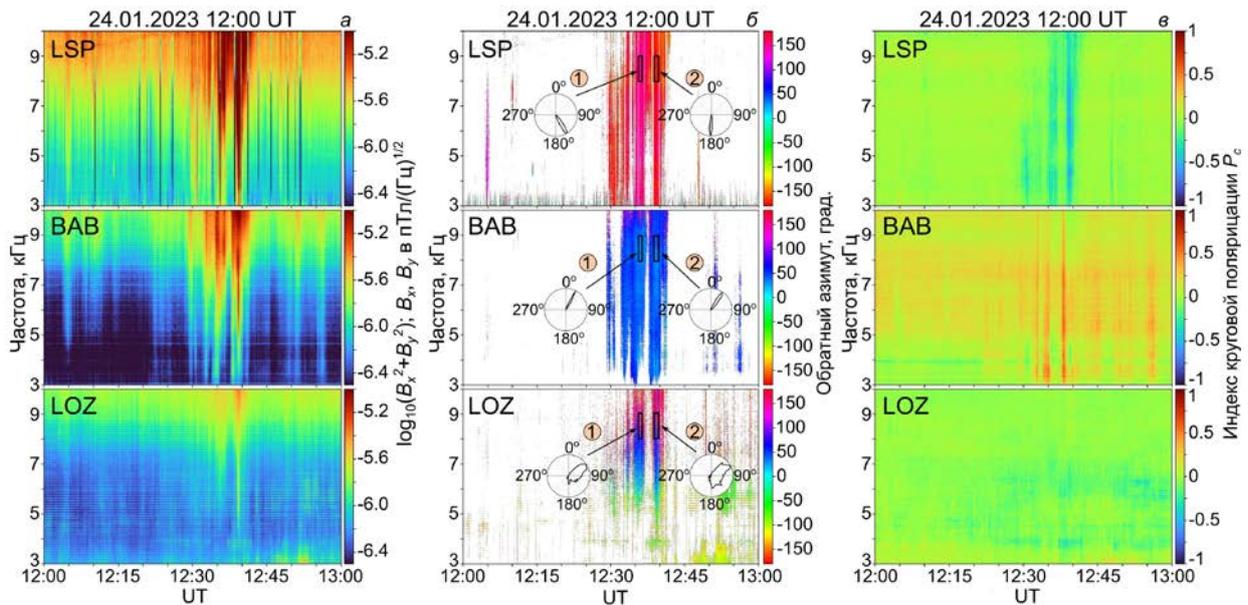


Рис. 2. Зависимости спектральной плотности мощности B_r (а), усредненных по времени значений ϕ_{bp} (б) и P_c (в) от времени и частоты на LSP, в обсерватории «Баренцбург» и на станции «Ловозеро» (сверху вниз) для интервала 12:00–13:00 UT 24.01.2023. Дополнительно на центральной панели в полярных координатах показаны нормированные распределения плотности потока энергии по ϕ_{bp} для выделенных участков спектрограмм

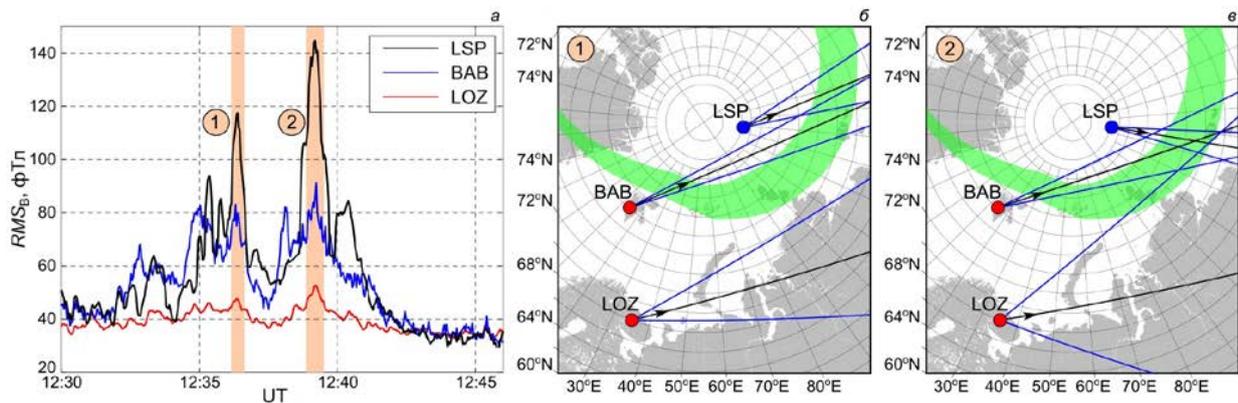


Рис. 3. Зависимости RMS_B от времени в полосе частот 8–9 кГц для трех станций: LSP (черная кривая), BAB (синяя кривая) и LOZ (красная кривая) для 24.01.2023 (а); карты с указанием наиболее вероятного направления на область выхода хисса (черная линия со стрелкой) и диапазона возможных направлений (область, ограниченная синими линиями) для первого и второго всплесков соответственно (б, в). Зеленым цветом показана область аврорального овала по модели [<http://apm.pgia.ru/>]

вать об удалении LSP от области выхода хисса на 300–400 км.

Рассматриваемые всплески хисса произошли одновременно на трех станциях. Огибающие этих всплесков близки по форме и отличаются в мелких деталях. Для объяснения схожести всплесков на больших расстояниях можно предположить, что рассеяние произошло на уединенной локальной области неоднородностей в ионосфере. Рассеянные волны с волновыми нормальными, попавшими в конус выхода к земной поверхности, вышли в волновод Земля—ионосфера и в дальнейшем, распространяясь в нем с малым затуханием, вызвали одновременное появление схожих по форме всплесков на расстояниях в несколько тысяч километров. В этом случае пространственное распределение свойств потока авроральных электронов, вызвавших генерацию всплесков аврорального хисса, не играет роли. Однако это

предположение противоречит как результатам моделирования [Никитенко и др., 2021], так и экспериментальным наблюдениям аврорального хисса на станциях, находящихся на расстояниях несколько сотен километров. Всплески аврорального хисса, регистрируемые на паре станций Каннуслехто—Ловозеро, не очень часто обнаруживают такую схожесть форм огибающих, как зарегистрированную в рассматриваемом случае на расстоянии в несколько тысяч километров. Отсюда следует, что предположение о распространении аврорального хисса в волноводе Земля—ионосфера на столь большие расстояния неправдоподобно.

Для рассматриваемого события 24.01.2023 характерно отсутствие геомагнитных возмущений. Можно предположить, что в этих условиях свойства потока мягких высыпавшихся электронов, который может вызвать генерацию квазиэлектростатических волн,

мало отличаются вдоль всей области высыпаний. В этом случае на высотах примерно от 10 до 20 тыс. км вдоль всей области высыпаний будут возникать распространяющиеся к Земле пакеты случайных квазиэлектростатических волн, средние значения мощности которых будут совпадать. Если на расстояниях до 300–400 км от каждой станции на высотах немного больших, чем высота НГР, будут присутствовать мелкомасштабные ионосферные неоднородности, обеспечивающие рассеяние квазиэлектростатических волн в конус выхода к земной поверхности, на станциях будут наблюдаться схожие по форме огибающие всплесков аврорального хисса.

На рис. 2, б приведены спектрограммы усредненных по времени значений азимутального угла $\varphi_{\text{вр}}$ вектора, направление которого обратно направлению вектора Пойнтинга, для трех станций. При построении спектрограмм использовались только те значения $\varphi_{\text{вр}}$, для которых соответствующие им значения B_i превышали квантиль порядка 0.85, т. е. были выше, чем 85 % всех значений B_i . Оставшиеся значения помечались белым цветом. Это было сделано для того, чтобы отсеять шумовую составляющую сигналов. Из рисунка следует, что на всех трех станциях угол $\varphi_{\text{вр}}$ практически не изменился от всплеска к всплеску. Частотная зависимость угла $\varphi_{\text{вр}}$, имеющая место в LOZ, вероятно, связана с тем, что мощность сигнала на этой станции довольно низкая и в нем велика доля шумов атмосфериков, которые не удалось полностью подавить при предварительной обработке данных.

Чтобы детально рассмотреть поведение углов $\varphi_{\text{вр}}$ для одновременных всплесков на трех станциях, были построены распределения плотности потока энергии по обратным азимутальным углам в диапазоне частот 8–9 кГц. Рассматриваемые участки выделены на центральной панели рис. 2 прямоугольниками, указанные распределения построены в полярных координатах и приведены рядом. На рис. 3, б, в показаны полученные из распределений диапазоны возможных направлений на область выхода хисса. Также на карту нанесена область высыпаний аврорального овала, полученная по модели [Vorobjev, Yagodkina, 2007] для данного момента времени и соответствующих геомагнитных условий [<http://apm.pgia.ru/>]. Видно, что схожие по форме всплески аврорального хисса приходят на станции LSP и ВАВ с разных участков области высыпаний, что свидетельствует в пользу предположения об однородности по пространству потока электронов. Широкий диапазон направлений потока энергии на станции «Ловозеро» может быть обусловлен близкой областью рассеяния, однако этому противоречит линейная поляризация магнитного поля. Скорее всего, разброс направлений связан с влиянием шумов.

Событие 25.01.2023

Наблюдение хисса 25 января 2023 г. в 04:12 UT было только на LSP, а через 8 ч, в 12:52 UT — только

в ВАВ. Этот случай, когда всплески наблюдаются лишь на одной из станций, демонстрирует локальность области выхода хисса. Платформа в это время дрейфовала вблизи точки с координатами 85.9° N, 138.7° E. Расстояние между платформой и станцией «Ловозеро» составляло 2600 км, а между платформой и обсерваторией «Баренцбург» — 1630 км. Геомагнитные условия были спокойными: индекс $AL = -10$ нТл, $Dst = -12$ нТл.

На рис. 4, а приведены спектрограммы спектральной плотности B_i указанных выше всплесков аврорального хисса на LSP и в ВАВ. На рис. 5, а, в приведены огибающие B_i в полосе частот 8–9 кГц на всех станциях с 04:00 по 04:25 UT и с 12:38 по 13:00 UT соответственно. Видно, что в обоих случаях хисс присутствует только на одной из станций, а амплитуды огибающих его всплесков сравнимы с амплитудами события 24.01.2023. На рис. 4, в приведены спектрограммы P_c . Видно, что оба всплеска аврорального хисса имеют правую поляризацию: $P_{\text{LSP}} = 0.8$, $P_{\text{ВВВ}} = 0.44$, что характерно для близкой области выхода. На рис. 4, б приведены спектрограммы азимутальных углов $\varphi_{\text{вр}}$ для интервалов времени 04:00–05:00 UT и 12:00–13:00 UT 25 января 2023 г. по данным станций LSP и ВАВ. Здесь же приведены распределения плотности потока энергии по $\varphi_{\text{вр}}$ наиболее мощных всплесков. Как и в первом случае, мы нанесли на карту диапазоны возможных направлений на области выхода хиссов, а также область аврорального овала (см. рис. 5, б, г).

Несмотря на то, что станция ВАВ в 04:12 UT находилась в предсказываемой моделью [Vorobjev, Yagodkina, 2007] области высыпаний, хисс здесь не был зарегистрирован. Скорее всего, в ВАВ не реализовались условия генерации квазиэлектростатических волн. Всплеск хисса в 04:12 UT был зарегистрирован только на LSP, находящейся в непосредственной близости от аврорального овала, причем поток энергии всплеска приходил с направления, противоположного местонахождению области высыпаний. Это можно объяснить с привлечением результатов работы [Никитенко и др., 2023], где показано, что сечение меридиональной плоскостью области засветки неоднородностей имеет две зоны шириной 300–400 км, одна из которых находится ближе к экватору, а другая — ближе к полюсу симметрично относительно подножия силовой линии магнитного поля, на которой происходит генерация. Можно предположить, что волны всплеска приходят из зоны, расположенной ближе к полюсу, чем сама станция.

В 12:52 UT уединенный всплеск хисса был зарегистрирован только в ВАВ. Все измеренные параметры всплеска соответствуют имеющимся представлениям о рассеянии пакета квазиэлектростатических волн на локальной области неоднородностей, находящейся вблизи ВАВ. Направление на область, из которой приходят волны в точку регистрации, совпадает с ожидаемым направлением на область высы-

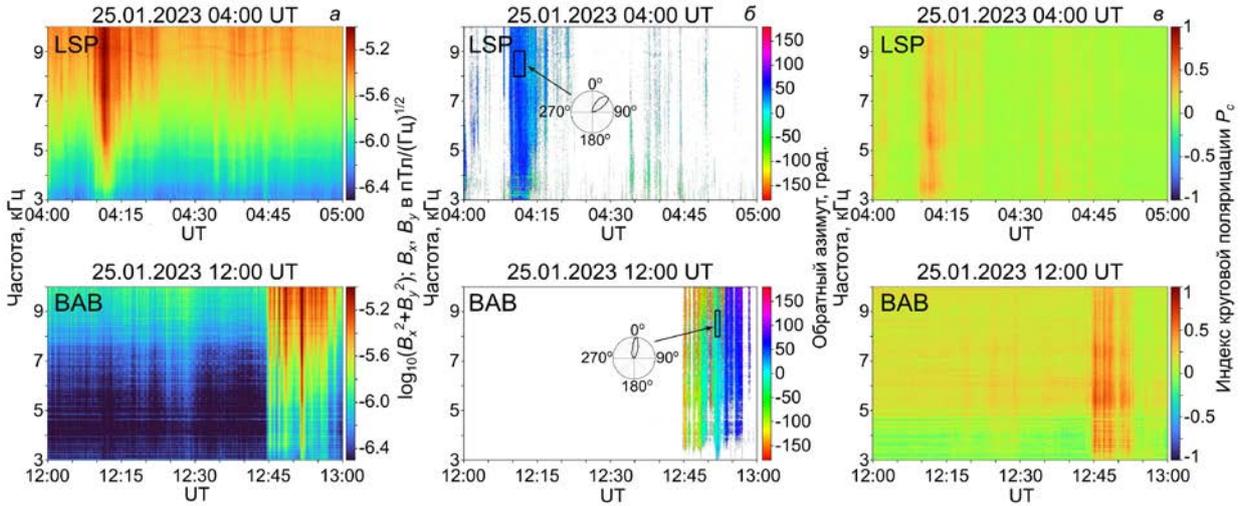


Рис. 4. Зависимости спектральной плотности мощности B_t (а), усредненных по времени значений ϕ_{bp} (б) и P_c (в) от времени и частоты на LSP и в обсерватории «Баренцбург» (сверху вниз) для интервалов времени 04:00–05:00 UT и 12:00–13:00 UT 25.01.2023 соответственно. Дополнительно на центральной панели в полярных координатах показаны нормированные распределения плотности потока энергии по ϕ_{bp} для выделенных участков спектрограмм

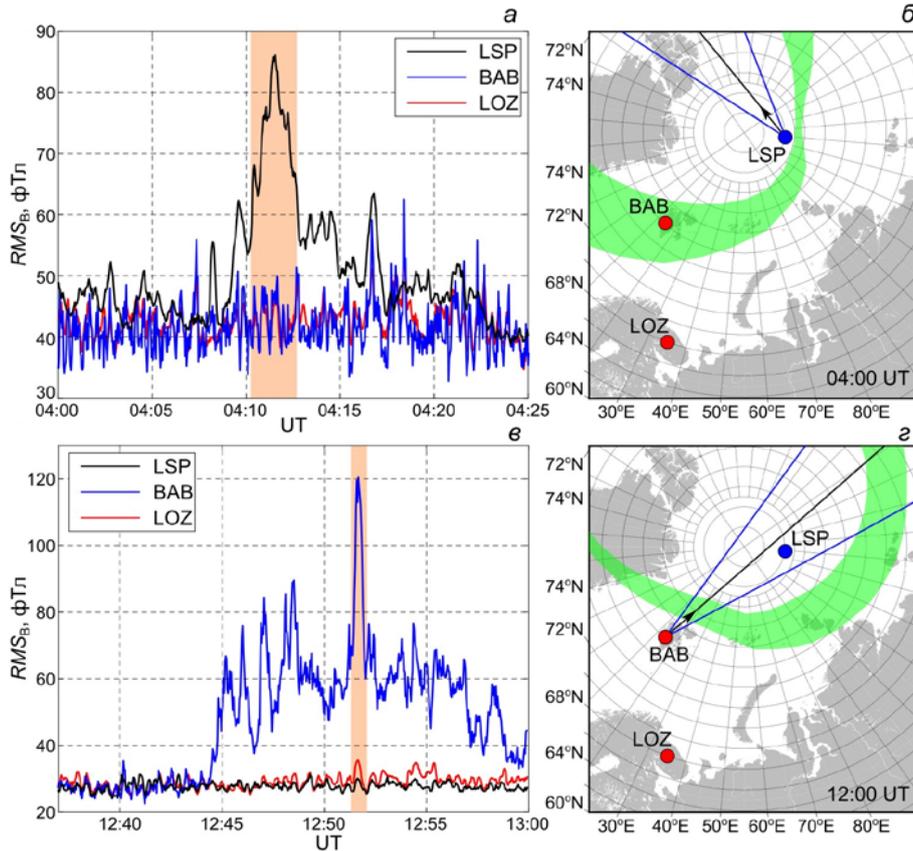


Рис. 5. Зависимости RMS_B от времени в полосе частот 8–9 кГц для трех станций: LSP (черная кривая), BAB (синяя кривая) и LOZ (красная кривая) для 25.01.2023 04:00 UT и 12:00 UT соответственно (а, в); карты с указанием наиболее вероятного направления на область выхода хисса (черная линия со стрелкой) и диапазона возможных направлений (область, ограниченная синими линиями) для 04:00 UT и 12:00 UT соответственно (б, г). Зеленым цветом показана область аврорального овала

паний. Положительное значение индекса поляризации $P_c=0.44$ свидетельствует о близости области выхода волн к земной поверхности к точке регистрации. Отсюда следует, что область рассеяния волн и ВАВ находятся близко друг к другу и вблизи области высыпаний, как показано на рис. 5, г.

Событие 12.03.2024

В заключение рассмотрим случай изолированного короткого всплеска аврорального хисса, зарегистрированного 12.03.2024 в 16:25 UT одновременно на всех трех станциях. Платформа в это время располагалась вблизи арх. Шпицберген в точке с координатами

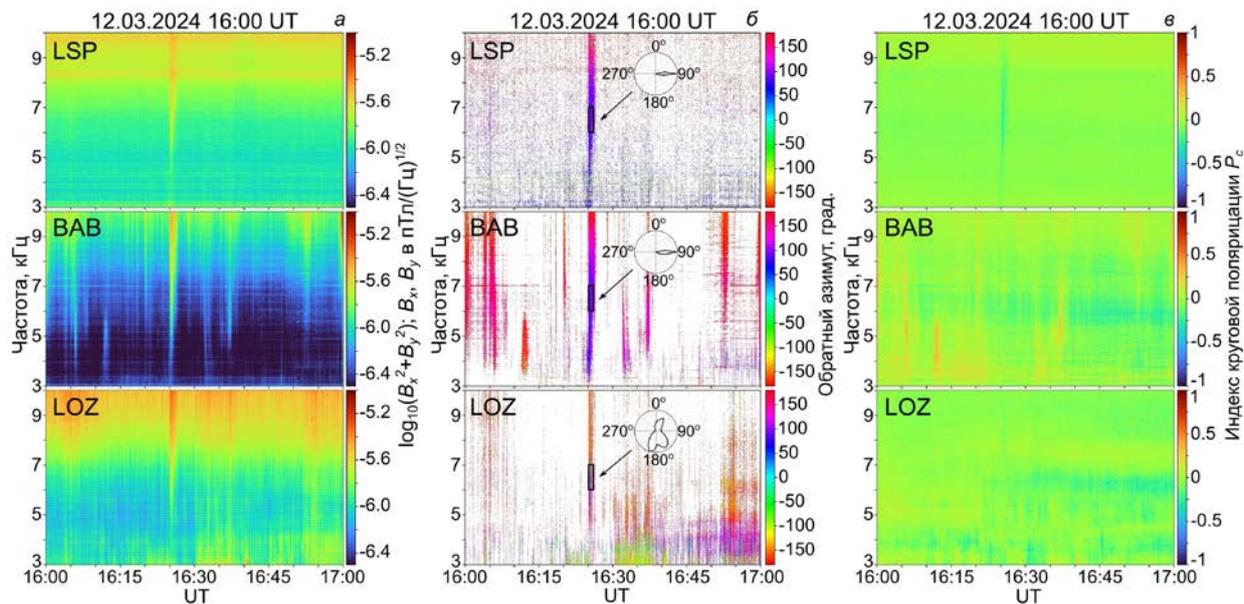


Рис. 6. Зависимости спектральной плотности мощности B_r (а), усредненных по времени значений φ_{br} (б) и P_c (в) от времени и частоты на LSP, в обсерватории «Баренцбург» и на станции «Ловозеро» (сверху вниз) для интервала 16:00–17:00 UT 12.03.2024. Дополнительно на центральной панели в полярных координатах показаны нормированные распределения плотности потока энергии по φ_{br} для выделенных участков спектрограмм

83.3° N, 20.4° E. Расстояние между платформой и станцией «Ловозеро» составляло 1740 км, а между платформой и обсерваторией «Баренцбург» — всего 590 км. Геомагнитные условия были спокойными: $AL = -10$ нТл, $Dst = -12$ нТл.

На спектрограммах спектральной плотности мощности B_r (см. рис. 6, а) видно, что в 16:25 UT на всех трех станциях зарегистрирован одиночный изолированный всплеск аврорального хисса. Анализ отношения сигнал/шум для данного случая показал, что на частотах 8–9 кГц присутствует много атмосфериков, которые не удалось подавить при предварительной обработке. Поэтому для дальнейшего анализа мы выбрали полосу 6–7 кГц, где отношение сигнал/шум максимально. По огибающим B_r в полосе частот 6–7 кГц (рис. 7, а) видно, что данный всплеск аврорального хисса в среднем меньше по амплитуде в 2–3 раза, чем в первых двух рассмотренных случаях (24 и 25 января 2023 г.), а амплитуда в BAB здесь почти в 2 раза больше, чем на LSP и в LOZ. Спектрограммы индекса поляризации P_c для данного случая показаны на рис. 6, в. Во время наблюдаемого всплеска хисса поляризация принимает следующие значения: $P_{cLSP} = -0.33$, $P_{cBAB} = -0.11$, $P_{cLOZ} = -0.17$.

Слабая левая поляризация в сочетании с малыми значениями среднеквадратичных амплитуд горизонтальной компоненты магнитного поля хисса указывают на удаленность области выхода от каждой из станций.

Распределения усредненных по времени значений φ_{br} (см. рис. 6, б) данного события на LSP и в BAB практически совпадают, а аналогичное распределение в LOZ сильно от них отличается — оно содержит три лепестка, из которых, по-видимому, только

один соответствует направлению на предполагаемую область выхода аврорального хисса (см. рис. 7, б). Он направлен на северо-восток в сторону аврорального овала, на спектрограмме φ_{br} обозначен синим цветом и не встречается больше ни в одном сегменте спектрограммы. Мы проанализировали распределение φ_{br} для шума для небольших промежутков времени до и после всплеска хисса. Оказалось, что шум состоит в основном из атмосфериков, распределение направлений которого ориентировано на юго-юго-запад. Это направление соответствует работе африканского грозового очага, который как раз должен быть активен в это время (15–19 UT). На распределении также выражено направление на юго-юго-восток, показанное на спектрограмме розовым цветом и повторяющееся в низкочастотном шуме (ниже 5 кГц) в интервале времени 16:50–17:00 UT.

Событие 12.03.2024, так же как и рассмотренное ранее событие 24.01.2023, характеризуется отсутствием геомагнитных возмущений. Совпадение огибающих среднеквадратичных амплитуд лучше, чем в событии 24.01.2023, и близко к идеальному. Расстояние между станциями LSP и LOZ составляло 1740 км, что меньше, чем во время события 24.01.2023, но достаточно велико для того, чтобы считать предположение о волноводном распространении всплесков маловероятным. Поэтому, на наш взгляд, более вероятно, что рассматриваемые всплески аврорального хисса, так же как и всплески события 24.01.2023, обусловлены вызвавшим генерацию квазиэлектростатических волн однородным по пространству потоком мягких высыпавшихся электронов в сочетании с присутствием мелкомасштабных

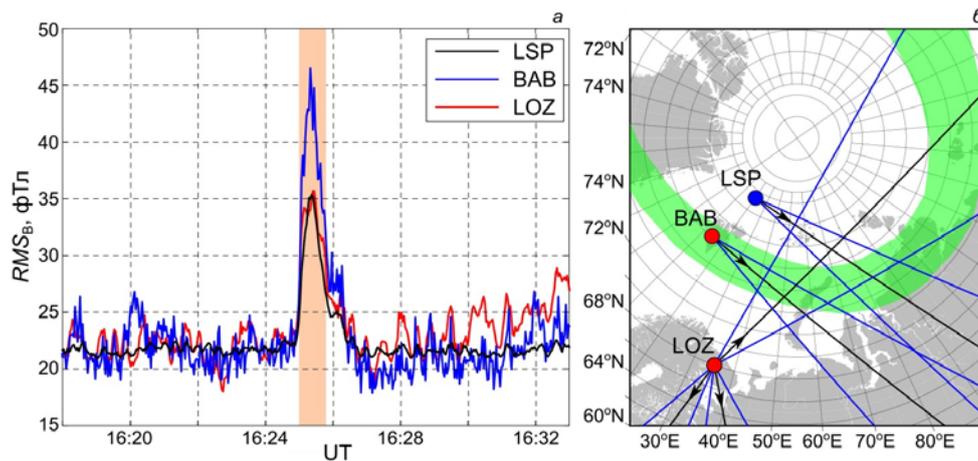


Рис. 7. Зависимости RMS_B от времени в полосе частот 6–7 кГц для трех станций: LSP (черная кривая), BAB (синяя кривая) и LOZ (красная кривая) для 12.03.2024 (а); карта с указанием наиболее вероятного направления на область выхода хисса (черная линия со стрелкой) и диапазона возможных направлений (область, ограниченная синими линиями) (б). Зеленым цветом показана область аврорального овала

ионосферных неоднородностей в окрестности каждой из трех станций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022–2024 гг. во время экспедиции на дрейфующей полярной станции «Северный полюс–41» были проведены измерения горизонтальных компонент магнитного поля и вертикальной компоненты электрического поля в ОНЧ-диапазоне. Одновременно с ОНЧ-наблюдениями на СП-41 велись измерения компонент электромагнитного поля на станции «Ловозеро» и в обсерватории «Баренцбург». В статье приведено краткое описание аппаратуры, методов первичной обработки данных и полученные для каждой станции с применением этих методов спектральная плотность мощности, поляризация и направления потока энергии всплесков аврорального хисса.

Мы рассмотрели три характерных ОНЧ-события, в одном из которых (25.01.2023) проявляется локальность области регистрации аврорального хисса, а в двух других (24.01.2023 и 12.03.2024) одновременно наблюдались всплески хисса с огибающими среднеквадратичных амплитуд, которые практически совпадают в трех точках, разнесенных на расстояние 2600 км и 1740 км соответственно. Локальность всплесков аврорального хисса неоднократно отмечалась ранее, в том числе наблюдалась в приполярной области во время экспедиции «Трансарктика–2019». Можно предположить, что локальность вызвана небольшими размерами областей мелкомасштабных неоднородностей на высотах 800–1200 км, на которых происходит рассеяние квазиэлектростатических волн, обеспечивающее прохождение хисса к земной поверхности.

Всплески аврорального хисса, регистрируемые в одно и то же время на станциях, отстоящих друг от друга на несколько тысяч километров, с амплитудами, изменения которых во времени хорошо коррелируют (событие 24.01.2023) или практически совпадают (событие 12.03.2024), по-видимому, наблю-

даются впервые. Предположение о распространении всплесков ОНЧ-хиссов от единственной локальной области выхода по волноводу Земля–ионосфера в точки регистрации, объясняющее схожесть всплесков на больших расстояниях, не подтверждается ни результатами наблюдений, ни результатами моделирования возбуждения волновода Земля–ионосфера пакетом волн, возникшим в результате рассеяния квазиэлектростатических волн на ионосферных неоднородностях. На наш взгляд, более вероятным является предположение об однородном во всей области выпадении потоке мягких авроральных электронов, генерирующих квазиэлектростатические волны на высотах 10–20 тыс. км, в сочетании с одновременным присутствием мелкомасштабных ионосферных неоднородностей в окрестности каждой из трех станций, на которых происходит рассеяние этих волн в конус выхода к земной поверхности.

Полученные данные важны для понимания процессов генерации и распространения ОНЧ-волн в приполярных областях и в области полярной шапки.

Данные наблюдений, использованные при написании статьи, были получены в экспедиции «Дрейфующая научно-исследовательская станция «Северный полюс–41», организованной ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ») Росгидромета на базе НЭС «Северный полюс». Финансирование экспедиции осуществлялось в рамках государственного задания ФГБУ «АНИИ». Авторы выражают глубокую признательность членам экспедиции, экипажу НЭС «Северный полюс» и сотрудникам станции «Ловозеро» и обсерватории «Баренцбург» за всестороннюю помощь при проведении исследовательских работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клейменова Н., Маннинен Ю., Громова Л. и др. Всплески ОНЧ-излучений типа «авроральный хисс» на земной поверхности на L 5.5 и геомагнитные возмущения. *Гео-*

О.М. Лебедь, С.В. Пильгаев, А.В. Ларченко,
Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова,
О.Ю. Стрибный, М.В. Филатов, М.В. Кузнецова,
А.С. Никитенко, Е.Б. Бекетова, Ю.В. Федоренко

O.M. Lebed, S.V. Pilgaev, A.V. Larchenko,
N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova,
O.Yu. Stribny, M.V. Filatov, M.V. Kuznetsova,
A.S. Nikitenko, E.B. Beketova, Yu.V. Fedorenko

- магнетизм и аэронавтика. 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 аэронавтика*. 2019, т. 59, № 5, с. 618–627. DOI: [10.1134/S0016794019050079](https://doi.org/10.1134/S0016794019050079).
- Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В. и др. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках. *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2021, т. 85, № 3, с. 398–403. DOI: [10.31857/S0367676521030200](https://doi.org/10.31857/S0367676521030200).
- Никитенко А.С., Федоренко Ю.В., Маннинен Ю. и др. Моделирование пространственной структуры волнового поля аврорального хисса и сравнение с результатами наземных наблюдений. *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2023, т. 87, № 1, с. 134–140. DOI: [10.31857/S0367676522700259](https://doi.org/10.31857/S0367676522700259).
- Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В. и др. Генератор сигналов специальной формы для калибровки регистраторов электромагнитного поля. *Приборы и техника эксперимента*. 2018, № 6, с. 49–55. DOI: [10.1134/S0032816218060125](https://doi.org/10.1134/S0032816218060125).
- Пильгаев С.В., Федоренко Ю.В., Клейменова Н.Г. и др. Первые результаты ОНЧ-наблюдений во время полярной экспедиции «Трансарктика–2019». *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2020, т. 60, № 2, с. 216–219. DOI: [10.31857/S0016794020020121](https://doi.org/10.31857/S0016794020020121).
- 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. *Приборы и техника эксперимента*. 2021, № 5, с. 115–125. DOI: [10.31857/S0032816221040248](https://doi.org/10.31857/S0032816221040248).
- Рытов С.М. *Введение в статистическую радиофизику*. М: Наука, 1966, 404 с.
- Budden K.G. The Propagation of Radio Waves: The Theory of Radio Waves of Low Power in the Ionosphere and Magnetosphere. *Cambridge University Press*, 1985, 669 p.
- Gurnett D.A. A satellite study of VLF hiss. *J. Geophys. Res.* 1966, vol. 71, p. 5500.
- Narang L., Larsen R. Radio wave emission in the VLF-band observed near the auroral zone. 1. Occurrence of the emissions during disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1965, vol. 27 (4), pp. 481–497. DOI: [10.1016/0021-9169\(65\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(65)90013-9).
- Jørgensen T.S., Ungstrup E. Direct observation of correlation between auroras and hiss in Greenland. *Nature*. 1962, vol. 194, pp. 462–463. DOI: [10.1038/194462a0](https://doi.org/10.1038/194462a0).
- Kimura I. Effects of Ions on Whistler-Mode Ray Tracing. *Radio Sci.* 1966, vol. 1, no. 3, pp. 269–284. DOI: [10.1002/rds196613269](https://doi.org/10.1002/rds196613269).
- Makita K. VLF/LF hiss emissions associated with aurora. *Memiors of National Institute of Polar Research*. Tokyo. Ser. A, 1979, no. 16, pp. 1–126.
- Manninen J., Kleimenova N., Kozyreva O., et al. Non-typical ground-based quasi-periodic VLF emissions observed at L 5.3 under quiet geomagnetic conditions at night. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 99, pp. 123–128. DOI: [10.1016/j.jastp.2012.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.05.007).
- Manninen J., Kleimenova N., Kozlovsky A., et al. Ground-based auroral hiss recorded in Northern Finland with reference to magnetic substorms. *Geophys. Res. Lett.* 2020, vol. 47. DOI: [10.1029/2019GL086285](https://doi.org/10.1029/2019GL086285).
- Means J.D. Use of the three-dimensional covariance matrix in analyzing the polarization properties of plane waves. *J. Geophys. Res.* (1896–1977). 1972, vol. 77, no. 28, pp. 5551–5559. DOI: [10.1029/JA077i028p05551](https://doi.org/10.1029/JA077i028p05551).
- Sazhin S.S., Bullough K., Hayakawa M. Auroral hiss: a review. *Planet. 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).
- 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, A8, pp. 18867–18883. DOI: [10.1029/1999JA000302](https://doi.org/10.1029/1999JA000302).
- Stix T. *Waves in Plasmas*. American Inst. of Physics, 1992.
- Vorobjev V.G., Yagodkina O.I. Auroral precipitation dynamics during strong magnetic storms. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2007, vol. 47, no. 2, pp. 185–192. DOI: [10.1134/s0016793207020065](https://doi.org/10.1134/s0016793207020065).
- Yearby K.H., Smith A.J. The polarization of whistlers received on the ground near L=4. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1994, vol. 56, no. 11, pp. 1499–1512. DOI: [10.1016/0021-9169\(94\)90117-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)90117-1).
- URL: <http://apm.pgia.ru/> (дата обращения 20 апреля 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Лебедь О.М., Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Борисова Т.Д., Стрибный О.Ю., Филатов М.В., Кузнецова М.В., Никитенко А.С., Бекетова Е.Б., Федоренко Ю.В. Первые результаты наблюдений авроральных шипений во время экспедиции «Северный полюс-41». *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 95–106. <https://doi.org/10.12737/szf-121202610>.