

На правах рукописи

*Никитенко*

**Никитенко Александр Сергеевич**

**Исследование распространения и рассеяния  
аврорального хисса на мелкомасштабных  
неоднородностях по данным наземных наблюдений**

Специальность 1.6.18 —  
«Науки об атмосфере и климате»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Полярный геофизический институт».

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент, зав. сектором оптических методов в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Полярный геофизический институт»  
**Федоренко Юрий Валентинович**

Официальные оппоненты: **Беспалов Петр Алексеевич**,  
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»,  
**Мальцева Ольга Алексеевна**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»,

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук

Защита состоится 03 марта 2025 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 24.1.238.03 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН) по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте [www.ipfran.ru](http://www.ipfran.ru) ИПФ РАН.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук



Малеханов Александр Игоревич

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Одним из проявлений активности космической погоды является генерация электромагнитных волн в магнитосфере Земли, в том числе излучений типа авроральный хисс. Это шумовое излучение с максимумом интенсивности на частотах 8-10 кГц, которые входят в ОНЧ диапазон (очень низкочастотный). Общепринятым механизмом выхода аврорального хисса к земной поверхности является рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации в верхней ионосфере.

Для получения информации о процессах рассеяния аврорально-го хисса и распространения рассеянных волн к земной поверхности необходимо привлечение наземных наблюдений. Их преимущество над спутниковыми заключается в том, что они позволяют исследовать продолжительные во времени процессы, происходящие в конкретной точке пространства, и отделить временные вариации поля от пространственных, вызванных перемещением спутника. Это имеет важное значение при исследовании шумовых излучений, параметры поля которых изменяются во времени случайным образом.

В настоящее время не вся информация, которую содержит поле аврорального хисса у земной поверхности, используется для исследования процессов рассеяния и распространения хисса. Все существующие методы анализа наземных данных основаны на рассмотрении усредненных значений параметров поля и для описания поля используют модели, не подходящие для анализа аврорального хисса. Во избежание потери информации, необходимо создание метода анализа, основанного на расчете плотности распределения параметров регистрируемого поля. Для связи структуры поля аврорального хисса у земной поверхности с процессами рассеяния и распространения в ионосфере необходима модель, описывающая все этапы его распространения до наземного наблюдателя и позволяющая связать экспериментальные и модельные статистические оценки параметров поля.

Таким образом, является актуальной задача создания средств и методов верификации результатов наземных измерений ОНЧ полей, методов анализа данных, а также модели распространения хисса, и применения этих инструментов для исследования процессов распространения и рассеяния аврорального хисса на мелкомасштабных неоднородностях по данным наземных наблюдений.

**Целью** работы является исследование процессов распространения и рассеяния аврорального хисса на мелкомасштабных неоднородностях с использованием наземных наблюдений.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие теории генерации и распространения аврорального хисса, средства наземной регистрации ОНЧ полей, методы анализа наземных данных, а также модели распространения ОНЧ волн, и на основе проведенного анализа определить теоретико-методологические основы для достижения поставленной цели.
2. Разработать и применить метод подавления сигналов атмосфериков и других помех в записях компонент поля, а также метод верификации оценки направления прихода регистрируемых волн, необходимые для анализа аврорального хисса и сравнения результатов наблюдений на разнесенных точках.
3. Разработать и применить метод анализа данных, учитывающий случайную структуру поля аврорального хисса, и численную модель распространения хисса от источника к земной поверхности, позволяющую сопоставить экспериментальные и модельные статистические оценки параметров поля.
4. По данным наземных наблюдений исследовать пространственную структуру области у земной поверхности, засвеченной авроральным хиссом; оценить положение областей с мелкомасштабными неоднородностями в верхней ионосфере и выявить закономерности в процессах генерации и распространения хисса, влияющие на структуру поля хисса у земной поверхности.

### Научная новизна:

1. Впервые разработан и применен метод анализа наземных данных, включающий оценку распределения плотности потока энергии по азимутальным углам прихода и моделирование распространения хисса от источника до наземного наблюдателя, обеспечивающий возможность сравнения экспериментальных и модельных статистических оценок параметров поля.
2. Впервые выявлены неизвестные ранее особенности формы, положения и размера области у земной поверхности, засвеченной авроральным хиссом, и ассоциированные с ними форма, положение и размер области в ионосфере, занятой мелкомасштабными неоднородностями.
3. Впервые выявлены неизвестные ранее особенности распространения аврорального хисса, обуславливающие локальность области у земной поверхности, засвеченной этими излучениями, и одновременные наблюдения хисса на разных широтах.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в получении новых сведений о пространственной структуре поля аврорального хисса у земной поверхности и особенностях его распространения в

магнитосфере и ионосфере Земли. Результаты работы важны для улучшения прогноза космической погоды и демонстрируют возможность создания средства диагностики состояния авроральной ионосферы по наземным данным.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. При совместном использовании разработанных автором диссертации метода анализа наземных данных и модели распространения аврорального хисса возможна оценка положения области с неоднородностями по данным наблюдений на одной станции.
2. Только рассеяние на высоте 800-1200 км, которая гораздо меньше предсказанной ранее, способно обеспечить наблюдаемую экспериментально локальность области, засвеченной всплесками хисса.
3. Одновременную регистрацию хисса в авроральных и приполярных широтах можно объяснить формированием в меридиональной плоскости двух разнесенных по широте волновых пучков, обусловленным равномерным распределением волновых нормалей квазиэлектростатических волн по азимутальным углам при их генерации в потоке электронов.

**Достоверность** определяется точностью исходных данных, согласованностью данных наблюдений с существующими теориями и моделями. Основные результаты обсуждались на различных конференциях и получили одобрение ведущих специалистов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ежегодных семинарах «Физика авроральных явлений» (Апатиты, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023), на конференциях «Наука и образование в арктическом регионе» (Мурманск, 2018, 2019), на всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике» (Мурманск, 2018), на ежегодных конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» (Москва, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2023), на международных конференциях «Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere» (Болгария, 2018, 2019), «Триггерные эффекты в геосистемах» (Москва, 2022), «VERSIM workshop» (Апатиты, 2018; Киото, 2020).

**Личный вклад.** Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема экспериментальных исследований, изложенных в диссертационной работе, включая анализ и оформление результатов в виде публикаций и научных докладов, а также в участии в разработке численных моделей и методик экспериментальных исследований.

**Благодарности.** Прежде всего я хотел бы выразить огромную благодарность своему научному руководителю Ю.В. Федоренко за веру в меня, неоценимую поддержку в написании диссертации и постоянную помощь как при работе над диссертацией, так и в целом в карьере. Хотел бы поблагодарить Н.Г. Клейменову за наставление и постоянную помощь, а также

Л.И. Громову за ценные советы и поддержку. Отдельную благодарность я выражаю сотрудникам сектора № 302 Полярного геофизического института за ценные обсуждения и замечания, а также сотрудникам обсерваторий «Ловозеро», «Баренцбург» и «Соданкюля» за высокопрофессиональное проведение экспериментов.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 15 печатных изданиях, 9 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК.

## Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируются цель и задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** содержит обзор литературы по особенностям генерации и выхода аврорального хисса к земной поверхности, а также оценивается возможность использования существующих регистраторов ОНЧ полей, методов анализа наземных данных, моделей распространения ОНЧ волн в околоземном пространстве для решения поставленных задач.

Авроральный хисс - это электромагнитное излучение с шумовым спектром от 2-4 кГц до нескольких сотен кГц с максимумом интенсивности на частотах 8-10 кГц [1]. Регистрируемый у земной поверхности хисс возникает в потоке высыпającychся электронов. Из-за особенностей генерации волновые нормали генерируемых волн ориентированы практически перпендикулярно линиям геомагнитного поля. В них электрическое поле доминирует над магнитным, в связи с чем такие волны принято называть квазиэлектростатическими [2]. Считается, что квазиэлектростатические волны, формирующие хисс, выходят к земной поверхности в результате их рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации ( $< 100$  м) [2]. При рассеянии формируется совокупность волн с широким пространственным спектром, часть которого достигает земной поверхности. Таким образом, результаты наземных наблюдений хисса могут быть использованы для исследования процессов распространения и рассеяния хисса на мелкомасштабных неоднородностях.

Основным недостатком большинства используемых современных наземных ОНЧ приемников является регистрация только горизонтальных компонент магнитного поля  $H_x$  и  $H_y$ . При оценке направления прихода волн в точку наблюдений - одного из основных параметров регистрируемого поля - возникает неопределенность 180 градусов. Для ее устранения в дополнение к компонентам  $H_x$  и  $H_y$  необходима регистрация вертикальной компоненты электрического поля  $E_z$ .

Существующие методы анализа наземных данных не учитывают случайную структуру поля. Для его описания у земной поверхности используется приближение плоской волны либо излучения представляются в виде гауссова пучка плоских волн, распространяющегося с высот нижней ионосферы (120-150 км).

Поле аврорального хисса является следствием суперпозиции множества случайных актов генерации и рассеяния квазиэлектростатических волн со случайными амплитудами, фазами и волновыми векторами. Во избежание потери информации, для анализа данных наземных наблюдений аврорального хисса необходим метод, учитывающий случайные изменения во времени параметров поля. Также для описания поля хисса у земной поверхности необходима модель его распространения от источника, обеспечивающая возможность сравнения экспериментальных и модельных статистических оценок параметров поля. Такая модель может быть построена с использованием приближения геометрической оптики для описания распространения в верхней ионосфере [3]. Расчет поля рассеянных волн целесообразно вести с использованием борновского приближения [4], а их распространения к Земле рассчитывать методом full-wave в приближении плоско-слоистой среды [5].

Во **второй главе** диссертации описан разработанный с участием автора диссертации регистратор ОНЧ полей, а также разработанные и примененные автором методы верификации направления прихода, подавления помех в записях компонент поля и метод оценки направления прихода волн в точку наблюдений, учитывающий случайный характер изменения во времени параметров поля аврорального хисса.

В работе используются измеренные в обс. Баренцбург (BAV, Архипелаг Шпицберген, 78.07° N, 14.21° E), обс. Ловозеро (LOZ, Кольский п-ов, 67.97° N, 35.02° E), Каннуслахто (KAN, Финляндия, 67.74° N, 26.27° E) и во время экспедиции «Трансарктика 2019» (TRE, в окрестности Земли Франца-Иосифа) компоненты поля  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$  с помощью откалиброванных малолшумящих регистраторов ОНЧ полей [A1].

Направление прихода волн в точку наблюдения, оцениваемое по измерениям компонент  $H_x$ ,  $H_y$  и  $E_z$ , верифицировалось по сигналам передатчиков радионавигационной системы РСДН-20, сравнивая истинный и измеренный азимуты на ее передатчики.

Для обеспечения возможности анализа данных на частотах выше 2-4 кГц в записях компонент поля проводилось подавление сигналов атмосфериков и сети 50 Гц. Поиск атмосфериков производился на приведенной к единицам поля огибающей горизонтальной компоненты магнитного поля  $H_\tau$ . Для этого использован адаптивный порог  $H_{tr} = 2.45\sigma_{opt}$ , где  $\sigma_{opt}$  - квантиль порядка 0.25 распределения  $H_\tau$ . У каждого выделенного импульса слева и справа от его максимума производился поиск границ - точек, в которых производная  $H_\tau$  меняет знак. Если границы импульса

находятся выше адаптивного порога, то выделенный участок расценивается как фрагмент последовательности импульсов и границы расширяются. Эта операция производится до тех пор, пока границы выделенного импульса не окажутся ниже заданного порога  $H_{tr}$ . После этого импульс или их последовательность вырезаются во всех трех компонентах, а границы зажимаются.

Для подавления помехи 50 Гц на спектре записей компонент поля вырезались гармоники в пределах их полосы. Полученные сегменты заполнялись комплексным белым дельта-коррелированным гауссовым шумом, ковариационная матрица которого соответствует средней матрице, вычисленной из спектров по краям удаленной полосы.

Чтобы учесть случайных характер изменения во времени параметров поля аврорального хисса, разработан метод анализа, основанный на расчете распределений плотности потока энергии по азимутальным углам вектора Пойнтинга  $p(\phi)$ . Для каждого отсчета из анализируемого интервала времени рассчитывался азимутальный угол вектора Пойнтинга и плотность потока энергии. Затем рассчитывалось распределение азимутальных углов, взвешенное на значение плотности потока энергии.

Результаты второй главы опубликованы в работах [A1—A4].

В третьей главе описана разработанная модель распространения аврорального хисса от источника до наземного наблюдателя, позволяющая связать результаты наземных наблюдений со структурой неоднородностей в верхней ионосфере.

Генерация хисса происходит в потоке электронов, ограниченном функцией Гаусса в плоскости поперек силовой линии геомагнитного поля. Для описания этого потока мы использовали максвелловское распределение электронов по скоростям и экспериментальное распределение, полученное в ходе ракетных измерений. Из распределения электронов по скоростям выбиравались электроны, удовлетворяющие условию возникновения резонанса Ландау [1].

Акты генерации распределены равномерно по высоте. Из условия совпадения проекции фазовой скорости возникающей волны и скорости электрона на направление силовой линии геомагнитного поля рассчитывались параллельные этому полю компоненты волновых нормалей  $n_{\parallel}$  квазиэлектростатических волн. Поперечные ( $n_{\perp}$ ) - рассчитывались из дисперсионного уравнения [6], считая их равномерно распределенными по направлению  $p(\phi_n) = \frac{1}{2\pi}$  и  $n_x = n_{\perp} \cos \phi_n$  и  $n_y = n_{\perp} \sin \phi_n$ , где  $\phi_n$  - азимутальный угол волновой нормали.

Для исследования особенностей распространения хисса без эффектов рассеяния мы рассматривали распространение совокупности квазиэлектростатических волн, формирующих авроральный хисс, в приближении геометрической оптики [3].

Для описания рассеяния квазиэлектростатических волн использовано борновское приближение [4]. Расчет распространения пучка квазиэлектростатических волн до высоты рассеяния и рассеянных волн к наземному наблюдателю проводился в приближении плоско-слоистой среды методом full-wave [5]. Толщина слоев согласована со скоростью изменения концентрации частиц и на высоте 60-80 км составляла 1 км, а выше 1000 км - 20 км.

Поле неоднородностей определялось плотностью распределения вариаций электронной концентрации и их автокорреляционной функцией. В верхнем слое в качестве граничных условий использовались компоненты поля, возбуждаемые током, обусловленным рассеянием квазиэлектростатических волн. В нижнем слое граничные условия задавались как коэффициенты отражения ТЕ и ТМ мод от земной поверхности с бесконечной проводимостью (ВАН) и проводимостью  $\sigma_g \cdot 10^{-4}$  См/м, характерной для Кольского полуострова и Фенноскандии (KAN, LOZ).

Ионосферная плазма задана состоящей из электронов, ионов водорода (H+), кислорода (O+) и гелия (He+), при этом учитывалось столкновение заряженных частиц с молекулами азота и кислорода. Для описания геомагнитного поля использована дипольная модель.

Проведено моделирование перемещения области с неоднородностями по долготе и одновременного существования двух таких областей. В случае единственной области с неоднородностями рассеянные волны засвечивают на земной поверхности локальную область пространства (далее область засветки). При этом максимумы распределений плотности потока энергии по азимутальным углам вектора Пойнтинга  $p(\phi)$ , в основном, соответствуют направлению на центр области засветки. В ее центре распределение  $p(\phi)$  стремится к равномерному, так как здесь направление на центр не определено. При существовании нескольких областей с неоднородностями в точке наблюдений может наблюдаться многомодовое распределение.

Результаты данной главы опубликованы в работах [A5—A10].

**Четвертая глава** содержит результаты классификации пространственной структуры поля аврорального хисса, локализации области с мелкомасштабными неоднородностями по данным наземных наблюдений, а также результаты анализа условий распространения хисса, влияющие на наблюдаемую структуру поля.

Мы проанализировали 22 события регистрации аврорального хисса на точках KAN и LOZ с 07 ноября 2018 г по 9 февраля 2020 г. Точки расположены на близких геомагнитных широтах и разнесены по долготе на ~400 км. События разделены на 4 группы по особенностям временных вариаций на частоте 8 кГц горизонтальной компоненты магнитного поля  $H_t$ , индекса круговой поляризации  $P_c$ , отношения  $E_z/H_t$  и распределения плотности потока энергии по углам прихода  $p(\phi)$ . Ниже рассмотрены примеры четырех событий, в которых отражены характеристики каждой группы.

**20 декабря 2018 19:17 — 19:37 UT.** В этом событии параметры  $H_t$ ,  $P_c$ ,  $E_z/H_t$  и  $p(\phi)$  существенно отличаются в двух точках (рис. 1 а). В

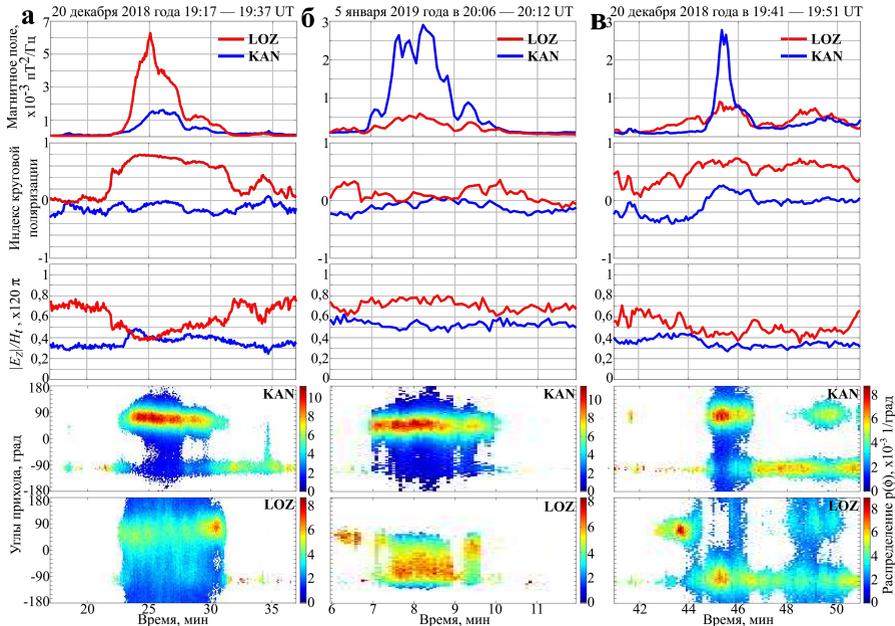


Рис. 1 — из работы [A11], (сверху вниз) огибающая спектральной плотности мощности горизонтальной компоненты напряженности магнитного поля  $H_t$ , индекс круговой поляризации  $P_c$ , отношение вертикальной компоненты напряженности электрического поля к горизонтальной компоненте напряженности магнитного  $E_z/H_t$ , распределения плотности потока энергии по обратному азимуту вектора Пойнтинга  $p(\phi)$  на станциях KAN и LOZ для события регистрации аврорального хисса а) 20 декабря 2018 года 19:17 — 19:37 UT, б) 5 января 2019 года в 20:06 — 20:12 UT, в) 20 декабря 2018 19:41 - 19:51 UT.

LOZ индекс круговой поляризации  $P_c$  составляет около 0.8, то есть регистрируются волны с правой, близкой к круговой, поляризацией. В KAN индекс  $P_c \approx 0$  - волны линейно поляризованы. В LOZ отношение  $E_z/H_t$  уменьшается практически в два раза по сравнению с началом всплеска, что говорит о малых углах падения волн. В KAN отношение  $E_z/H_t$  растет, означая большой угол падения регистрируемых волн.

Плотность потока энергии в LOZ распределена практически равномерно, что вместе с остальными параметрами означает положение этой точки в окрестности центра области засветки. Распределение  $p(\phi)$  в KAN

имеет выраженный максимум примерно на  $80^\circ$ , а разброс по углам составляет около  $60\text{--}80$  градусов, что указывает на приход волн в точку преимущественно с востока, со стороны станции LOZ. Линейная поляризация волн и большие углы падения, по-видимому, вызваны отражением волн от стенок волновода Земля-ионосфера.

Существенные отличия в LOZ и KAN анализируемых параметров могут быть объяснены только локальностью области засветки, размеры которой меньше расстояния между станциями. Еще четыре события имеют вариации поля, схожие представленным.

**5 января 2019 года в 20:06 — 20:12 UT.** Данное событие характеризуется близкими значениями индекса  $P_c$ , отношения  $E_z/H_t$  и разброса в распределениях  $p(\phi)$  в обеих точках при отсутствии резких флуктуаций (рис. 1 б). Всего было обнаружено шесть подобных событий.

Близкие к нулю значения индекса  $P_c$  в обеих точках говорят о регистрации линейно поляризованных волн, а отношение  $E_z/H_t$  указывает на отражения волн от стенок волновода Земля-ионосфера. Максимумы распределений  $p(\phi)$  в KAN и LOZ находятся на  $45^\circ$  и  $-60^\circ$ , соответственно, означая положение центра области засветки на более высоких широтах. В обеих точках разброс распределений  $p(\phi)$  практически одинаковый.

Близкие значения параметров  $P_c$  и  $E_z/H_t$  в KAN и LOZ могут быть объяснены только существованием вытянутой по долготе области засветки с размерами, сравнимыми или превышающими расстояние между станциями. Поскольку амплитуда  $H_t$  в KAN выше, чем в LOZ, центр области засветки рассеянных волн мог находиться ближе к KAN.

Существование вытянутой области засветки было также обнаружено в приполярной области, когда на станции ВАВ и на судне «Академик Трёшников», разнесенных по долготе на расстояние около  $800$  км, были зарегистрированы всплески аврорального хисса с похожей частотно-временной структурой магнитного поля (данные не приведены) [A12].

**20 декабря 2018 19:41 - 19:51 UT.** Наиболее часто (8 случаев из 22) в KAN и LOZ регистрируются всплески аврорального хисса третьей группы, которые не могут быть объяснены существованием простых конфигураций области засветки (рис. 1 в).

Наблюдаемые скачкообразные вариации параметров поля указывают на одновременное возникновение двух областей засветки. В LOZ на фоне высоких значений индекса круговой поляризации  $P_c$  ( $0.6 - 0.7$ ) и отсутствии изменений отношения  $E_z/H_t$  в 19:44 UT происходит резкое изменение распределения  $p(\phi)$ , означающее смену направления прихода с восточного на западное. В KAN в это время регистрируется единственный мощный всплеск хисса. По-видимому, в данный момент на фоне продолжительного всплеска с областью засветки в окрестности LOZ возникает более мощный всплеск с областью засветки недалеко от KAN.

**5 марта 2019 21:29 — 21:36 UT.** В данном событии в KAN в начале интервала регистрируются волны с правой, близкой к круговой поляризацией, с малыми углами падения и практически равномерным распределением  $p(\phi)$  (рис. 2 а, б, в). Затем поляризация сменяется на линейную, угол падения регистрируемых волн увеличивается, а максимум распределения устанавливается на  $90^\circ$  (направление прихода преимущественно с востока) с разбросом 50-60 градусов. Такие вариации, по-видимому, вызваны возникновением области засветки над станцией KAN и ее дальнейшим перемещением на восток.

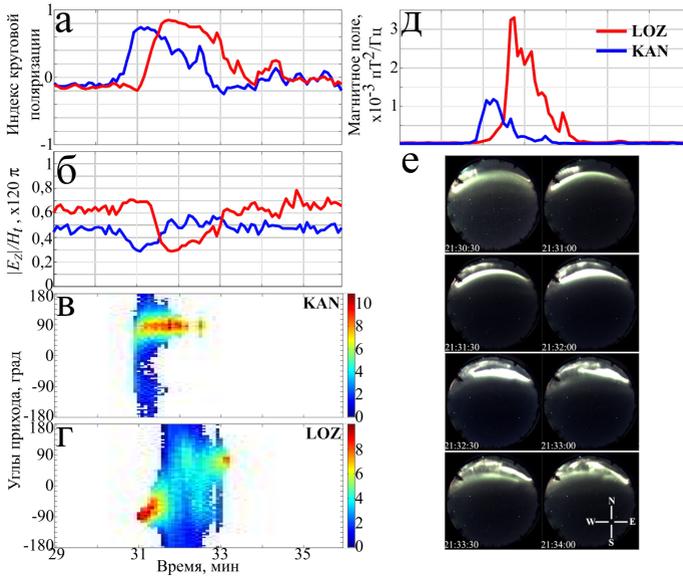


Рис. 2 — из работы [A11], (см. описание рис. 1) параметры  $P_c$  (а),  $E_z/H_t$  (б),  $p(\phi)$  (в, г) и  $H_t$  (д) на станциях KAN и LOZ для события регистрации аврорального хисса 5 марта 2019 года 21:29 — 21:36 UT, а также снимки all-sky камеры в LOZ в разные моменты времени

Вариации поля в LOZ схожи наблюдаемым в KAN, но сдвинуты по времени. Поляризация волн меняется с линейной на правую круговую и обратно на линейную (рис. 2 а). Отношение  $E_z/H_t$  убывает, означая рост угла падения (рис. 2 б). Эти изменения сопровождаются изменениями распределения  $p(\phi)$  с узкого с максимумом на  $(-80^\circ-90^\circ)$  (с запада) к равномерному и снова к узкому, но с максимумом на  $75^\circ$  (с востока) (рис. 2 г).

Вариации параметров поля указывают на перемещение области засветки аврорального хисса с запада на восток. Оно также сопровождается

перемещением полярных сияний в том же направлении (рис. 2 е). Всего отмечено три подобных события.

**Условия обеспечения локальности области засветки.** Мы оценили влияние высоты рассеяния волн на наблюдаемую локальность области засветки, рассчитав распределения у земной поверхности напряженности магнитного поля аврорального хисса в меридиональной плоскости  $p(\Phi)$  на частоте 8 кГц при рассеянии на поле неоднородностей, которое задано гауссовой функцией  $g(x,y)$ . Среднеквадратичные отклонения этой функции  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  выбраны равными и составляли 10, 50, 100, 150, 200 и 250 км. Рассмотрены высоты рассеяния 800, 1200, 1600 и 2000 км при ионосферных условиях для 20 декабря 2018 года 19:00 UT в точке LOZ.

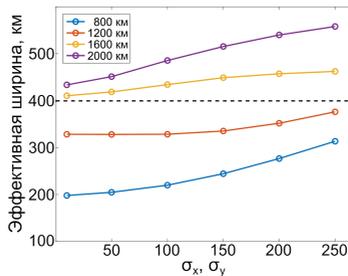


Рис. 3 — зависимости эффективной ширины области засветки от значений среднеквадратичного отклонения  $\sigma_x = \sigma_y$  функции  $g(x,y)$ , полученные при рассеянии квазиэлектростатических волн на высотах 2000 (фиолетовый), 1600 (желтый), 1200 (красный) и 800 (синий) километров, пунктиром отмечено значение расстояния между станциями KAN и LOZ

На рисунке 3 представлены зависимости эффективной ширины области засветки от выбранных значений среднеквадратичного отклонения функции  $g(x,y)$ . Мы определяли эффективную ширину как диаметр цилиндра, объем которого равен объему, ограниченному функцией распределения у земной поверхности напряженности магнитного поля  $H(x,y)$ , а высота равна 90 % от максимума этой функции. Из рисунка видно, что для обеспечения наблюдаемых экспериментально размеров области засветки меньше расстояния между станциями KAN и LOZ (400 км) необходимо, чтобы размеры области в ионосфере, занятой неоднородностями, были меньше 400 км и чтобы рассеяние происходило не выше 800-1200 км. Рассеяние квазиэлектростатических волн на высотах 800-1200 км объясняет наблюдаемую в событии 20 декабря 2018 года 19:17 - 19:37 UT локальность области засветки (рис. 1 а).

Полученные результаты подтверждают выдвинутое выше предположение о том, что рассеяние квазиэлектростатических волн выше 2-3 тыс.

км не способно обеспечить наблюдаемую экспериментально локальность области засветки аврорального хисса, предсказанной авторами [2].

**Локализация области с мелкомасштабными неоднородностями.** Мы провели локализацию области с мелкомасштабными неоднородностями, сопоставляя результаты наземных наблюдений аврорального хисса 03 февраля 2019 года 18:30 - 20:00 UT на станциях ВАВ, LOZ и KAN с результатами моделирования. Анализировались индекс круговой поляризации  $P_c$  и распределение плотности потока энергии по азимутальным углам прихода  $p(\phi)$  на частоте 8.5 кГц, когда авроральный хисс был зарегистрирован только в ВАВ (19:04 - 19:05 UT) и на трех точках одновременно (19:34 - 19:35 UT) (рис. 4 а, б). Распределение  $p(\phi)$  и индекс круговой поляризации  $P_c$  в интервал 1 в ВАВ достаточно хорошо воспроизводятся только при области с неоднородностями с конфигурацией, представленной на рисунках 4 в, г. В KAN и LOZ мощность магнитного поля на 15 - 17 децибел ниже, чем в ВАВ, что в реальных условиях ниже уровня шума волновода Земля-ионосфера и объясняет отсутствие всплесков в этих точках.

Варьируя положение и форму области с неоднородностями, не удалось подобрать такую конфигурацию, при которой были бы воспроизведены распределение  $p(\phi)$  и индекс  $P_c$ , наблюдаемые на всех трех станциях в интервал 2. Получено, что в это время существовало две разнесенных по широте области с неоднородностями. Одна область, обуславливающая наблюдение хисса в ВАВ, имела конфигурацию, подобно полученной для интервала 1 (рис. 4 в, г). Поля в KAN и LOZ вызваны существованием области с неоднородностями, расположенной на более низких широтах. Область была вытянута по долготе на расстояние, сравнимое с расстоянием между станциями KAN и LOZ (рис. 4 д, е).

**Условия распространения аврорального хисса, обуславливающие его одновременное наблюдение на разных широтах.** Для объяснения одновременных наблюдений аврорального хисса в трех точках мы моделировали его распространение на частотах 4 и 8 кГц от источника до высоты НГР отражения в меридиональной плоскости.

Согласно результатам моделирования минимальная высота генерации для 4 кГц составляет около 10 тыс. км и около 6 тыс. км для 8 кГц (рис. 5 а). Ниже генерация не происходит из-за положения волновых нормалей генерируемых волн вне резонансного конуса или равенства нулю фазовой скорости волны. На частотах 4 и 8 кГц 60 и 80 процентов запущенных лучей соответственно достигают высоты НГР отражения.

При распространении к Земле формируется совокупность квазиэлектростатических волн, которая в меридиональной плоскости представляет собой два пучка к экватору и к полюсу от силовой линии генерации (рис. 5 б). Формирование двух пучков объясняет результаты одновременных наблюдений хисса в ВАВ, KAN и LOZ (рис. 4). Наблюдения аврорального

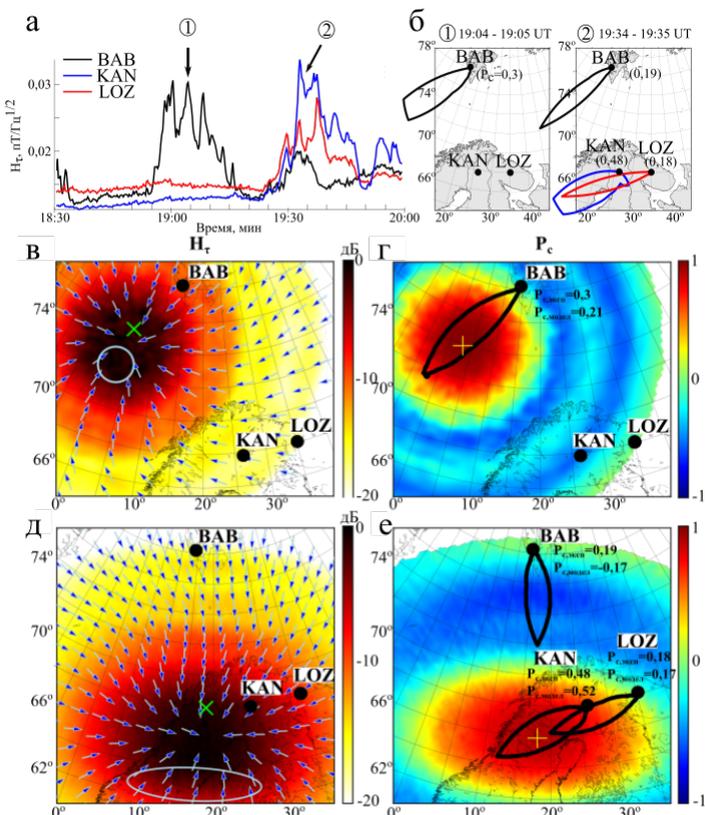


Рис. 4 — из работы [A13], а) вариации магнитного поля 03 февраля 2019 года в 18:30 - 20:00 UT в BAB, LOZ и KAN; б) распределения плотности потока энергии по азимутальным углам вместе с усредненными индексами круговой поляризации на интервалах 19:04 - 19:05 (1) UT и 19:34 - 19:35 UT (2); модельные распределения магнитного поля и индекса круговой поляризации на земной поверхности для интервалов 1 (в, г) и 2 (д, е)

хисса в этих точках могли быть обусловлены существованием единственного источника на геомагнитных широтах  $\Phi \approx 67^\circ - 69^\circ$ .

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A11—A15].

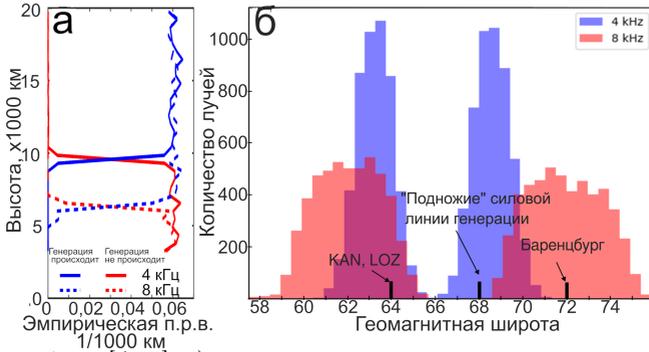


Рис. 5 — из работы [A14], а) эмпирические плотности распределения высот, на которых возможна (синие кривые) и не возможна (красные) генерация аврорального хисса на частотах 4 кГц (сплошные линии) и 8 кГц (пунктирные линии); б) эмпирические плотности распределения широт НГР отражения запущенных лучей в меридиональной плоскости.

**Заключение.** В результате анализа процессов генерации и распространения аврорального хисса по данным научных источников получено, что его наземная регистрация обусловлена рассеянием квазиэлектростатических волн на мелкомасштабных неоднородностях электронной концентрации. Привлечение наземных данных для исследования процессов распространения и рассеяния хисса требует создания метода анализа наземных данных, учитывающего случайную структуру поля хисса, а также разработку модели распространения хисса к наземному наблюдателю с возможностью сопоставления экспериментальных и модельных статистических оценок параметров поля.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- Разработаны и применены алгоритмы подавления сигналов атмосфериков и помехи сети 50 Гц в записях компонент поля, позволяющие вести анализ аврорального хисса на частотах выше 2-4 кГц, и метод верификации оценки направления прихода регистрируемых волн, позволяющий сравнивать результаты наблюдений на разнесенных точках, а также разработан метод анализа наземных данных, учитывающий случайные изменения во времени параметров поля.
- Разработана численная модель, описывающая все этапы распространения хисса от источника до наземного наблюдателя и позволяющая проводить сравнение экспериментальных и модельных статистических оценок параметров поля.

- На основе анализа данных наземных наблюдений аврорального хисса в разнесенных точках выделено 4 типа особенностей формы, динамики положения и размеров области засветки хисса по временным вариациям параметров его поля:
  1. Область засветки локальна и имеет размеры меньше расстояния между станциями KAN и LOZ (400 км);
  2. Область засветки перемещается по долготе;
  3. Область засветки вытянута по долготе;
  4. смешанный тип.
- Разработанная модель распространения аврорального хисса применена для анализа особенностей его распространения.

Получено:

1. Наблюдаемая экспериментально локальность области засветки хисса может быть обеспечена только в том случае, если размеры области в ионосфере, занятой неоднородностями, меньше 400 км и рассеяние происходит не выше 800-1200 км, которая гораздо ниже предсказанной в классических работах.
2. При проведении локализации области с мелкомасштабными неоднородностями по данным наблюдений хисса только в приполярных широтах (ВAB) и одновременно в приполярных и авроральных широтах (KAN, LOZ) получено, что всплеск в ВAB обусловлен существованием области с неоднородностями к юго-западу от точки наблюдений. Регистрация всплесков хисса на трех точках может быть обусловлена только существованием двух таких областей, расположенных на разных широтах.
3. Распространяясь к земной поверхности, совокупность квазиэлектростатических волн с волновыми нормальными, распределенными равномерно по направлению, формирует в меридиональной плоскости два пучка, разнесенных по широте к экватору и к полюсу от силовой линии, на которой происходила генерация. Этот эффект позволяет объяснить одновременные наблюдения хисса в авроральных (KAN и LOZ) и приполярных широтах (ВAB).

## Публикации автора по теме диссертации

- A1. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени [текст] / С. В. Пильгаев [и др.] // ПТЭ. — 2021. — № 5. — с. 115–125. — (Scopus, ВАК).

- A2. Дневные ОНЧ-излучения во время восстановительной фазы магнитной бури: событие 5 января 2015 г [текст] / Ю. Маннинен [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. — 2020. — т. 60, № 3. — с. 318–328. — (Scopus, WoS, BAK).
- A3. Short Periodic VLF Emissions Observed Simultaneously by Van Allen Probes and on the Ground [текст] / A. G. Demekhov [и др.] // Geophysical Research Letters. — 2021. — т. 48, № 20. — e2021GL095476. — (Scopus, WoS, BAK).
- A4. Rocket Observation of Sub-Relativistic Electrons in the Quiet Dayside Auroral Ionosphere [текст] / T. Namekawa [и др.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2021. — т. 126, № 7. — e2020JA028633. — (Scopus, WoS, BAK).
- A5. Модель распространения авроральных шипений от области генерации до земной поверхности [текст] / О. Лебедь [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Гелиогеофизика. — 2018. — т. 9, № 5–4. — с. 97–107.
- A6. Моделирование прохождения аврорального хисса к земной поверхности [текст] / О. М. Лебедь [и др.] // Гелиогеофизические исследования в Арктике. — 2018. — т. 2. — с. 59–62.
- A7. Первые результаты локализации области выхода естественных СНЧ/ОНЧ излучений в высоких широтах по данным наземных наблюдений [текст] / А. С. Никитенко [и др.] // Physics of Auroral Phenomena. — 2018. — т. 41, № 1. — с. 61–65.
- A8. Анализ аврорального ОНЧ хисса в обл Ловозеро и вблизи обл. Соданкюля [текст] / А. Никитенко [и др.] // Гелиогеофизические исследования в Арктике. — 2018. — т. 2. — с. 71–74.
- A9. Моделирование прохождения аврорального хисса от области генерации к земной поверхности [текст] / О. М. Лебедь [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. — 2019. — т. 59, № 5. — с. 618–627. — (Scopus, WoS, BAK).
- A10. Наземные наблюдения аврорального ОНЧ хисса в высоких широтах и сравнение с результатами моделирования [текст] / А. С. Никитенко [и др.] // Physics of Auroral Phenomena. — 2019. — т. 42, 1(43). — с. 85–88.
- A11. Пространственная структура области засветки ОНЧ аврорального хисса по данным наземных наблюдений в авроральных широтах [текст] / А. Никитенко [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. — 2022. — т. 62, № 3. — с. 336–344. — (Scopus, WoS, BAK).

- A12. Первые результаты ОНЧ-наблюдений во время полярной экспедиции "Трансарктика 2019" [текст] / С. В. Пильгаев [и др.] // Геомagnetизм и аэрономия. — 2020. — т. 60, № 2. — с. 216–219. — (Scopus, WoS, ВАК).
- A13. Оценка положения и размера области рассеяния аврорального хисса по данным высокоширотных наблюдений в пространственно-разнесенных точках [текст] / А. С. Никитенко [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2021. — т. 85, № 3. — с. 398–403. — (Scopus, ВАК).
- A14. Моделирование пространственной структуры волнового поля аврорального хисса и сравнение с результатами наземных наблюдений [текст] / А. С. Никитенко [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. — 2023. — т. 87, № 1. — с. 134–140. — (Scopus, ВАК).
- A15. Исследование условий распространения аврорального хисса в магнитосфере и ионосфере Земли [текст] / А. С. Никитенко [и др.] // Динамические процессы в геосферах. — 2022. — т. 14, № 2. — с. 109–114.

## Список литературы

1. *Sazhin, S.* Auroral hiss: a review [текст] / S. Sazhin, K. Bullough, M. Hayakawa // Planetary and Space Science. — 1993. — т. 41, № 2. — с. 153–166.
2. *Sonwalkar, V. S.* An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities [текст] / V. S. Sonwalkar, J. Harikumar // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2000. — т. 105, A8. — с. 18867–18883.
3. *Walter, F.* Nonducted VLF Propagation in the Magnetosphere [текст] / F. Walter. — Stanford University, 1969.
4. *Рытов, С.* Введение в статистическую радиофизику, часть II [текст] / С. Рытов, Ю. Кравцов, Т. В.И. — Наука, Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1978.
5. *Lehtinen, N. G.* Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet [текст] / N. G. Lehtinen, U. S. Inan // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — т. 113, A6.
6. *Биттенкорт, Ж.* Основы физики плазмы [текст] / Ж. Биттенкорт, Л. Зеленый, А. Садовский. — Физматлит, 2009.

*Никитенко Александр Сергеевич*

Исследование распространения и рассеяния аврорального хисса на  
мелкомасштабных неоднородностях по данным наземных наблюдений

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 12.12.2024. Формат бумаги 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 1,28. Заказ № 24. Тираж 120 экз.

ФГБУН ФИЦ КНЦ РАН

184209, г. Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14