


**НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА
В ОБСЕРВАТОРИЯХ «ЛОВОЗЕРО» И «БАРЕНЦБУРГ»**
**GROUND-BASED OBSERVATIONS OF THE VLF AURORAL HISS
AT LOVOZERO AND BARENTSBURG OBSERVATORIES**

А.С. Никитенко 
Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, alex.nikitenko91@gmail.com

Н.Г. Клейменова 
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, ngk1935@yandex.ru

Ю.В. Федоренко 
Полярный геофизический институт РАН,
Апатиты, Россия, yury.fedorenko@gmail.com

Е.Б. Бекетова 
Филиал Мурманского арктического университета,
Апатиты, Россия, elena.beketova@gmail.com

A.S. Nikitenko
Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, alex.nikitenko91@gmail.com

N.G. Kleimenova
Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
Moscow, Russia, ngk1935@yandex.ru

Yu.V. Fedorenko
Polar Geophysical Institute RAS,
Apatity, Russia, yury.fedorenko@gmail.com

E.B. Beketova
Apatity Branch of Murmansk Arctic University,
Apatity, Russia, elena.beketova@gmail.com

Аннотация. Представлены результаты анализа всплесков аврорального хисса (шипения), зарегистрированных в обсерваториях «Ловозеро» и «Баренцбург». Они расположены на близких геомагнитных меридианах в авроральной и приполярной зоне. Установлено, что всплески хисса возникают сначала в авроральной зоне в обсерватории «Ловозеро». Затем они плавно затухают, после чего появляются в приполярной зоне в обсерватории «Баренцбург». Данные события происходят во время перемещения области геомагнитных возмущений и источника фазовых сцинтилляций GPS-сигналов из авроральных в приполярные широты. Анализ поляризации магнитного поля и азимутальных углов прихода всплесков хисса показал, что область на земной поверхности, засвеченная этими всплесками, возникала в авроральных широтах вблизи «Ловозеро», а затем также перемещалась на более высокие широты. Поскольку для выхода хисса к Земле и для возникновения сцинтилляций GPS-сигналов необходимо наличие в ионосфере неоднородностей электронной концентрации близких масштабов, мы предполагаем, что вызвать эти явления могли одни и те же неоднородности. Возможной причиной их возникновения является развитие токово-конвективной и/или дрейфовой неустойчивостей в ионосфере, обусловленных усилением продольных токов, на что указывает одновременное появление геомагнитных пульсаций Pi1B. Полученные результаты показывают, что прекращение хисса в авроральных широтах может быть вызвано смещением области геомагнитных возмущений на более высокие широты, а не изменениями условий распространения волн в ионосфере.

Ключевые слова: GPS-сцинтилляции, авроральные шипения, Pi1B-пульсации.

Abstract. The paper presents the results of the analysis of auroral hiss bursts, measured at Lovozero and Barentsburg observatories. These points are located on close geomagnetic meridians in the auroral and circumpolar zones. The auroral hiss bursts occur first in the auroral zone at Lovozero Observatory. Then, they fade out smoothly and occur in the circumpolar zone at Barentsburg Observatory. These events are observed when geomagnetic activity and the source of phase scintillation of GPS signals move from auroral to circumpolar latitudes. Analysis of magnetic field polarization and arrival angles of the bursts has shown that the area on the Earth surface, illuminated by hiss bursts, arose at auroral latitudes near Lovozero Observatory, and then moved to higher latitudes. Since propagation of the hiss to the ground and occurrence of GPS signal scintillation requires the presence of electron density irregularities of similar scales in the ionosphere, we assume that the same irregularities could cause both phenomena. A possible cause of their occurrence is the development of current-convective and (or) drift instability in the ionosphere caused by the development of field-aligned currents. Their development is indicated by the simultaneous recording of Pi1B pulsations. The results show that the termination of hiss at auroral latitudes may be caused by a shift of the geomagnetic disturbance region to high latitudes, rather than changes of wave propagation conditions in the ionosphere.

Keywords: GPS scintillation, auroral hiss, Pi1B pulsations.

ВВЕДЕНИЕ

Авроральный хисс (шипение) — шумоподобное электромагнитное излучение в диапазоне частот от нескольких килогерц до ~500 кГц с максимумом интенсивности на частотах 8–10 кГц [Makita, 1979; Sazhin et al., 1993]. Это одно из наиболее распространенных естественных свистовых излучений, регистрируемых как на спутниках, так и на земной поверхности в высоких широтах.

Генерация хисса происходит в результате развития черенковской неустойчивости высыпающихся электронов с энергиями ниже 10 кэВ [Jørgensen, 1968; Maggs, 1976; Makita, 1979]. Многочисленные спутниковые наблюдения показывают, что эти излучения хорошо коррелируют с потоками электронов с энергиями <1 кэВ [Hoffman, Laaspere, 1972; Mosier, Gurnett, 1972; Laaspere, Hoffman, 1976 и многие др.]. На земной поверхности хисс наблюдается в виде всплесков длительностью от 1 до 10–20 мин, которые часто сопровождаются увеличением яркости сияний или их перемещением [Harang, Larsen, 1965; Makita, 1979; Никитенко и др., 2022].

Условие возникновения черенковского резонанса для нижней части диапазона хисса ниже ~30 кГц соблюдается для волн с волновыми нормальными, лежащими под большими углами к внешнему магнитному полю [Sonwalkar, Hari Kumar, 2000]. Такие волны не могут достичь земной поверхности из-за отражения на высотах, где их частота совпадает с локальной частотой ниже-гибридного резонанса, или отражения в нижней ионосфере, где существует резкий градиент показателя преломления. Общеизвестным механизмом прохождения аврорального хисса к Земле является рассеяние на мелкомасштабных (меньше 1 км) неоднородностях в верхней ионосфере [Sonwalkar, Hari Kumar, 2000]. Рассеянные волны имеют широкий пространственный спектр. Часть этого спектра попадает в так называемый конус выхода и соответственно способна достичь земной поверхности. Понятие конуса выхода возникает при рассмотрении ионосферной плазмы как среды, параметры которой изменяются только с высотой. При распространении в такой среде горизонтальная компонента волнового вектора будет сохраняться в соответствии с законом Снеллиуса. Границы конуса определяются волнами, у которых вертикальная компонента волновой нормали равна нулю у поверхности Земли.

Авроральный хисс регистрируется у земной поверхности гораздо реже, чем на спутниках [Gurnett, 1966; Makita, 1979]. Этот факт указывает на то, что для наземных наблюдений этих излучений требуются условия в ионосфере, позволяющие волнам выйти к земной поверхности. Факторы, влияющие на возникновение условий выхода хисса к Земле, играют важную роль для исследования динамики ионосферной плазмы.

Последние исследования аврорального хисса в авроральных широтах показали, что эти излучения типичны для подготовительной фазы магнитосферной суббури и с началом суббури они внезапно прекра-

щаются [Клейменова и др., 2019]. Авторы предположили, что прекращение всплесков обусловлено увеличением поглощения волн в ионосфере, причиной которого могли быть высыпания энергичных частиц во время брейкапа. Кроме того, была отмечена тесная связь появления наземных всплесков хисса с усилением активности продольных токов.

В [Manninen et al., 2020] было показано, что в 58 событиях из 65 при регистрации хисса на авроральной станции «Каннуслахто» (Северная Финляндия) вблизи данной станции находилась область усиления продольных токов. По данным ОНЧ-наблюдений на приполярной станции «Южный Полус» в [Spasojevic, 2016] показано, что с большей вероятностью всплески хисса возникают в ситуации, когда максимум интенсивности продольных токов приближается по широте к точке наблюдения.

Как правило, во всех цитируемых работах рассматривались результаты ОНЧ-наблюдения лишь на какой-либо одной станции в авроральных или приполярных широтах. До настоящего времени нигде не проводилось исследований широтной динамики появления аврорального хисса на земной поверхности и сопоставлений одновременных наблюдений в авроральных и приполярных широтах.

В данной работе впервые исследуется широтная динамика выхода к земной поверхности всплесков аврорального хисса по данным одновременных наблюдений на двух точках, расположенных на разных широтах в одном долготном секторе. Мы используем данные, полученные в авроральной обсерватории «Ловозеро» (LOZ, Кольский п-ов, географические координаты $\varphi=67.97^\circ$ N, $\lambda=35.02^\circ$ E, исправленные геомагнитные координаты (CGM) $\Phi=64.7^\circ$, $\Lambda=113.1^\circ$) и приполярной обсерватории «Баренцбург» (BAB, арх. Шпицберген, $\varphi=78.09$ N, $\lambda=14.21^\circ$ E; $\Phi=75.21^\circ$, $\Lambda=126.06^\circ$, CGM). Поскольку на земной поверхности всплески аврорального хисса регистрируются преимущественно в зимний период [Manninen et al., 2020], для анализа мы выбрали ОНЧ-наблюдения в зимний период 2018–2019 гг. Было выявлено 17 событий, когда авроральный хисс регистрировался в этих точках в смежные временные интервалы, т. е. практически в один и тот же час. При этом в одиннадцати событиях не отмечалось каких-либо четких совпадений в появлении всплесков хисса. В этих событиях всплески хисса в авроральных широтах (в LOZ), как правило, отмечались в подготовительную фазу суббури, наблюдаемую на этом меридиане в авроральных широтах, и не регистрировались в BAB. А всплески хисса в BAB сопровождались слабыми полярными геомагнитными возмущениями, не связанными с суббурями, и появлялись вне зависимости от всплесков в LOZ.

В 6 из 17 событий в появлении всплесков хисса отмечалась четкая последовательность: всплески наблюдались сначала в авроральных (LOZ), а спустя 10–15 мин — в приполярных широтах (BAB). Ниже представлены результаты анализа трех наиболее ярких событий из шести: 5 января 2019 г., 21:00–22:00 UT; 9 декабря 2018 г., 19:00–20:00 UT; 1 марта 2019 г., 18:00–20:00 UT.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения электромагнитного поля аврорального хисса проводились с помощью разработанных и изготовленных в Полярном геофизическом институте трехкомпонентных приемников ОНЧ-сигналов [Пильгаев и др., 2021]. Оба приемника тщательно калиброваны с применением разработанного для этой цели низкочастотного генератора сигналов специальной формы [Пильгаев и др., 2018]. Проведенная калибровка позволила сравнивать результаты наблюдений на разнесенных точках.

Помимо ОНЧ-наблюдений мы также использовали данные меридиональной цепочки ст. PPN-NAL скандинавской сети магнитометров IMAGE [<http://space.fmi.fi/image>], индукционных магнитометров в точках LOZ и BAV, all-sky камер скандинавских обсерваторий Соданкюля (SOD, $\Phi=63.92^\circ$, $\Lambda=107.26^\circ$) и Кево (KEV, $\Phi=66.32^\circ$, $\Lambda=109.24^\circ$), а также данные наземных наблюдений сигналов GPS-спутников, регистрируемых на о. Медвежий (BJN, $\Phi=71.45^\circ$, $\Lambda=108.07^\circ$), Хопен (HOP, $\Phi=73.06^\circ$, $\Lambda=115.10^\circ$), Лонгйир (LYR, $\Phi=75.12^\circ$, $\Lambda=113.00^\circ$) и Нью-Олесунн (NAL, $\Phi=75.25^\circ$, $\Lambda=112.08^\circ$) [Oksavik, 2020]. На рис. 1 показана географическая карта с положением точек наземных наблюдений.

1.1. Анализ данных ОНЧ-наблюдений

Для данных цифровой регистрации компонент ОНЧ-поля была проведена предварительная обработка, которая включала удаление импульсных сигналов атмосфериков, обусловленных грозовыми разрядами, и гармоник линий электропередачи. Это позволило провести анализ поля на частотах выше 2–4 кГц.

Мы исследовали особенности динамики положения области на земной поверхности, засвеченной всплесками ОНЧ аврорального хисса (далее область

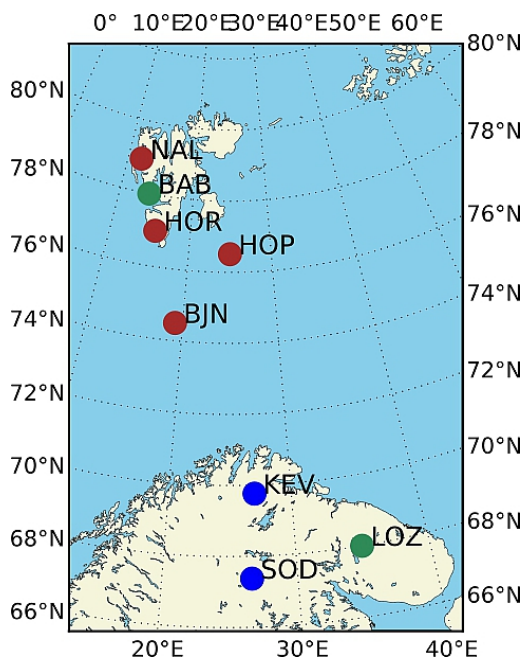


Рис. 1. Карта точек наблюдений аврорального хисса (зеленые кружки), GPS-сцинтилляций (красные) и полярных сияний (синие), построенная в географических координатах

засветки) [Никитенко и др., 2022, 2023], анализируя поляризацию магнитного поля излучений и направление прихода волн в точку наблюдений.

Для оценки поляризации мы использовали индекс круговой поляризации P_c [Рытов, 1966]. Он изменяется от -1 до $+1$ [Рытов, 1966], для волн с правой (левой) поляризацией принимает положительные (отрицательные) значения. В правополяризованной волне вектор магнитного поля вращается в направлении вращения электрона в геомагнитном поле [Stix, 1992]. $P_c=0$ означает, что волны линейно поляризованы, $|P_c|=1$ означает круговую поляризацию волн. Для оценки направления прихода волн в точку наблюдений мы рассчитывали азимутальный угол вектора, обратного вектору Пойнтинга. В данной работе азимутальный угол отсчитывается от направления на север.

При оценке азимутальных углов мы рассматривали их плотности распределения [Никитенко и др., 2022; Лебедь и др., 2019]. Максимум распределения азимутальных углов показывает наиболее вероятное направление на центр области засветки [Лебедь и др., 2019]. Чтобы анализировать временную динамику положения засвеченной области, для расчета распределения азимутальных углов выбирались короткие интервалы длительностью 1 с. Транспонируя в столбцы и располагая друг за другом рассчитанные распределения, мы формировали временную развертку ϕ_s . Это позволило анализировать динамику положения области засветки во времени.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 2 представлены магнитограммы высокоширотных станций IMAGE, построенные для трех 4-часовых интервалов, включающих интервалы наблюдения рассматриваемых событий. Видно, что авроральный хисс возникает во время геомагнитных суббурь, развитие которых начинается в авроральных широтах (ст. MUO-SOR), после чего область геомагнитных возмущений перемещается к полюсу.

На рис. 3, а, г, ж показаны спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля, построенные по данным наблюдений в обсерваториях LOZ и BAV для обсуждаемых событий. Видно, что эти события характеризуются тем, что в LOZ интенсивность всплесков хисса уменьшается от начала их возникновения, а в BAV увеличивается. Аналогичная картина наблюдается для всех шести событий. Наблюдаемые вариации магнитного поля хисса могут указывать на перемещение его области выхода из авроральных в приполярные широты.

2.1. Авроральный хисс и геомагнитные пульсации

Всплески аврорального хисса сопровождалась возникновением геомагнитных пульсаций типа Pi2 и Pi1B. На рис. 3 показаны спектрограммы X-компоненты геомагнитного поля в Pi1B диапазоне (0.02–1 Гц), построенные по данным наблюдений в LOZ и BAV (б, д, з), а также пульсации Pi2 (8–16 мГц), построенные по данным наблюдений на сети ст. IMAGE (в, е, и). Выделение пульсаций Pi1B как отдельный тип было впервые предложено в работе [Heasock,

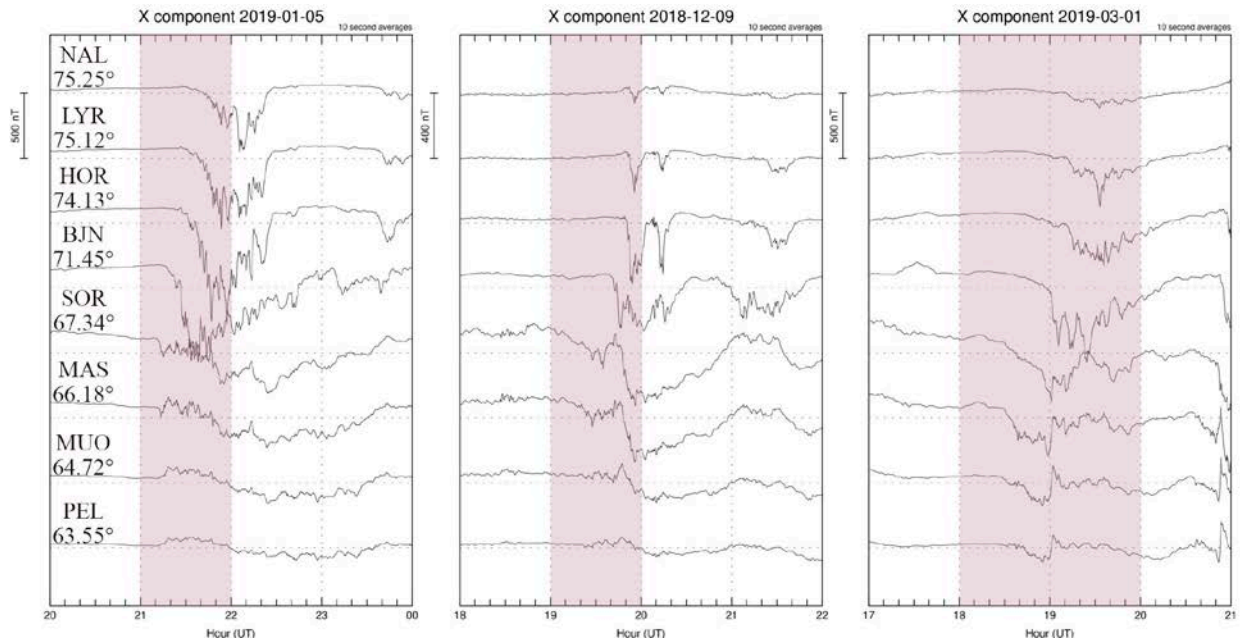


Рис. 2. Магнитограммы высокоширотных ст. IMAGE во время рассматриваемых событий. Розовое поле — время наблюдения аврального хисса в обсерваториях BAB и LOZ

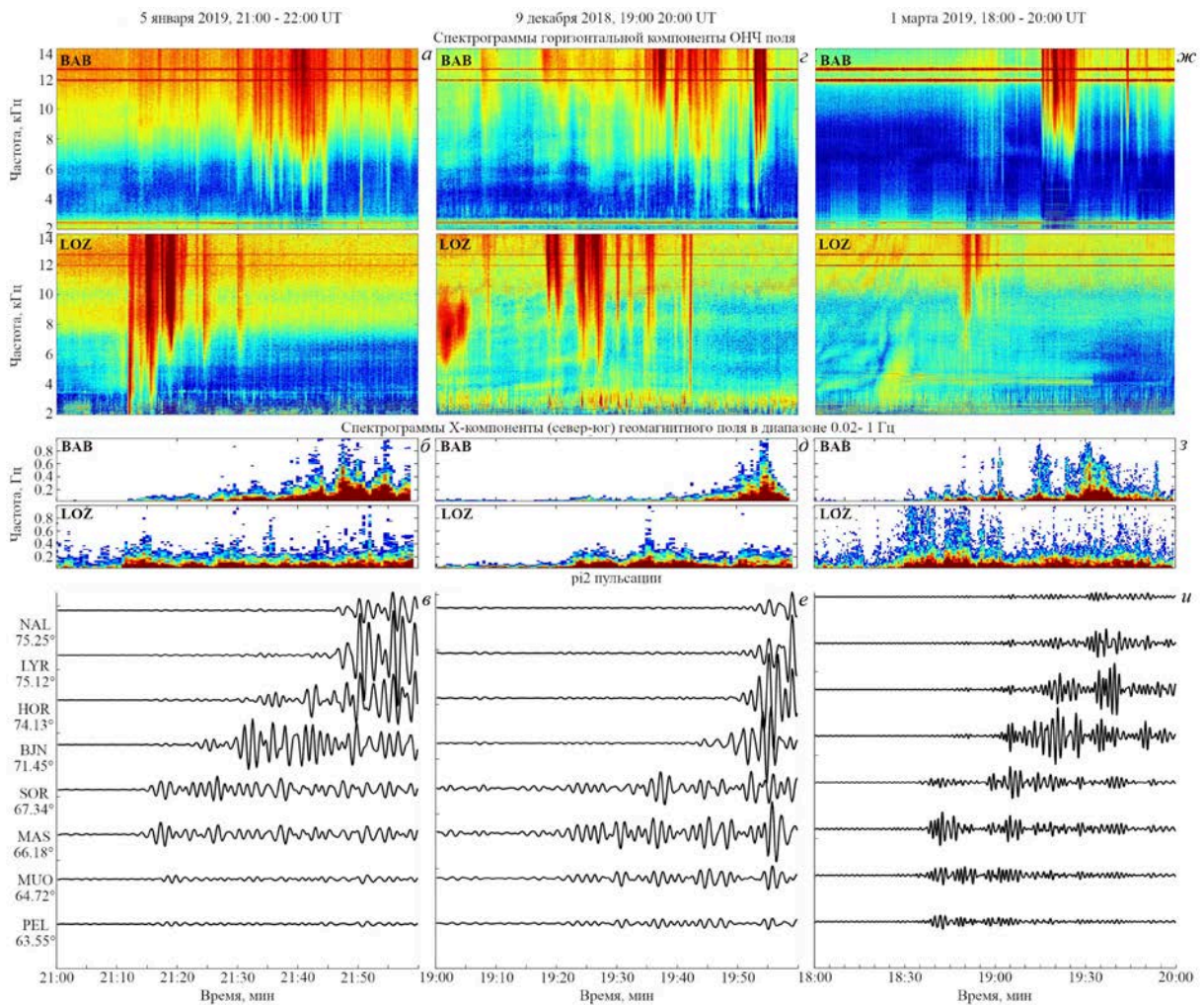


Рис. 3. Спектрограммы горизонтальных компонент магнитного поля в диапазоне 2–14 кГц (а, г, ж) и X-компоненты (север-юг) геомагнитного поля в диапазоне 0.02–1 Гц (б, д, з) по данным наблюдений в обсерваториях LOZ и BAB 5 января 2019 г., 21:00–22:00 UT, 9 декабря 2018 г., 19:00 UT и 1 марта 2019 г., 18:00–20:00 UT; в, е, и — Pi2-пульсации, построенные по данным магнитометров IMAGE во время рассматриваемых событий

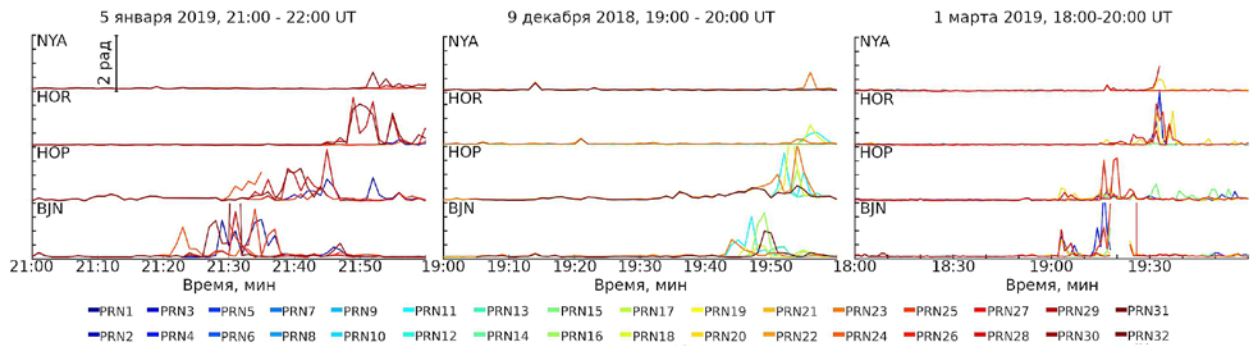


Рис. 4. Индекс фазовых скинтилляций сигналов GPS спутников на ст. BJN, HOP, HOR и NYA 5 января 2019 г., 21:00–22:00 UT, 9 декабря 2018 г., 19:00–20:00 UT и 1 марта 2019 г., 18:00–20:00 UT

1967]. Они тесно коррелируют со всплесками интенсивности полярных сияний и риометрического поглощения (например, [Kangas et al., 1979; Bösinger, Yahnin, 1987]), а также совместно с пульсациями типа P₁₂ являются индикатором начала суббури. Во всех событиях геомагнитные пульсации возникают сначала в авроральных широтах (LOZ), а спустя некоторое время в приполярных (BAB). Начало серии всплесков аврорального хисса в LOZ и возникновения пульсаций в авроральных широтах совпадало во всех событиях, кроме 1 марта 2019 г. в 18:00–20:00 UT. В этом событии хисс возник в LOZ спустя 10 мин после начала пульсаций. Стоит также отметить, что начало возникновения хисса в BAB совпало с началом возникновения суббури в BJN.

2.2. GNSS скинтилляции

Мы проанализировали результаты наземных наблюдений скинтилляций фазы GPS-сигналов на сети станций университета в г. Берген [Oksavik, 2020] (см. положение станций на рис. 1) во время обсуждаемых событий. Результаты наблюдений показаны на рис. 4. Мы учитывали только те спутники, у которых угол места составляет не менее 30°. Видно, что скинтилляции возникают в наиболее экваториальной точке этой сети (BJN) после начала аврорального хисса в LOZ. В остальных точках время начала скинтилляций увеличивается с ростом геомагнитной широты. Как известно [Kintner et al., 2007], скинтилляции спутниковых сигналов обусловлены их прохождением через область с неоднородностями электронной концентрации в ионосфере. Наблюдаемая задержка их начала с ростом широты, по-видимому, указывает на перемещение области с неоднородностями в сторону более высоких широт.

Регистрация скинтилляций в высоких широтах вызвана распространением GPS-сигнала в ионосфере через неоднородности с размерами от сотен метров до нескольких километров. Наземная регистрация аврорального хисса также указывает на существование в верхней ионосфере неоднородностей электронной концентрации подобных масштабов [Sonwalkar, Narikumar, 2000], на которых происходит рассеяние волн в конус выхода. Поскольку для возникновения скинтилляций и рассеяния хисса необходимы неоднородности близких масштабов, появление хисса сначала в LOZ, а затем в BAB и наблюдаемая ши-

ротная динамика появления скинтилляций указывают на наличие условий перемещения области засветки к полюсу.

2.3. Связь положения области рассеяния и геомагнитной активности

Мы оценили положение области засветки по данным наблюдений аврорального хисса в LOZ и BAB, чтобы исследовать возможную связь между возникновением этих излучений и перемещением области геомагнитных возмущений и источника GPS-скинтилляций к полюсу.

Событие 5 января 2019 г., 21:00–22:00 UT. На рис. 5, а–г показаны результаты расчета P_c и ϕ_s в обсерваториях LOZ и BAB для события 5 января 2019 г. 21:00–22:00 UT. В LOZ до 21:20 UT P_c близок к единице (см. рис. 5, а). Это означает, что регистрируемые волны имели правую поляризацию, близкую к круговой. После 21:20 UT P_c не превышал 0.2, т. е. преобладали практически линейно поляризованные волны. В BAB, напротив, P_c увеличивался со временем от практически нулевых значений до 0.5–0.6. Поляризация в данном случае, наоборот, менялась от линейной до правой круговой.

Волны магнитосферного происхождения с близкой к круговой правой поляризацией регистрируются в окрестности той области пространства, где они покидают ионосферу и выходят в волновод. Для обозначения этой области зачастую используется термин «область выхода» (например, [Ozaki et al., 2008]). Здесь доминирует прямая волна, не испытавшая отражений от стенок волновода Земля—ионосфера. Ее правая круговая поляризация обусловлена тем, что в анизотропной ионосфере распространяющейся модой является мода именно с такой поляризацией [Stix, 1992]. Линейно и левополяризованные волны наблюдаются на расстояниях, где начинает доминировать отражение от стенок волновода. Это обусловлено наличием более благоприятных условий для отражения левополяризованных волн, чем для волн с правой поляризацией. Таким образом, наблюдаемые изменения поляризации в LOZ указывают на удаление области засветки от точки наблюдений. Согласно данным в BAB, в это время область засветки, напротив, приближалась к точке наблюдений.

Мы анализировали ϕ_s хисса, чтобы проверить, происходило ли в рассматриваемых событиях переме-

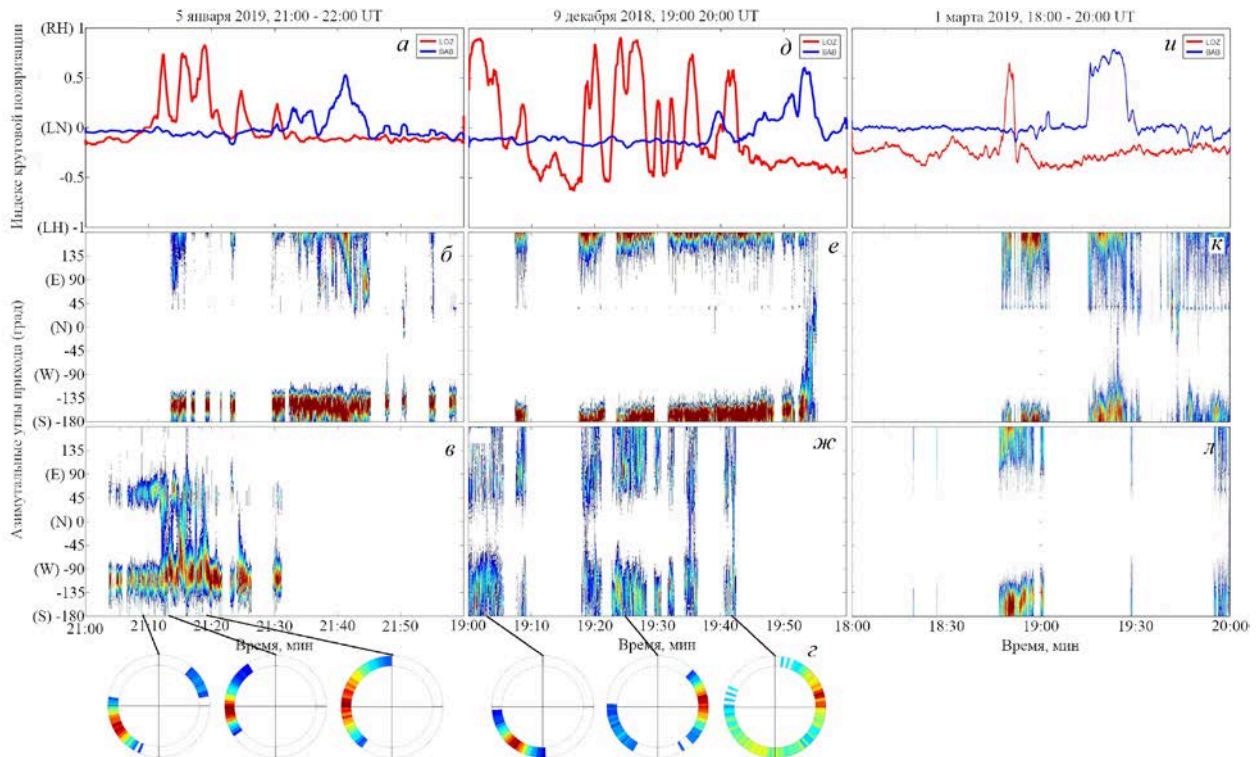


Рис. 5. Для 21:00–22:00 5 января 2019 г., 19:00–20:00 9 декабря 2018 г., 18:00–20:00 UT 1 марта 2019 г. индекс P_c (а, д, u) по данным наблюдений в LOZ (красный) и BAV (синий); составленные друг за другом гистограммы распределения φ_s в BAV (б, е, к) и LOZ (в, ж, л), а также гистограммы углов, рассчитанные для разных интервалов по данным наблюдений в LOZ и построенные на окружности (z, з)

шение области засветки к полюсу. На рис. 5, б, в показаны составленные друг за другом гистограммы распределения φ_s , рассчитанные по данным наблюдений в LOZ и BAV для рассматриваемого события. Для наглядности на рис. 5, з отдельно показаны гистограммы углов, рассчитанные для трех интервалов по данным наблюдений в LOZ и построенные на окружности. Видно, что в LOZ положение максимума гистограмм менялось от -110° в начале наблюдений до -80° в конце. Такие вариации означают изменение прихода волн в точку наблюдений с направления запад–юго-запад на направление запад–северо-запад, т. е. в данном случае происходило перемещение области засветки на более высокие широты. Стоит отметить, что примерно до 21:16 UT в LOZ в отдельные моменты времени регистрировалось многомодовое распределение φ_s . Это, по-видимому, означает одновременное существование нескольких областей засветки. Такая ситуация могла быть вызвана рассеянием волн в нескольких зонах, заполненных мелкомасштабными неоднородностями [Никитенко и др., 2022].

В BAV в начале наблюдения хисса максимум распределения φ_s принимал значения примерно 180° (см. рис. 4, б). Такие углы означают направление прихода волн в точку наблюдений с юга. Когда регистрируются максимальные значения интенсивности хисса и индекса P_c (см. рис. 4, а), максимум этого распределения смещается к значению $\sim 90^\circ$. В этот момент область засветки находилась практически на одной широте с BAV, но восточнее этой

точки. Полученные результаты также свидетельствуют о перемещении области засветки на более высокие широты.

Согласно полученным данным, в окрестности LOZ возникают всплески хисса, но их область засветки удаляется на более высокие широты. В BAV, напротив, регистрируется хисс с областью засветки, приближающейся к этой точке. На основании результатов проведенного анализа можно предположить, что наблюдаемые в этих точках всплески хисса могут генерироваться одним источником, перемещающимся к полюсу. Стоит отметить, что, согласно полученным данным, в окрестности LOZ перемещение происходит вдоль меридиана западнее этой точки, в то время как обсерватории LOZ и BAV находятся практически на одном геомагнитном меридиане. К сожалению, отсутствие точки наблюдений между ними не позволяет более точно отследить траекторию перемещения области засветки.

Событие 9 декабря 2018 г., 19:00–20:00 UT. Динамика P_c и φ_s вектора Пойнтинга в LOZ и BAV в данном событии схожа с наблюдаемой в событии, описанном выше. Результаты измерений этих параметров показаны на рис. 5, д, з.

В начале возникновения всплесков хисса в LOZ P_c был близок к единице. Когда интенсивность волн начинала падать (см. рис. 2, з), его значения уменьшались. Поляризация в данном случае менялась от правой круговой к эллиптической. Это, как было отмечено выше, вызвано удалением области засветки от точки наблюдений.

Максимум распределения ϕ_S в начале серии всплесков в LOZ указывает на приход волн в точку наблюдений с юго-запада, а к концу этой серии волны начали приходить преимущественно с направлений восток–северо-восток и северо-восток (см. рис. 4, ж, з). Таким образом, область засветки проходила мимо LOZ в сторону более высоких широт в северо-восточном направлении.

В ВAB P_c менялся от нуля, что соответствует линейной поляризации, до значений, близких к единице, которые наблюдаются при правой круговой поляризации (см. рис. 5, д). Как следует из наблюдаемой динамики изменения положения максимума распределений ϕ_S , излучения сначала приходили в точку наблюдений с юга, а к концу всплесков направление прихода изменилось на северное и северо-восточное (см. рис. 5, е).

Согласно рассуждениям, приведенным выше, в данном событии происходило перемещение области засветки из авроральных широт к полюсу. Стоит отметить, что, несмотря на общую тенденцию смещения области засветки к полюсу, в авроральных широтах это перемещение происходит не вдоль меридиана.

Событие 1 марта 2019 г., 18:00–20:00 UT. В данном событии в отличие от остальных не наблюдалось плавного перемещения области засветки по широте. При этом вариации геомагнитного поля, геомагнитных пульсаций и GPS-сцинтилляций схожи с наблюдаемыми в остальных пяти событиях.

В LOZ P_c (см. рис. 5, л) уменьшается со временем, а направление прихода волн меняется с южного на юго-западное, после чего всплески резко пропадают. Таким образом, область засветки приближается к LOZ, но не доходит до широты обсерватории. В ВAB всплески резко возникли спустя несколько минут после их окончания в LOZ (см. рис. 5, к). Индекс P_c несколько увеличивается со временем (см. рис. 5, и). Положение максимума распределения ϕ_S практически не изменилось, что указывает на приход волн с юга. В данном случае область засветки не достигла широты ВAB.

Чтобы объяснить наблюдаемый скачок, мы проанализировали данные all-sky камер полярных сияний и результаты наземных наблюдений риометрического поглощения для исследования наличия условий генерации аврорального хисса и его выхода к земной поверхности. К сожалению, из-за плохих метеорологических условий анализ полярных сияний в точках LOZ и ВAB был невозможен, поэтому мы рассматривали данные на ст. KEV и SOD [https://space.fmi.fi/MIRACLE/ASC/asc_keograms_00.shtml] (см. карту на рис. 1). Данные риометрического поглощения взяты с финской сети риометров [<https://www.sgo.fi/Data/Riometer/riometer.php>]. Стоит отметить, что для остальных событий регистрации хисса, рассмотренных выше, в точках наблюдений полярных сияний на Кольском п-ове, Фенноскандии и на Шпицбергене погодные условия не позволяли провести наблюдения полярных сияний.

На рис. 6 представлены кеограммы полярных сияний в KEV и SOD и результаты измерения риометрического поглощения за интервал 1 марта 2019 г.

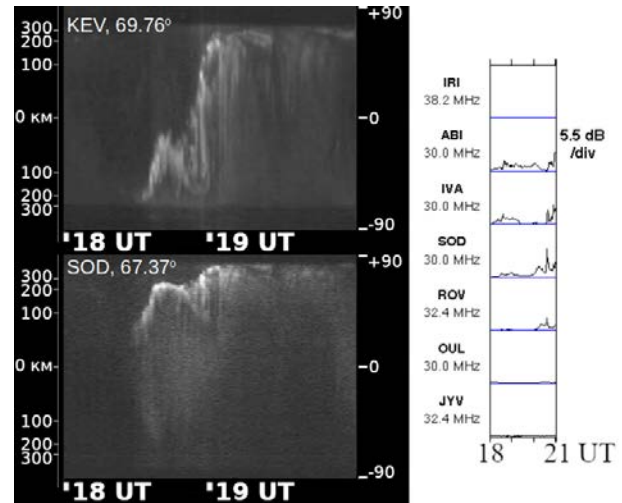


Рис. 6. Кеограммы полярных сияний в KEV и SOD и результаты измерения риометрического поглощения 1 марта 2019 г., 18:00–20:00 UT

18:00–20:00 UT. Из рисунка видно, что шипения наблюдались во время перемещения полярных сияний к полюсу. Наземная регистрация хисса тесно связана с возникновением полярных сияний [Makita, 1979; La Belle, Treumann, 2002], из чего следует, что регистрация сияний указывает на наличие условий выхода хисса к Земле. Перемещение сияний к полюсу могло вызвать перемещение области засветки в том же направлении.

На сети риометров фиксируется увеличение риометрического поглощения с ростом широты. Максимальное значение поглощения (около 1 дБ) наблюдалось севернее LOZ на ст. IVA и ABI. При таком уровне поглощения авроральный хисс может наблюдаться у земной поверхности [Клейменова и др., 2019], однако данные риометры используют, как правило, приемные антенны типа волнового канала с апертурами $\pm 45^\circ$ и более. Такие антенны не позволяют адекватно оценить локальные изменения электронной концентрации (менее 100–150 км в диаметре), обуславливающие затухание, из-за широкой диаграммы направленности антенн [Hunsucker, Hargreaves, 2007]. Поэтому в данном событии могла существовать локальная область увеличенной электронной концентрации, которая могла обеспечить высокий уровень измеренного риометрического поглощения в ограниченной области и сделать ионосферу закрытой для выхода аврорального хисса в окрестности точки наблюдений.

Поскольку в данном событии смещение к полюсу сияний указывает на смещение области генерации аврорального хисса, мы предполагаем, что резкое «исчезновение» излучений в LOZ могло быть вызвано локальным отсутствием условий его выхода к земной поверхности. Такие же скачкообразные изменения в положении области засветки, сопровождаемые увеличением риометрического поглощения с ростом широты, наблюдались еще в двух рассматриваемых случаях из шести.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе представлены результаты анализа поляризации магнитного поля и азимутальных углов

прихода всплесков аврорального хисса, зарегистрированных в обсерваториях LOZ и BAV, и сопоставление этих результатов с данными геомагнитных наблюдений и наблюдений GPS-сцинтилляций. Точки LOZ и BAV находятся на близких геомагнитных меридианах в авроральной и приполярной зонах. Рассматриваемые события характеризуются уменьшением интенсивности всплесков хисса в LOZ от начала их возникновения и их плавным появлением в BAV. События происходят во время перемещения области геомагнитных возмущений и источника фазовых сцинтилляций GPS-сигналов из авроральных в приполярные широты.

Согласно результатам анализа, область у земной поверхности, засвеченная всплесками хисса, возникает в авроральных широтах и перемещается к полюсу, что проявляется в наблюдении излучений в обсерваториях сначала LOZ, затем BAV. Поскольку перемещение области засветки, области геомагнитных возмущений и источника GPS-сцинтилляций происходит одновременно и в одном направлении, мы предполагаем, что эти процессы могут быть связаны.

Обсуждаемые события происходят во время слабых геомагнитных возмущений. Возмущения сопровождаются генерацией Pi2- и Pi1B-пульсаций, свидетельствующих о вторжении в ионосферу электронов (например, [Распопов, Троицкая, 1974]). Появление всплесков Pi1B-пульсаций может быть индикатором начала развития локальной суббури (например, [Arnoldy et al., 1998]). Описанный выше характер возмущений и скачкообразное перемещение к полюсу после их начала свойственны всем магнитосферным суббурям. Источником аврорального хисса могли стать высыпания мягких электронов, типичные для суббури.

Выход аврорального хисса в ОНЧ-диапазоне к наземному наблюдателю происходит за счет рассеяния волн на неоднородностях с масштабами не больше нескольких сотен метров. Неоднородности таких масштабов также обуславливают наблюдение сцинтилляций GPS-сигналов в высоких широтах. Наблюдение одновременного перемещения источника сцинтилляций и области засветки дает основание полагать, что на одних и тех же неоднородностях происходило рассеяние ОНЧ-волн и искажение GPS-сигналов.

Возможной причиной возникновения неоднородностей электронной концентрации, которые обеспечили выход хисса к земной поверхности и вызвали возникновение GPS-сцинтилляций, могло стать развитие токово-конвективной (current-convective) или (и) дрейфовой (типа $\vec{E} \times \vec{B}$) неустойчивости в ионосфере [Kelley et al., 1982]. Причиной развития таких неустойчивостей, по-видимому, послужило усиление электрических полей, вызванных суббуревыми токами. На наличие такого усиления указывает регистрация геомагнитных пульсаций типа Pi1B [Wilhelm et al., 1977]. Предположение подтверждается результатами работы [Kim et al., 2014]. Авторы обнаружили тесную временную и спектральную связь между сцинтилляциями и геомагнитными пульсациями Pi1B, что позволило им связать геомагнитные возмущения

и усиление электрических полей с наземной регистрацией GPS-сцинтилляций.

Полученные результаты согласуются с результатами нашей предыдущей работы [Nikitenko et al., 2024], в которой рассматриваются события одновременной регистрации всплесков аврорального хисса и геомагнитных пульсаций типа Pi1B. События отличались тем, что время начала и окончания всплесков шипений и пульсаций совпадали, а также была отмечена схожесть динамики положения области засветки и сопровождающих их полярных сияний. На основе полученных данных было также высказано предположение о возникновении неоднородностей, на которых происходит рассеяние шипений, также за счет развития токово-конвективной и (или) дрейфовой неустойчивости в ионосфере. В настоящей работе факт наличия неоднородностей подтверждается наблюдением GPS-сцинтилляций во время регистрации аврорального хисса.

Как было указано во введении, в ряде работ отмечается тесная связь между возникновением аврорального хисса и усилением продольных токов [Manninen et al., 2020; Spasojevic, 2016]. Мы предполагаем, что механизм этой связи может заключаться во влиянии продольных токов на формирование ионосферных неоднородностей, на которых происходит рассеяние хисса в конус выхода.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ поляризации магнитного поля и азимутальных углов прихода всплесков аврорального хисса, зарегистрированных в обсерваториях LOZ и BAV, и сопоставление полученных результатов с данными геомагнитных наблюдений и GPS-сцинтилляций. Рассматривались всплески, которые возникали сначала в авроральных широтах в обсерватории LOZ, а затем несколькими минутами позже в более высоких широтах в BAV. Анализ поляризации и азимутальных углов вектора Пойнтинга показал, что область на земной поверхности, засвеченная всплесками хисса, сначала находилась вблизи LOZ, а затем сместилась на более высокие широты.

Всплески аврорального хисса регистрировались в LOZ и BAV на фоне геомагнитных возмущений, развитие которых началось в авроральных широтах и затем, согласно данным сети IMAGE, сместилось на более высокие широты. Возникновение хисса сопровождалось генерацией геомагнитных пульсаций типа Pi1B в обсерваториях LOZ и BAV. При этом наблюдалась задержка во времени начала пульсаций, которая совпала с перемещением области засветки к полюсу.

К северу от LOZ на сети высокоширотных станций наблюдались GPS-сцинтилляции, время начала которых увеличивалось с увеличением магнитной широты. Эти наблюдения указывают на то, что перемещение засвеченной области аврорального хисса к полюсу сопровождалось перемещением ионосферных неоднородностей (с масштабами не более нескольких сотен метров), обуславливающих сцинтилляции. Поскольку за выход хисса к земной поверхности и возникновение GPS-сцинтилляций от-

вечают неоднородности близких масштабов, мы предполагаем, что наземную регистрацию хисса и GPS-сцинтилляций могли вызвать одни и те же ионосферные неоднородности. Причиной возникновения таких неоднородностей могло стать развитие токово-конвективной и (или) дрейфовой неустойчивости в ионосфере, обусловленных развитием продольных токов, на развитие которых указывает одновременная регистрация Pi1B-пульсаций.

Полученные результаты демонстрируют тесную связь между активностью хисса и динамикой суббури. Экспериментально показано, что в обсуждаемых событиях прекращение хисса в авроральных широтах вызвано смещением области геомагнитных возмущений на более высокие широты, а не изменениями условий распространения волн в ионосфере.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Громова Л.М. и др. Всплески ОНЧ-излучений типа «авроральный хисс» на земной поверхности на L 5.5 и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэрномия*. 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 аэрномия*. 2019. Т. 59, № 5. С. 618–627. DOI: [10.1134/S0016794019050079](https://doi.org/10.1134/S0016794019050079).

Никитенко А., Маннинен Ю., Федоренко Ю. и др. Пространственная структура области засветки ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в авроральных широтах. *Геомагнетизм и аэрномия*. 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).

Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Филатов М.В. и др. Генератор сигналов специальной формы для калибровки регистраторов электромагнитного поля. *ПТЭ*. 2018. № 6. С. 49–55. DOI: [10.1134/S0032816218060125](https://doi.org/10.1134/S0032816218060125).

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. *ПТЭ*. 2021. № 5. С. 115–125. DOI: [10.31857/S0032816221040248](https://doi.org/10.31857/S0032816221040248).

Распопов О.М., Троицкая В.А. Развитие суббури в геомагнитных пульсациях. Сб. Высокоширотные геомагнитные исследования. Л.: 1974. С. 232–247.

Рытов С. Введение в статистическую радиофизику. Наука, Глав. Ред. физико-математической лит-ры. 1966.

Arnoldy R.L., Posch J.L., Engebretson M.J., et al. Pi1 magnetic pulsations in space and at high latitudes on the ground. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, no. A10. P. 23581–23591. DOI: [10.1029/98JA01917](https://doi.org/10.1029/98JA01917).

Bösinger T., Yahnin A.G. Pi1B type magnetic pulsations as a high time resolution monitor of substorm development. *Ann. Geophys.* 1987. Vol. 5. P. 231–238.

Gurnett D.A. A satellite study of VLF hiss. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71, no. 23. P. 5599–5615. DOI: [10.1029/JZ071i023p05599](https://doi.org/10.1029/JZ071i023p05599).

Harang L., Larsen R. Radio wave emissions in the v.l.f.-band observed near the auroral zone—occurrence of emissions during disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1965. Vol. 27, no. 4. P. 481–497. DOI: [10.1016/0021-9169\(65\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(65)90013-9).

Heacock R.R. Two subtypes of type Pi micropulsations. *J. Geophys. Res.* 1967. Vol. 72, no. 15. P. 3905–3917.

Hoffman R.A., Laaspere T. Comparison of very-low-frequency auroral hiss with precipitating low-energy electrons by the use of simultaneous data from two Ogo 4 experiments. *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77, no. 4. P. 640–650. DOI: [10.1029/JA077i004p00640](https://doi.org/10.1029/JA077i004p00640).

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. N.p.: Cambridge University Press, 2007.

Jørgensen T.S. Investigation auroral hiss measured on OGO-2 and Byrd station in terms of incoherent Cherenkov radiation. *J. Geophys. Res.* 1968. Vol. 73. P. 1055–1069. DOI: [10.1029/JA073I003P01055](https://doi.org/10.1029/JA073I003P01055).

Kangas J., Pikkarainen T., Golikov Yu., et al. Burst of irregular magnetic pulsations. *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 46. P. 237–247.

Kelley M.C., Vickrey J.F., Carlson C.W., Torbert R. On the origin and spatial extent of high-latitude F region irregularities. *J. Geophys. Res.* 1982. Vol. 87, no. A6. P. 4469–4475. DOI: [10.1029/JA087iA06p04469](https://doi.org/10.1029/JA087iA06p04469).

Kim H., Clauer C.R., Deshpande K., et al. Ionospheric irregularities during a substorm event: Observations of ULF pulsations and GPS scintillations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 114. P. 1–8. DOI: [10.1016/j.jastp.2014.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.03.006).

Kintner P.M., Ledvina B.M., de Paula E.R. GPS and ionospheric scintillations. *Space Weather*. 2007. Vol. 5. S09003. DOI: [10.1029/2006SW000260](https://doi.org/10.1029/2006SW000260).

Laaspere T., Hoffman R.A. New results on the correlation between low-energy electrons and auroral hiss. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81, no. 4. P. 524–530. DOI: [10.1029/JA081i004p00524](https://doi.org/10.1029/JA081i004p00524).

La Belle J., Treumann R. Auroral radio emissions, 1. Hisses, roars, and bursts. *Space Sci. Rev.* 2002. Vol. 101, no. 3. P. 295–440. DOI: [10.1023/A:1020850022070](https://doi.org/10.1023/A:1020850022070).

Maggs J.E. Coherent generation of VLF hiss. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81. P. 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.* 1979. Tokyo. Ser. A. № 16. P. 1–126.

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. e2019GL086285. DOI: [10.1029/2019GL086285](https://doi.org/10.1029/2019GL086285).

Mosier S.R., Gurnett D.A. Observed correlations between auroral and VLF emissions. *J. Geophys. Res.* 1972. Vol. 77, no. 7. P. 1137–1145. DOI: [10.1029/JA077i007p01137](https://doi.org/10.1029/JA077i007p01137).

Nikitenko A.S., Fedorenko Y.V., Kleimenova N.G. Simultaneous observations of the very low frequency auroral hiss, auroras, and irregular geomagnetic pulsations at the Lovozero Observatory. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2024. Vol. 88. P. 338–344. DOI: [10.1134/S1062873823705494](https://doi.org/10.1134/S1062873823705494).

Oksavik Kjellmar. The University of Bergen Global Navigation Satellite System Data Collection. DataverseNO. 2020. DOI: [10.18710/AJ4S-X394](https://doi.org/10.18710/AJ4S-X394).

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, no. 4. P. 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. *Planet. Space Sci.* 1993. Vol. 41. P. 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, no. A8. P. 18867–18883. DOI: [10.1029/1999JA000302](https://doi.org/10.1029/1999JA000302).

Spasojevic M. Statistics of auroral hiss and relationship to auroral boundaries and upward current regions. *J. Geophys.*

А.С. Никитенко, Н.Г. Клейменова,
Ю.В. Федоренко, Е.Б. Бекетова

A.S. Nikitenko, N.G. Kleimenova,
Yu.V. Fedorenko, E.B. Beketova

Res.: *Space Phys.* 2016. Vol. 121. P. 7547–7560. DOI: [10.1002/2016JA022851](https://doi.org/10.1002/2016JA022851).

Stix T. *Waves in Plasmas. American Inst. of Physics*, 1992.

Wilhelm K., Münch J.W., Kremser G. Fluctuations of the auroral zone current system and geomagnetic pulsations. *J. Geophys. Res.* 1977. Vol. 82, no. 19. P. 2705–2716. DOI: [10.1029/JA082i019p02705](https://doi.org/10.1029/JA082i019p02705).

URL: <http://space.fmi.fi/image> (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

URL: https://space.fmi.fi/MIRACLE/ASC/asc_keograms_00.shtml (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

URL: <https://www.sgo.fi/Data/Riometer/riometer.php> (дата обращения 22 апреля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Никитенко А.С., Клейменова Н.Г., Федоренко Ю.В., Бекетова Е.Б. Наземные наблюдения ОНЧ аврорального хисса в обсерваториях «Ловозеро» и «Баренцбург». *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. С. 41–50. DOI: [10.12737/szf-104202405](https://doi.org/10.12737/szf-104202405).