

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РОСТА РИОМЕТРИЧЕСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ НА ВЫХОД АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

ANALYSIS OF THE EFFECT OF COSMIC NOISE ABSORPTION INCREASE ON PROPAGATION OF AURORAL HISS TO THE GROUND

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

Аннотация. По данным наземных наблюдений на геофизической станции «Ловозеро» и радиофизическом полигоне «Туманный» ПГИ анализируется влияние изменений поглощения космического радишума в нижней ионосфере на выход авроральных шипений к земной поверхности. Рассмотрены три всплеска авроральных шипений, окончание которых сопровождается ростом риометрического поглощения до 0.6–2.2 дБ. Моделирование их распространения из магнитосферы к земной поверхности в условиях возмущенного профиля электронной концентрации, обусловленного высыпаниями энергичных электронов, показало, что даже небольшое значение 0.6 дБ поглощения в ионосфере вызывает ослабление аврорального шипения на 45–50 дБ относительно его мощности на высоте 800 км. Расчеты показывают, что при таком поглощении мощность шипения у земной поверхности сопоставима с уровнем естественного шума волновода Земля—ионосфера, а при значении риометрического поглощения 2.2 дБ можно ожидать полного прекращения регистрации авроральных шипений на земной поверхности.

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

Abstract. We analyze the effect of changes in the cosmic radio noise absorption in the lower ionosphere on propagation of the auroral hiss to the ground, using observational data from the Lovozero and Tumanny observatories. Three bursts of auroral hiss have been examined whose termination is accompanied by an increase in riometric absorption up to 0.6–2.2 dB. Modeling their propagation from the magnetosphere to the ground under conditions of a perturbed electron density profile, caused by precipitation of energetic electrons, shows that even a small absorption of 0.6 dB in the ionosphere causes the auroral hiss to weaken by 45–50 dB relative to its power at an altitude of 800 km. Calculations show that with such absorption the auroral hiss power near the ground is comparable to the level of natural noise of the Earth — ionosphere waveguide, and with riometric absorption of 2.2 dB a complete termination of the auroral hiss on the ground can be expected.

Keywords: auroral hiss, ionosphere, cosmic noise absorption.

ВВЕДЕНИЕ

В высоких широтах одним из наиболее часто регистрируемых типов естественных излучений магнитосферного происхождения являются авроральные шипения (auroral hiss) [Sazhin et al., 1993; Sonwalkar, Harikumar, 2000; Makita, 1979]. В российской литературе такие излучения часто называют авроральным хиссом — шумовым излучением, регистрируемым в широком диапазоне частот 0.3–10 кГц и выше, который включает ОНЧ-диапазон (очень низкочастотный, 3–30 кГц). Спектр мощности магнитного поля хисса у земной поверхности имеет максимум на частотах 8–10 кГц [Sazhin et al., 1993], верхняя

граница может достигать 30 кГц [Sazhin et al., 1993; Makita, 1979]. Считается, что генерация аврорального хисса связана с высыпаниями мягких электронов с энергиями 0.1–10 кэВ [Sonwalkar, Harikumar, 2000; Makita, 1979].

В экваториальной области аврорального овала авроральный хисс наиболее часто регистрируется в интервале 20–01 MLT при слабой геомагнитной активности ($K_p < 3$) [Клейменова и др., 2019]. Всплески этих излучений типичны для подготовительной фазы (growth phase) магнитосферной суббури. С началом суббури во время брейкапа сияний авроральный хисс может внезапно прекратиться [Manninen et al., 2020].

Считается, что причиной внезапного исчезновения хисса во время брейкапа может быть поглощение ОНЧ-волн, вызванное увеличением высыпаний энергичных электронов в это время. В ранних работах, посвященных изучению аврорального хисса, отмечается его связь с вариациями риометрического поглощения. Так, в работе [Harang, Larsen, 1965] отмечено, что уровень ионосферного поглощения влияет на способность аврорального хисса проникать к земной поверхности. При умеренно слабых уровнях поглощения хисс положительно коррелирует с изменением поглощения, но при высоких уровнях поглощения пропадает [Jørgensen, 1966].

Можно предположить, что его прекращение во время брейкапа сияний происходит по двум причинам: 1) прекратилась генерация хисса; 2) вследствие роста поглощения в нижней ионосфере хисс ослабел до уровня естественного шума волновода Земля—ионосфера. В данной работе с помощью полного решения волнового уравнения в плоскостной среде исследуется влияние наблюдаемых всплесков риометрического поглощения на затухание аврорального хисса.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Работа проводилась на основе данных наблюдений аврорального хисса и риометрического поглощения на Кольском п-ове на ст. «Ловозеро» (67.97° N, 35.02° E) и в расположенном в 100 км к северу от нее полигоне «Туманный» (69.07° N, 35.73° E). Мы анализировали события, в которых после всплеска риометрического поглощения прекращалась регистрация аврорального хисса. Измерения ОНЧ полей проводились на ст. «Ловозеро» с помощью трехкомпонентного приемника [Пильгаев и др., 2021]. Для измерения значений риометрического поглощения использовались риометры на ст. «Ловозеро» и полигоне «Туманный». Эти риометры работают на частоте 38.5 МГц, а их приемные антенны имеют угловую апертуру 44°.

В работе использовались записи, полученные в интервале 1 сентября – 31 декабря 2023 г. Мы рассмотрели три характерных события, когда на ст. «Ловозеро» регистрировались всплески хисса, после окончания которых повышалось поглощение космического радишума до 0.6–2.2 дБ на обеих станциях. Это происходило 9 ноября в 20:00–21:00 UT (событие 1), 7 декабря в 21:00–22:00 UT (событие 2) и 15 декабря в 19:00–20:00 UT (событие 3).

На рис. 1 показаны магнитограммы скандинавской меридиональной сети магнитометров IMAGE [<https://space.fmi.fi/image/www/index.php>], спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля в диапазоне частот 1–11 кГц по данным ст. «Ловозеро» и графики зависимости уровня риометрического поглощения на ст. «Ловозеро» и полигоне «Туманный» от времени для выбранных событий. Спектрограммы получены после предварительной обработки данных регистрации ОНЧ-измерений, включающей, прежде всего, подавление интенсивных импульсных атмосферных помех от молниевых разрядов (атмосфериков). Из рисунка видно, что все три

события происходили в подготовительную фазу суббури. Стоит отметить, что, согласно наблюдениям камеры всего неба на ст. «Ловозеро», в момент прекращения хисса и одновременного начала нарастания риометрического поглощения был зафиксирован брейкап сияний (данные не приведены). К сожалению, небольшие облака 7 и 15 декабря затруднили построение кеограмм этих событий.

В событиях 1 и 2 (панели а, б) риометрическое поглощение начинает плавно расти после окончания хисса одновременно на разнесенных станциях до 2.2 и 0.6 дБ соответственно. Следует отметить, что близкие по времени и величине значения риометрического поглощения на ст. «Ловозеро» и полигоне «Туманный» позволяют предполагать, что область повышенного риометрического поглощения в этих случаях не была локальна, а занимала большую площадь. В свою очередь, в событии 3 (панель в) максимумы риометрического поглощения смещены (на полигоне «Туманный» он наступает позже), что может говорить о том, что в рассматриваемый момент времени (19:29 UT) область возмущения локальна в окрестности на ст. «Ловозеро». Здесь прерывание хисса совпадает с моментом, когда уровень риометрического поглощения возрастает до 0.7 дБ.

Стоит отметить, что в рассматриваемых событиях хисс пропадает при риометрическом поглощении как 0.6, так и 2.2 дБ. Чтобы выяснить, мог ли наблюдаемый уровень поглощения привести к ослаблению хисса до уровня естественного шума волновода Земля—ионосфера, мы провели моделирование распространения аврорального хисса к земной поверхности.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Наблюдаемое в эксперименте увеличение риометрического поглощения, по-видимому, связано с высыпанием авроральных электронов, которое зачастую происходит во время магнитосферной суббури. Энергии высыпającychся электронов могут варьировать от ~100 эВ до нескольких сотен килоэлектронвольт, что дает им возможность проникать вплоть до D-слоя ионосферы (60–90 км). Для исследования влияния риометрического поглощения на выход аврорального хисса к земной поверхности необходимо решить две задачи: 1) найти профили электронной концентрации N_e , обеспечивающие наблюдаемый уровень риометрического поглощения; 2) оценить затухание аврорального хисса при распространении к земной поверхности через ионосферу для выбранных профилей. Такая оценка должна включать изменение энергии проходящей вниз волны как за счет отражения в области большого градиента показателя преломления в модифицированном высыпаниями слое E, так и за счет ее поглощения в нижней области ионосферы, где наблюдается высокая частота столкновений электронов с нейтральными частицами.

Для нахождения необходимых профилей N_e мы использовали модель ионизации ионосферы [Lehtinen, Inan, 2007], которая позволяет связать величину потока высыпającychся электронов и их энергию с изменениями профиля ионосферы. Для расчета распространения аврорального хисса сквозь модифицированную

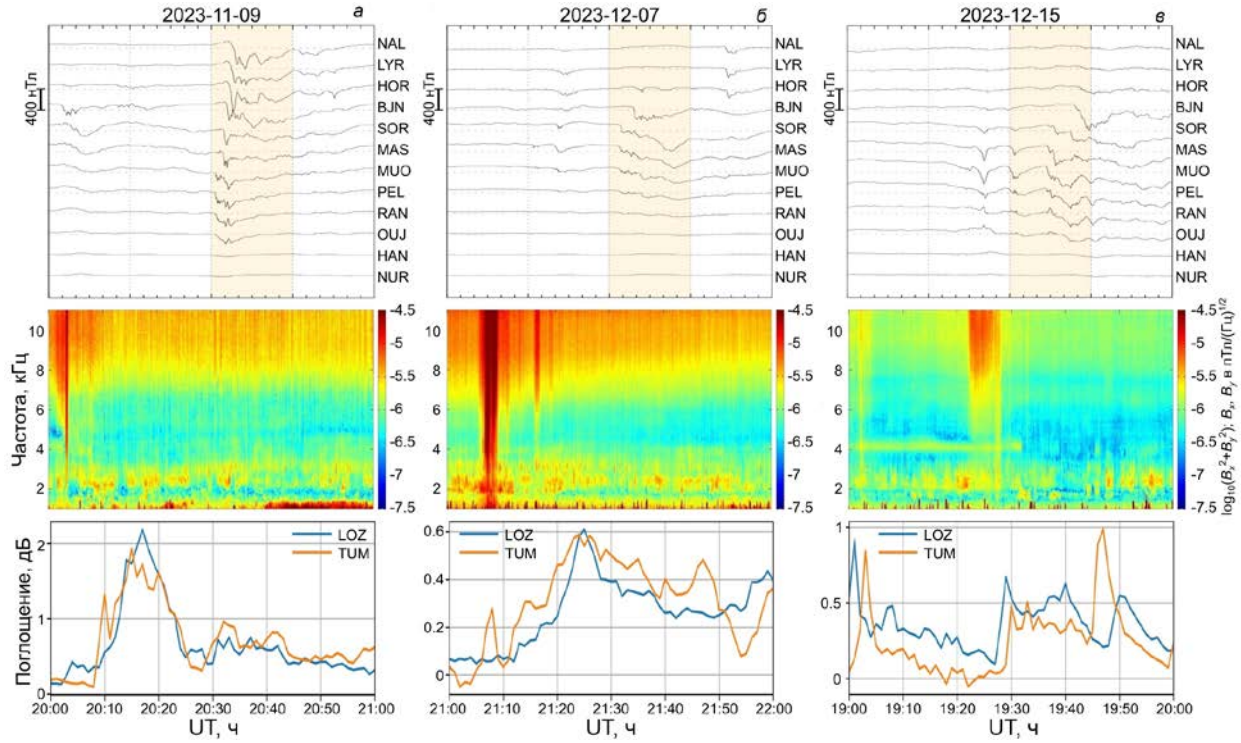


Рис. 1. Магнитограммы скандинавской меридиональной цепочки IMAGE (вверху), спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля в диапазоне частот 1–11 кГц на ст. «Ловозеро» и полигоне «Туманный» для событий 9 ноября в 20:00–21:00 UT (а), 7 декабря в 21:00–22:00 UT (б), 15 декабря в 19:00–20:00 UT (в)

ионосферу к земной поверхности мы использовали так называемый полноволновой (full-wave) метод, основанный на решении волнового уравнения в плоскостной среде [Lehtinen, Inan, 2008].

Формирование профилей электронной концентрации возмущенной ионосферы

Для формирования профилей N_e ионосферы во время высыпания высокоэнергичных электронов мы воспользовались программой pyGPI5 [Kaeppler et al., 2022] — реализацией на языке Python модели ионизации [Lehtinen, Inan, 2007]. Она является модификацией так называемой модели Glukhov—Pasko—Inan (GPI) [Glukhov et al., 1992], созданной для расчета электронной концентрации в слоях E и D. В данной модели ионизации нижней ионосферы одновременно решаются пять обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, которые описывают эволюцию во времени пяти групп частиц: электронов, легких и тяжелых положительных ионов, легких и тяжелых отрицательных ионов. На основании этого решения формируется профиль N_e как реакция на заданный поток высыпающихся электронов с заданными энергиями.

Для расчета фоновой концентрации, на основе которой происходит формирование добавочной концентрации, обусловленной высыпаниями энергичных электронов, мы использовали стандартную эмпирическую модель IRI-2020 [Bilitza et al., 2017]. Концентрация и температура нейтральных частиц, необходимые для расчета возмущенного профиля N_e , оценивались по модели NRLMSISE-00 [Picone et al., 2002].

Включенная в модель ионизации модель переноса электронов позволяет задать распределение по энергиям высыпающихся электронов максвелловским распределением [Fang et al., 2008] либо распределением в виде набора моноэнергетических потоков электронов с дискретными энергиями, взятыми, например, по спутниковым данным [Fang et al., 2010]. В данной работе мы использовали максвелловское распределение электронов, поскольку, как показано в ряде работ, оно хорошо описывает распределение электронов с энергиями от 100 эВ до 1 МэВ [Иванов, Дашкевич, 2019; Трошичев и др., 1986; Frahm et al., 1997]. Используемый в данной модели дифференциальный поток электронов определяется выражением

$$\phi(E) = \frac{Q_0}{2E_0^3} E \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right),$$

где Q_0 [кэВ·см⁻²·с⁻¹] — полный поток энергии высыпающихся электронов; E_0 [кэВ] — характеристическая энергия, при которой спектральный поток имеет максимум [Fang et al., 2008]. Далее мы для удобства измеряли поток энергии высыпающихся электронов в мВт·м⁻² $Q_0[\text{мВт} \cdot \text{м}^{-2}] = Q_0[\text{кэВ} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}] 1.6 \cdot 10^{-9}$.

Поиск профилей N_e , способных обеспечить экспериментально наблюдаемые значения риометрического поглощения, мы проводили методом перебора, варьируя энергию E_0 и плотность потока Q_0 высыпающихся электронов. Так, E_0 изменялась от 5 до 100 кэВ, Q_0 — от 0.2 до 10 мВт·м⁻². В настоящей работе риометрическое поглощение представляет собой интегральное по высоте поглощение космического радиопомехи на частоте 38.5 МГц.

Такая частота лежит в пределах диапазона оптимальных для оценки поглощения частот 30–50 МГц. Измерения космического радишума на частотах ниже 30 МГц требуют создания антенны больших размеров, что приводит к усилению помех. На частотах выше 50 МГц сильно падает чувствительность прибора [Hargreaves, 1969].

Для оценки поглощения космического радишума [дБ] на частоте 38.5 МГц мы воспользовались выражением [Hargreaves, 1969]

$$A = 4.6 \cdot 10^{-5} \int_0^{h_{\max}} \frac{N_e v}{\omega^2 + v^2} dh,$$

где N_e — концентрация электронов в м^{-3} ; v — частота столкновений электронов с нейтралами; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота. Интегрирование проводится по всему набору слоев, на которые разбита ионосфера, от земной поверхности до (в нашем случае) высоты $h_{\max}$, на которой происходит рассеяние свистовых волн.

Стоит отметить, что главный вклад в общее поглощение на частоте 38.5 МГц вносят столкновения электронов с нейтральными частицами на высотах ниже 120 км (слои D, E) [Hargreaves, 1969]. Для этих высот в выражении для оценки поглощения космического радишума A на частоте 38.5 МГц в знаменателе преобладает первое слагаемое. В этом случае общее поглощение пропорционально интегралу от $N_e v$ [Hargreaves, 1969]. Максимум частоты столкновений лежит ниже 120 км, поэтому именно на этих высотах будет происходить максимальное поглощение космического радишума на частоте 38.5 МГц.

Частота столкновений электронов с нейтральными частицами рассчитывалась в соответствии с [Banks, 1966].

Модель распространения аврорального хисса к земной поверхности

Генерацию аврорального хисса связывают с развитием черенковской неустойчивости высыпающихся электронов с энергиями 0.1–10 кэВ в магнитосфере на высотах ~6–20 тыс. км [Sonwalkar, Harikumar, 2000; Makita, 1979]. Возникающий на этих высотах авроральный хисс представляет собой квазиэлектростатическую свистовую волну с близким к 90° углом волновой нормали $\mathbf{n}$ к силовой линии магнитного поля. Наиболее полная модель распространения аврорального хисса к земной поверхности была предложена в [Sonwalkar, Harikumar, 2000]. Для объяснения прохождения аврорального хисса к земной поверхности в ней использовалось предположение, что квазиэлектростатические волны на высотах ниже 5000 км рассеиваются на мелкомасштабных (<100 м) неоднородностях электронной концентрации ионосферной плазмы $n_\perp < 1$. В результате часть рассеянных волн имеет значения горизонтальных относительно нормали к земной поверхности компонент волновых нормалей $n_p < 1$. Согласно закону Снеллиуса, при таких значениях n_p волны способны достигнуть земной поверхности [Stix, 1992].

Моделирование распространения аврорального хисса проводилось с помощью численной модели,

подробно описанной в [Лебедь и др., 2019]. Данная модель связывает все этапы прохождения хисса от места генерации к земной поверхности и учитывает случайный характер волновых полей. Формирование случайного поля квазиэлектростатических волн осуществлялось в декартовой системе координат, в которой ось Z сонаправлена с вектором внешнего магнитного поля. Высота генерации задана равной 2000 км. Электроны, ответственные за генерацию, отвечали двум условиям. Во-первых, выполнялось условие черенковского резонанса — совпадение проекций фазовой скорости возникающей свистовой волны $v_{ph} = c/n_z$ и скорости электрона $v_\parallel$ на направление силовой линии внешнего магнитного поля. Здесь $\mathbf{n} = [\mathbf{n}_\perp, \mathbf{n}_z]$ — вектор показателя преломления; $n = \mathbf{k}/k_0$, где $\mathbf{k}$ — волновой вектор. Во-вторых, за генерацию отвечали только те электроны, для распределения которых по скоростям $F(v_\parallel)$ выполнялось $\partial F(v_\parallel)/\partial v_\parallel > 0$ [Sazhin et al., 1993]. В настоящей работе использовалось типичное распределение электронов по энергиям, полученное в ходе ракетных измерений в стабильной дуге полярных сияний [Pulliam et al., 1981]. Данное распределение имеет вид максвелловского с характеристической энергией $E_0 = 3$ кэВ, при которой спектральный поток имеет максимум. При моделировании случайного поля мы считали, что поперечные компоненты $n_\perp$ распределены равномерно по азимутальным углам $p(\phi) = 1/(2\pi)$, где ϕ — азимутальный угол волновой нормали [Лебедь и др., 2019].

Поскольку высыпания высокоэнергичных электронов модифицируют профиль N_e преимущественно на высотах <400 км, а на высотах >1000 км затухание свистовых волн пренебрежимо мало, для решения задачи оценки затухания аврорального хисса будет достаточно рассчитать прохождение аврорального хисса после рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях нижней ионосферы до земной поверхности. В данной работе мелкомасштабные по сравнению с длиной волны неоднородности N_e были помещены на высоту $h_{\max} = 800$ км [Shklyar, Nagano 1998; Никитенко и др., 2023]. Предполагалось, что область с неоднородностями пространственно ограничена двумерной гауссианой со среднеквадратическими отклонениями $\sigma_x = \sigma_y = 50$ км. Результатом рассеяния квазиэлектростатических волн на слое с неоднородностями кроме исходной электростатической волны, которая не выходит к земной поверхности и далее в модели не учитывается, является суперпозиция плоских свистовых волн со случайными амплитудами, фазами и направлениями волновых нормалей, лежащих в том числе и в диапазоне $n_\perp < 1$.

В расчетах распространения генерируемых квазиэлектростатических волн до высоты рассеяния и рассеянных волн к земной поверхности мы переходили в декартову систему координат, в которой ось Z нормальна к земной поверхности, заданной бесконечно проводящей плоскостью. Ионосфера задана как плоско-слоистая среда. Такое приближение широко

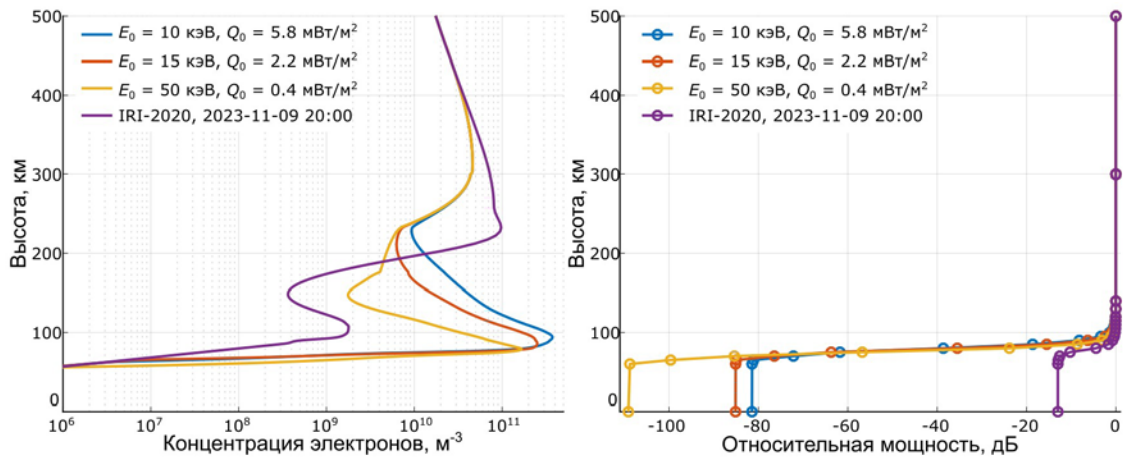


Рис. 2. Моделирование события — профили N_e ионосферы (а): фоновый, полученный с помощью модели IRI-2020, и возмущенные, которые могут обеспечить риометрическое поглощение 2.2 ± 0.1 дБ; б — соответствующие этим профилям зависимости относительной мощности свистовой волны с высотой $A_{hiss}(h)$

применяется для исследования прохождения ОНЧ-волн сквозь ионосферу [Аксенов, 1975; Lehtinen, Inan, 2008]. Толщина слоев изменялась в соответствии со скоростью изменения N_e . Величина и направление магнитного поля Земли рассчитывались по модели Цыганенко [Tsyganenko, 1995]. Чтобы не учитывать влияния отраженных от земной поверхности волн на результаты расчета, на нижней границе среды, совпадающей с поверхностью земли, задавались условия свободного ухода волн [Лебедь и др., 2019].

Рассчитав компоненты поля рассеянных волн, можно оценить интегральную мощность аврорального хисса в каждом слое. Для этого мы проинтегрировали по площади модуль вертикальной компоненты вектора Пойнтинга. Отношение интегральной мощности хисса на том или ином слое к мощности на верхнем слое [дБ] характеризует затухание свистовой волны при распространении. Обозначим его A_{hiss} .

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В событии 1 (см. рис. 1) риометрическое поглощение достигло 2.2 дБ. На рис. 2, а показано несколько возможных профилей N_e , обеспечивающих поглощение 2.2 ± 0.1 дБ и рассчитанных программой ruGPI5. В качестве фонового был взят профиль N_e , рассчитанный с помощью модели IRI-2020 для 9 ноября 2023 г., 20:00 UT. Расчет показал, что такое, как в эксперименте, поглощение космического радишума возможно при характеристических энергиях высыпавшихся электронов $E_0 > 10$ кэВ. Видно, что, чем выше энергия высыпавшихся электронов, тем ниже они проникают в ионосферу. Так, наличие электронов с энергией 50 кэВ приводит к максимуму N_e на высоте 79 км.

На панели б показаны рассчитанные зависимости относительной мощности свистовой волны от высоты $A_{hiss}(h)$, соответствующие профилям, показанным на панели а. Видно, что A_{hiss} свистовой волны начинает резко уменьшаться с высоты ~ 100 км, где присутствует увеличенная N_e . Для спокойного фонового профиля N_e полное ослабление свистовой волны после прохождения от области рассеяния до зем-

ной поверхности через ионосферу составило ~ 13 дБ. По данным наших долговременных наблюдений отношение среднестатистической мощности хиссов у земной поверхности к мощности шумов волновода Земля—ионосфера лежит в диапазоне 30–40 дБ. Оно обусловлено затуханием хисса при прохождении через ионосферу и распространении в волноводе Земля—ионосфера до места регистрации. Следовательно, исходя из результатов моделирования, над ионосферой отношение сигнал/шум хисса должно быть на 10–20 дБ больше и составлять ~ 40 –50 дБ. Из рис. 2 видно, что возмущенные высыпавшимися электронами профили N_e приводят к затуханию аврорального хисса 80 дБ и выше. В этом случае отношение сигнал/шум на земной поверхности будет меньше -40 дБ, что составляет примерно 10^{-4} от мощности сигнала аврорального хисса над ионосферой. Очевидно, что при данных возмущенных профилях N_e наблюдать авроральный хисс на земной поверхности просто невозможно.

Моделирование событий 2 и 3 проводилось аналогичным образом. Риометрическое поглощение 7 и 15 декабря 2023 г. составило 0.6 и 0.7 дБ соответственно (см. рис. 1). Поскольку значения риометрического поглощения так близки, рассмотрим эти события совместно.

Рисунок 3, представляющий результаты моделирования событий 2 и 3, аналогичен рис. 2. Видно, что фоновые профили, получаемые с помощью эмпирической модели IRI-2020, практически совпадают, поскольку рассматриваются близкие даты и время (7 декабря, 21:00 UT и 15 декабря, 19:00 UT). В данных случаях среди профилей N_e , приводящих к экспериментальным значениям риометрического поглощения, были образованные распределения высыпавшихся электронов с характеристическими энергиями $E_0 = 5$ кэВ, т. е. электронами из диапазона тех же энергий, что и у электронов, ответственных за генерацию аврорального хисса [Sonwalkar, Narikumar, 2000]. Поскольку глубина проникновения в ионосферу электронов с энергиями 5–15 кэВ меньше, максимумы N_e (по сравнению с событием 1) здесь находятся чуть выше, на высотах ~ 90 км. Видно, что

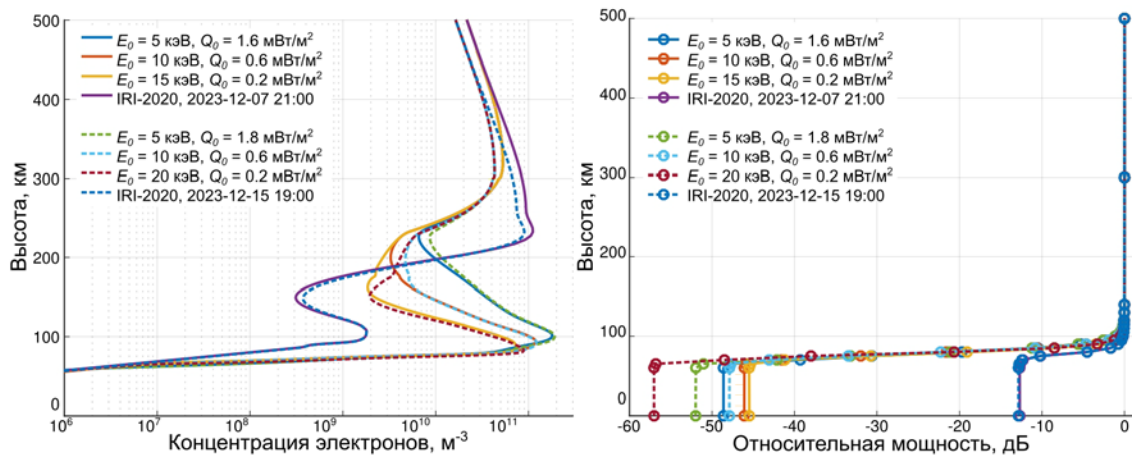


Рис. 3. Моделирование событий 2 и 3 — профили N_e (слева): фоновый, полученный с помощью модели IRI-2020, и возмущенные, которые могут обеспечить риометрическое поглощение 0.6 ± 0.1 дБ (сплошные линии) и 0.7 ± 0.1 дБ (штриховые). Справа — соответствующие этим профилям зависимости относительной мощности свистовой волны с высотой $A_{\text{hiss}}(h)$

в данном случае высыпаящиеся электроны приводят к ослаблению свистовых волн на $\sim 45\text{--}50$ дБ. В этом случае отношение сигнал/шум на земной поверхности будет ~ -5 дБ, что составляет 0.3 мощности сигнала аврорального хисса над ионосферой. Поскольку в данном случае мощность сигнала аврорального хисса сопоставима или меньше уровня естественных шумов волновода Земля—ионосфера, авроральный хисс также не будет обнаружен в данных регистрации электромагнитного поля. Таким образом, экспериментально наблюдаемое прекращение хисса на ст. «Ловозеро», сопровождаемое одновременным ростом риометрического поглощения во время начала суббури, скорее всего, вызвано ухудшением условий распространения свистовых волн в нижней ионосфере.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В событии 3 всплески хисса заканчиваются одновременно с резким ростом риометрического поглощения до 0.5–0.6 дБ. Согласно результатам моделирования, при таком поглощении ионосфера становится непрозрачной для хисса, что приводит к резкому прекращению его регистрации у земной поверхности. В событиях 1 и 2 всплески хисса заканчиваются на несколько минут раньше возникновения максимума поглощения на ст. «Ловозеро» и полигоне «Туманный».

События 1 и 2 характеризуются возникновением сначала мощного всплеска хисса, а затем серии более слабых всплесков. При этом в обоих событиях мощность хисса уменьшается одновременно с ростом риометрического поглощения. В событии 1 мощность всплесков падает после увеличения уровня поглощения на ст. «Ловозеро» до 0.3 дБ. В событии 2 мощность всплесков уменьшается плавно одновременно с плавным ростом риометрического поглощения. Хисс прекращается, когда риометрическое поглощение достигает ~ 0.5 дБ, т. е. когда, согласно результатам моделирования, ионосфера становится непрозрачной для хисса. В событии 1 хисс прекраща-

ется в 20:10 UT, за 7–8 мин до максимума поглощения, а в событии 2 — в 21:20 UT, за ~ 1 мин до максимума.

Для объяснения эффекта прекращения аврорального хисса (шипений) с ростом риометрического поглощения до 0.6–2.2 дБ было проведено моделирование распространения аврорального хисса к земной поверхности в условиях невозмущенного профиля N_e и возмущенного высыпаниями энергичных электронов с максвелловским распределением по скоростям и различными плотностью их потока Q_0 и характеристической энергией E_0 . Выявлено, что рост риометрического поглощения даже до 0.6 дБ обуславливает ослабление хисса на 45–50 дБ относительно его мощности на высоте 800 км. В этом случае мощность хисса у земной поверхности становится сопоставимой с мощностью собственных шумов волновода Земля—ионосфера. При уровне риометрического поглощения 2.2 дБ можно ожидать полное прекращение регистрации хисса на земной поверхности.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов В.И. Исследование распространения сверхдлинных радиоволн в ионосфере Земли. 1 Теория. *Известия ВУЗов, Радиофизика*. 1975. Т. 8. С. 1333–1346.
- Иванов В.Е., Дашкевич Ж.В. О возможности исследования спектров высыпаящихся электронов с помощью оптических наблюдений системой MAIN. *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 8. С. 28–34. DOI: [10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8](https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.10.8).
- Клейменова Н., Маннинен Ю., Громова Л. и др. Всплески ОНЧ-излучений типа «авроральный хисс» на земной поверхности на L5.5 и геомагнитные возмущения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2019. Т. 59, по 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 аэрона-*

мия. 2019. Т. 59, № 5. С. 618–627. DOI: [10.1134/S0016794019050079](https://doi.org/10.1134/S0016794019050079).

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. Серия физическая*. 2023. Т. 87, № 1. С. 134–140. DOI: [10.31857/S0367676522700259](https://doi.org/10.31857/S0367676522700259).

Пильгаев С.В., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. и др. Трехкомпонентный приемник сигналов очень низкого частотного диапазона с прецизионной привязкой данных к мировому времени. *ИТЭ*. 2021. № 5. С. 115–125. DOI: [10.31857/S0032816221040248](https://doi.org/10.31857/S0032816221040248).

Трошичев О.А., Беспрозванная А.С., Макарова Л.Н. Ионосферно-магнитные возмущения в высоких широтах; под редакцией О.А. Трошичева. Л.: АНИИ, Гидрометеоздат, 1986. 255 с.

Banks P. Collision frequencies and energy transfer electrons. *Planet. Space Sci.* 1966. Vol. 14, no. 11. P. 1085–1103.

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International reference ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017. Vol. 15, no. 2. P. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).

Fang X., Randall C.E., Lummerzheim D., et al. Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A09311. DOI: [10.1029/2008JA013384](https://doi.org/10.1029/2008JA013384).

Fang X., Randall C.E., Lummerzheim D., et al. Parameterization of monoenergetic electron impact ionization. *Geophys. Res. Lett.* 2010. Vol. 37. L22106. DOI: [10.1029/2010gl045406](https://doi.org/10.1029/2010gl045406).

Frahm R.A., Winningham J.D., Sharber J.R., et al. The diffuse aurora: A significant source of ionization in the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. D23. P. 28,203–28,214. DOI: [10.1029/97JD02430](https://doi.org/10.1029/97JD02430).

Glukhov V.S., Pasko V., Inan U.S. Relaxation of transient lower ionospheric disturbances caused by lightning-whistler-induced electron precipitation bursts. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 16971–16979. DOI: [10.1029/92JA01596](https://doi.org/10.1029/92JA01596).

Harang L., Larsen R. Radio wave emissions in the VLF-band observed near the auroral zone — I. Occurrence of emissions during disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1965. Vol. 27. P. 481–497. DOI: [10.1016/0021-9169\(65\)90013-9](https://doi.org/10.1016/0021-9169(65)90013-9).

Hargreaves J.K. Auroral absorption of HF radio waves in the ionosphere: A review of results from the first decade of riometry. *Proc. IEEE*. 1969. Vol. 57. P. 1348–1373. DOI: [10.1109/PROC.1969.7275](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7275).

Jørgensen T.S. Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events. *J. Geophys. Res.* 1966. Vol. 71, no. 5. P. 1367–1375. DOI: [10.1029/JZ071i005p01367](https://doi.org/10.1029/JZ071i005p01367).

Kaeppeler S.R., Marshall R., Sanchez E.R., et al. PyGPI5: A python D- and E-region chemistry and ionization model. *Front. Astron. Space Sci.* 2022. Vol. 9. P. 1–10. DOI: [10.3389/fspas.2022.1028042](https://doi.org/10.3389/fspas.2022.1028042).

Lehtinen N.G., Inan U.S. Possible persistent ionization caused by giant blue jets. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34. L08804. DOI: [10.1029/2006GL029051](https://doi.org/10.1029/2006GL029051).

Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet. *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. A06301. DOI: [10.1029/2007JA012911](https://doi.org/10.1029/2007JA012911).

Makita K. VLF/LF hiss emissions associated with aurora. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Tokyo. Ser. A*. 1979. No. 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).

Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 2002. Vol. 107, iss. A12, CiteID 1468. DOI: [10.1029/2002JA009430](https://doi.org/10.1029/2002JA009430).

Pulliam D.M., Anderson H.R., Stamnes K., Rees M.H. Auroral electron acceleration and atmospheric interactions: (1) Rocket-borne observations and (2) Scattering calculations. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1981. Vol. 86, no. A4. P. 2397–2404. DOI: [10.1029/JA086iA04p02397](https://doi.org/10.1029/JA086iA04p02397).

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).

Shklyar D.R., Nagano I. On VLF wave scattering in plasma with density irregularities. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998. Vol. 103, no. A12. P. 29515–29526. DOI: [10.1029/98JA02311](https://doi.org/10.1029/98JA02311).

Sonwalkar V.S., Harikumar J. An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000. Vol. 105, no. A8. P. 18867–18883. DOI: [10.1029/1999JA00030](https://doi.org/10.1029/1999JA00030).

Stix T. Waves in Plasmas. *American Inst. Phys.* 1992.

Tsyganenko N.A. Modeling the Earth's magnetospheric magnetic field confined within a realistic magnetopause. 1995. *J. Geophys. Res.* Vol. 100. P. 5599–5612. DOI: [10.1029/94JA03193](https://doi.org/10.1029/94JA03193).

URL: <https://space.fmi.fi/image/www/index.php> (дата обращения 14 ноября 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Ларченко А.В., Федоренко Ю.В. Анализ влияния роста риометрического поглощения на выход авроральных шипений к земной поверхности. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 70–76. DOI: [10.12737/szf-111202508](https://doi.org/10.12737/szf-111202508).