

Оценка положения области поглощения космического радишума по данным узкоапертурных риометров

Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Никитенко С.А., Ларченко А.В.

Полярный геофизический институт

Аннотация

Авроральные шипения, представляющие собой один из классов электромагнитных излучений магнитосферы, служат важным индикатором волн-частичных взаимодействий. Динамика этих излучений у земной поверхности тесно связана с динамикой *поглощения космического радиопотока* в нижней ионосфере. Известно, что авроральные шипения могут подавляться при увеличении риометрического поглощения, например, во время брейкапа магнитосферной суббури [Manninen et al., 2020], тогда как при слабых уровнях поглощения между этими явлениями может наблюдаться корреляция [Jørgensen, 1966].

При анализе данных поглощения космического радиопотока за *октябрь-декабрь 2023 г.* были обнаружены случаи поглощения в 0.4-1.2 дБ на узкоапертурных риометрах в Ловозеро и Туманном, совпадающие по времени с наблюдениями авроральных шипений.

В результате анализа данных событий было выдвинуто предположение, что причиной этому явлению **служит локальность области поглощения и области выхода шипений в волновод Земля-ионосфера, а также расположение этих областей на разных широтах.**

Данная работа направлена на получение *количественных оценок положения области поглощения* для перехода от гипотезы о пространственном разнесении областей генерации и поглощения к определению наиболее вероятных координат центра и размеров этой области. Для достижения этой цели проведено моделирование работы узкоапертурных риометров в условиях возмущенной высыпаниями высокоэнергичных электронов ионосферы.

Manninen J., Kleimenova N., Kozlovsky A., Fedorenko Y., Gromova L., Turunen T. Ground-based auroral hiss recorded in Northern Finland with reference to magnetic substorms // Geophysical Research Letters. 2020. vol. 47. e2019GL086285. DOI: 10.1029/2019GL086285.

Jørgensen T.S. Morphology of VLF hiss zones and their correlation with particle precipitation events // J. Geophys. Res. 1966. Vol. 71(5), pp. 1367–1375. DOI: 10.1029/JZ071i005p01367

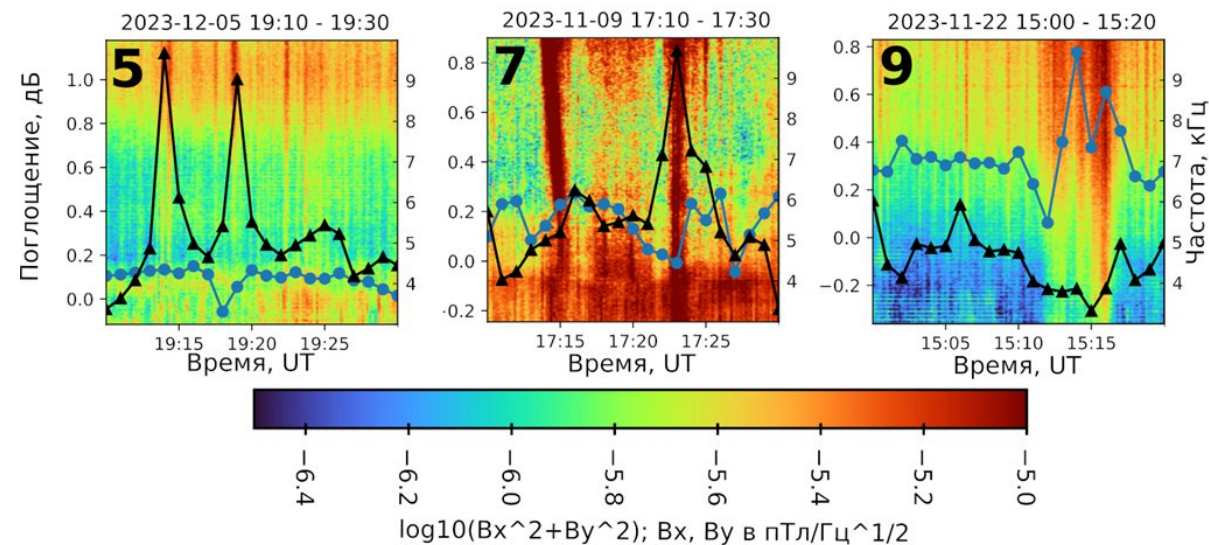


Рис. 1. Спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля с нанесенными на них вариациями риометрического поглощения в obs. Ловозеро (синяя кривая) и Туманный (черная кривая) событий одновременной регистрации всплесков авроральных шипений и увеличения риометрического поглощения в 2023 г.: (5) 5 декабря 19:10-19:30 UT; (7) 9 ноября 17:10-17:30 UT; (9) 22 ноября 15:00-15:20 UT.

Моделирование

Задача оценки размеров и местоположения области поглощения по данным сети риометров относится к типу *обратных задач*. Такие задачи могут быть решены методами статистического моделирования, в которых входные параметры модели задаются их распределениями. Адекватность подбора этих распределений напрямую определяет точность и достоверность решения обратной задачи. Очевидно, что по данным двух узкоапертурных риометров невозможно полностью восстановить пространственную структуру области поглощения. Поэтому мы будем решать обратную задачу в рамках предположения, что **область поглощения вытянута вдоль геомагнитной параллели подобно дуге полярного сияния, а ее поперечное сечение описывается гауссианой**. Тогда положение дуги можно задать геомагнитной широтой, а поперечный размер будет определяться значением среднеквадратического отклонения гауссианы.

В данной работе мы воспользовались *методом Монте-Карло*, позволяющим путем многократного решения прямой задачи оценить наиболее вероятные значения параметров области поглощения.

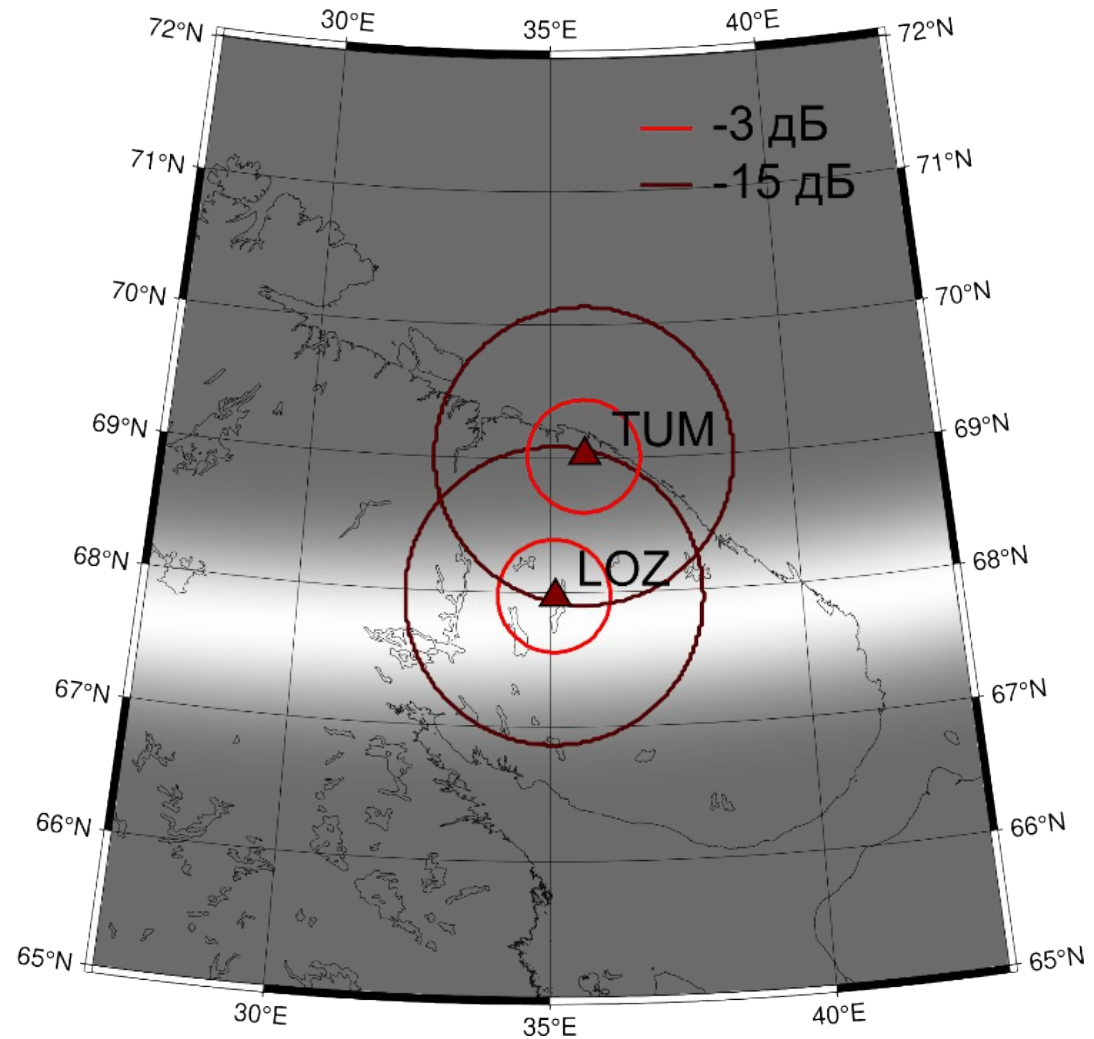


Рис. 2. Карта в географических координатах с указанием положений риометров в обл. Ловозеро (LOZ) и обл. Туманный (TUM), их апертур на уровнях в -3 дБ и в -15 дБ на высоте 90 км, в градациях серого показана область поглощения, заданная в виде дуги с параметрами: $a_{arc}=64.5^\circ$ геомагнитной широты, $\sigma_{arc}=70$ км.

1. Расчет поглощения в ионосфере

Для расчета N_e ионосферы во время высыпаний электронов мы воспользовались программой *pyGPI5* [Kaeppler et al., 2022] – реализацией модели ионизации нижней ионосферы потоком заряженных частиц. Профиль N_e формируется как реакция на заданный поток Q высыпавшихся электронов с заданными энергиями E . Для расчета фоновой концентрации электронов мы использовали эмпирическую модель IRI-2020.

При оценке поглощения космического радишума ионосфера разбивалась на N слоев так, что в каждом слое ионосферные параметры можно считать неизменными. Поглощение в i -ом слое [дБ] рассчитывалось как:

$$A(h_i) = 4.6 \cdot 10^{-5} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \frac{N_e(h_i) v(h_i)}{\omega^2 + v(h_i)^2} dh$$

где h_i – высота нижней границы i -ого слоя над земной поверхностью, $i=1, 2 \dots N$ – номер слоя; $N_e(h_i)$ – концентрация электронов в m^{-3} и $v(h_i)$ – частота столкновений электронов с нейтралами в i -ом слое; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота риометра (в нашем случае 38.5 МГц).

Поперечное сечение дуги каждом слое задавалось одномерной гауссианой с максимумом, равным оценке поглощения возмущенной ионосферы в этом слое $A(h_i)$, и стандартным отклонением σ_{arc} .

Kaeppler S.R., Marshall R., Sanchez E.R., Juarez Madera D.H., Troyer R., Jaynes A.N. PyGPI5: A python D- E-region chemistry and ionization model // Front. Astron. Space Sci. 2022. V. 9, P. 1-10. DOI: 10.3389/fspas.2022.1028042.

2. Модель риометра

Представим источник космического шума как плоскую ламбертову поверхность, яркость всех элементов которой одинакова. На поверхность накладывается сетка и из каждой ячейки сетки проводятся лучи к риометру. Используя оцененные ранее значения поглощения во всем пространстве, производится интегрирование вдоль всех лучей. Сумма поглощений вдоль каждого луча в отдельности с учетом диаграммы направленности антенны риометра дает поглощение космического шума модельного риометра.

Следует отметить, что -15 дБ – это уровень собственных шумов риометра, отсчитанный от среднего уровня космического радишума. Этим уровнем ограничена область видимости риометра. Проекция области, на которой усиление антенны составляет не менее -15 дБ, на плоскость, расположенной на высоте 90 км, показана на рис. 2. Ее диаметр составляет примерно 135 км.

3. Оценка положения области поглощения

Выбор решений осуществляется по минимуму невязки между экспериментально полученными значениями поглощения космического радишума и значениями, оцененными в модели, имитирующей работу риометра в условиях возмущенной высыпавшимися электронами ионосферы. Для оценки E , Q , a_{arc} и σ_{arc} , удовлетворяющих минимуму невязки с ошибкой не выше 0.05 дБ, что соответствует реальной ошибке измерений поглощения космического радишума риометрами, были построены гистограммы этих параметров. По максимуму гистограммы делался вывод о наиболее вероятном решении обратной задачи.

4. Пример оценки положения области поглощения

Пусть область поглощения представляет собой дугу с параметрами $a_{arc} = 64.5^\circ$ геомагнитной широты и $\sigma_{arc} = 70$ км, а поглощение обусловлено высыпаниями электронов с энергией и $E=50$ кэВ и величиной потока $Q=3$ мВт/м². Проекция положения этой области поглощения на земную поверхность показана на рис. 1. В результате расчета поглощения космического радишума на модельных риометрах в obs. Ловозеро и obs. Туманный мы получили 1.42 дБ и 0.09 дБ, соответственно.

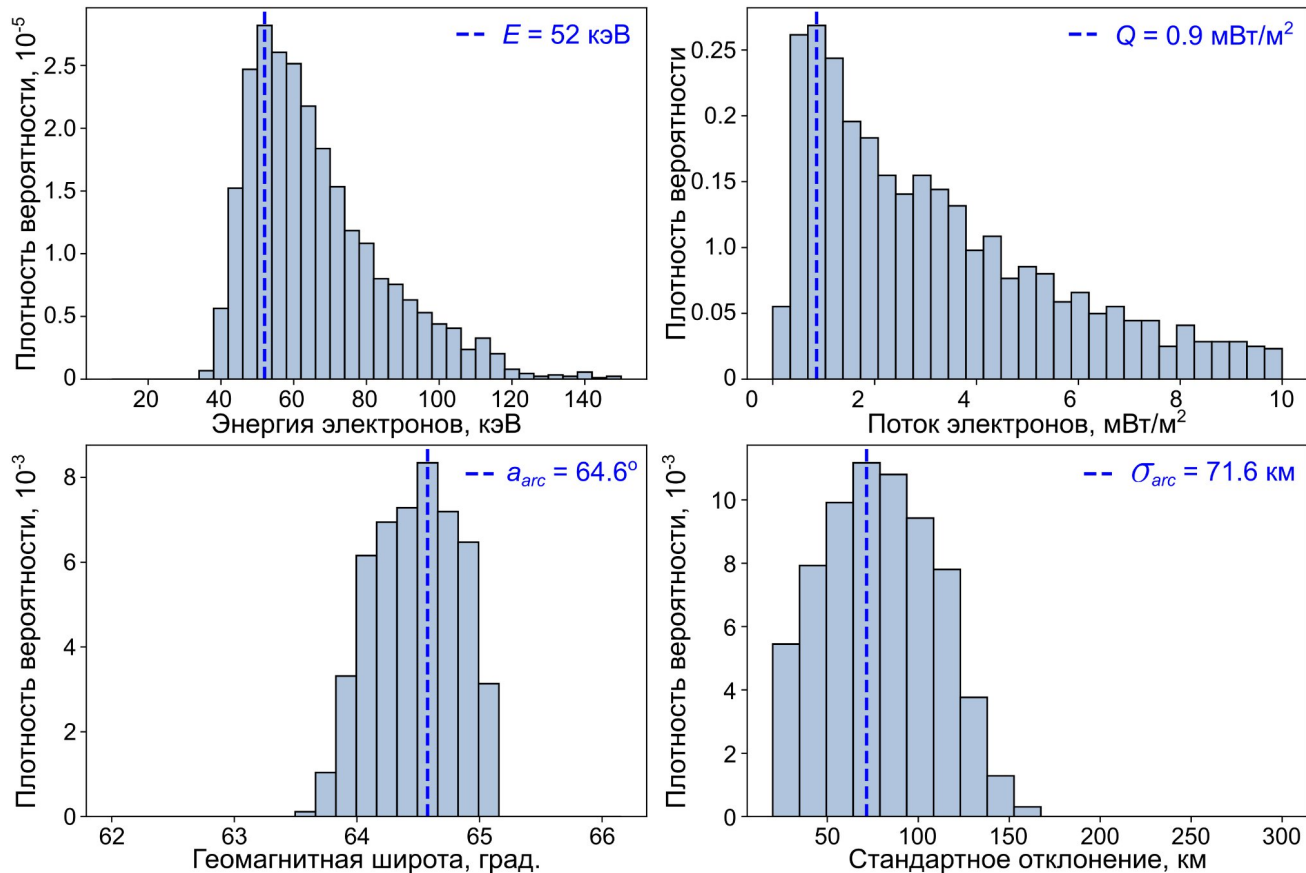


Рис. 3. Гистограммы параметров E , Q , a_{arc} и σ_{arc} , обеспечивающих минимум невязки.

Из рисунка видно, что удалось локализовать область поглощения в выбранных диапазонах разыгрываемых параметров E , Q , a_{arc} и σ_{arc} . Вид гистограмм позволил выделить наиболее вероятные значения параметров, которые в данном примере практически совпали с задаваемыми при постановке задачи.

Данный пример показывает, что при разумных предположениях о форме, размерах и положении области поглощения, а также об энергии и потоке высыпающихся электронов, решение обратной задачи единственно. Этот факт свидетельствует в пользу того, что далее при использовании в качестве входных параметров модели измеренных значений поглощения космического шума, мы также получим единственные значения положения и ширины области поглощения. Именно эти результаты используются для оценки возможности прохождения хисса к наземному наблюдателю при регистрации поглощения.

Результаты моделирования

➤ Событие (5): 5 декабря 19:10-19:30 UT

В obs. Ловозеро было зарегистрировано 2 всплеска аврорального хисса, причем поглощение космического радишума в obs. Ловозеро отсутствовало (0 дБ), а в obs. Туманный составило 1.1 дБ и 1.2 дБ для 1-ого и 2-ого всплесков, соответственно.

Для 1-ого всплеска наиболее вероятное положение центра модельной дуги оказалось на 10 км севернее Туманного. Для 2-ого всплеска центр этой области сместился к северу на 10 км. Стандартное отклонение для обоих случаев оценивается в 46 км, что соответствует ширине области поглощения около 100 км (см. рис. 4).

Полученные оценки положения и размеров области поглощения совпадают с положением и размерами авроральной дуги, наблюдавшейся в этот момент в Ловозеро, центр которой располагался примерно в 160 км к северу от обсерватории.

Учитывая, что авроральные шипения генерируются электронами значительно меньших энергий, наблюдаемая картина может свидетельствовать о высыпании электронов в широком диапазоне энергий в пределах авроральной дуги.

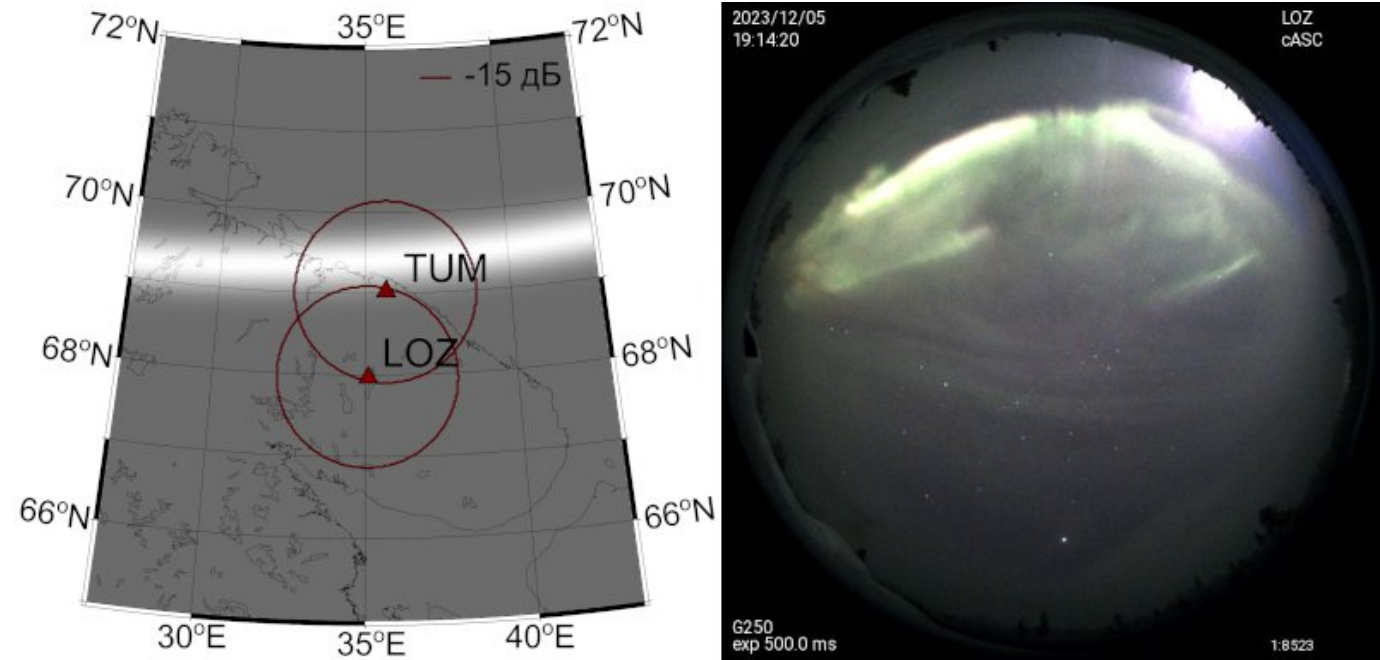


Рис. 4. Слева - проекция области поглощения на земную поверхность для события (5) для первого всплеска аврорального хисса; справа - снимок all-sky камеры в obs. Ловозеро 5 декабря 2023 г. 19:14:20 UT.

Результаты моделирования

➤ Событие (7): 9 ноября 17:10-17:30 UT

В данном событии представляет интерес 2-ой всплеск аврорального хисса, во время которого поглощение космического радишума в обс. Ловозеро и обс. Туманный составило 0 дБ и 0.85 дБ, соответственно.

Согласно результатам моделирования, наиболее вероятное положение центра дуги поглощения приблизительно в 38 км к северу от Туманного, а стандартное отклонение составило 53 км, что соответствует широтному размеру области около 100 км (см. рис. 5).

Полученные оценки положения и размеров области поглощения совпадают с положением и размерами авроральной дуги, наблюдавшейся в этот момент в Ловозеро, центр которой располагался примерно в 200 км к северу от обсерватории.

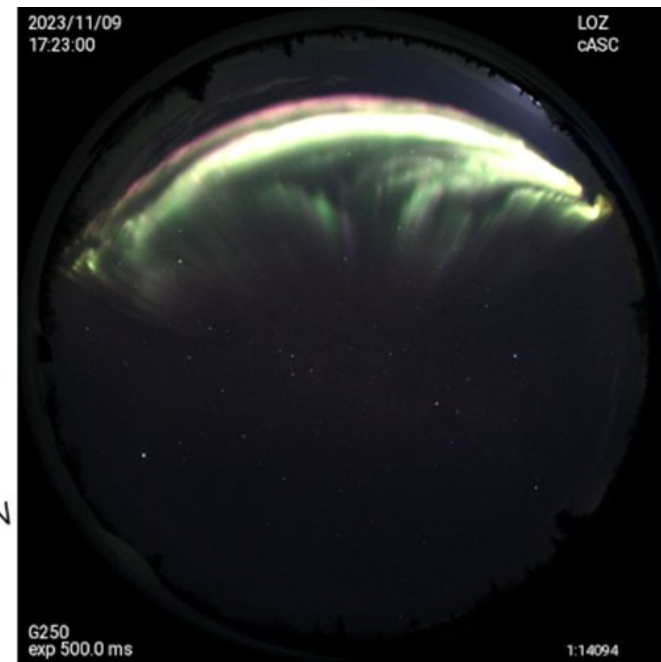
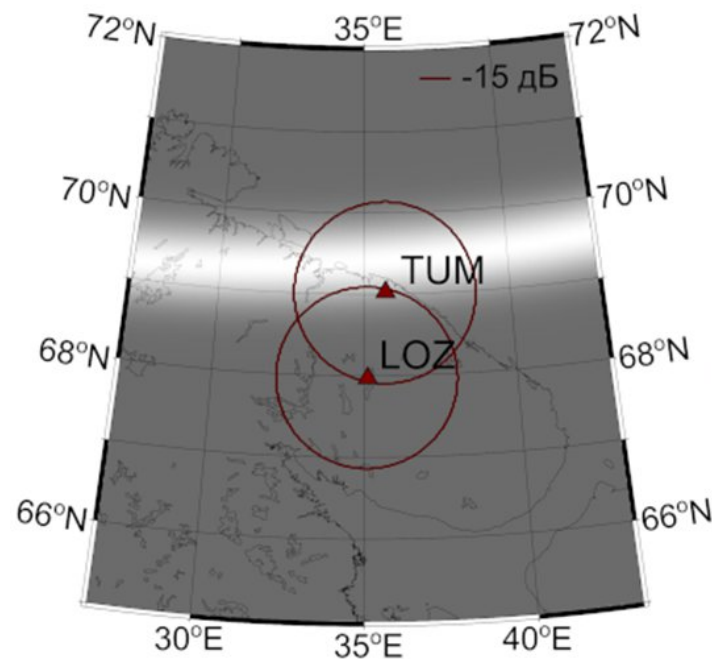


Рис. 5. Слева - проекция области поглощения на земную поверхность для события (7); справа - снимок all-sky камеры в обс. Ловозеро 9 ноября 2023 года 17:23:00 UT.

Результаты моделирования

➤ Событие (9): 22 ноября 15:00-15:20 UT

Поглощение космического радишума в obs. Ловозеро и obs. Туманный во время всплеска аврорального хисса составляло 0.8 и 0 дБ, соответственно.

Согласно результатам моделирования, наиболее вероятное положение центра дуги поглощения находится приблизительно в 50 км к югу от Ловозеро, а стандартное отклонение составило 53 км, что соответствует широтному размеру области около 100 км (см. рис. 6).

Полученные оценки положения и размеров области поглощения совпадают с положением и размерами авроральной дуги, наблюдавшейся в этот момент в Ловозеро, центр которой располагался примерно в 50 км к югу от обсерватории.

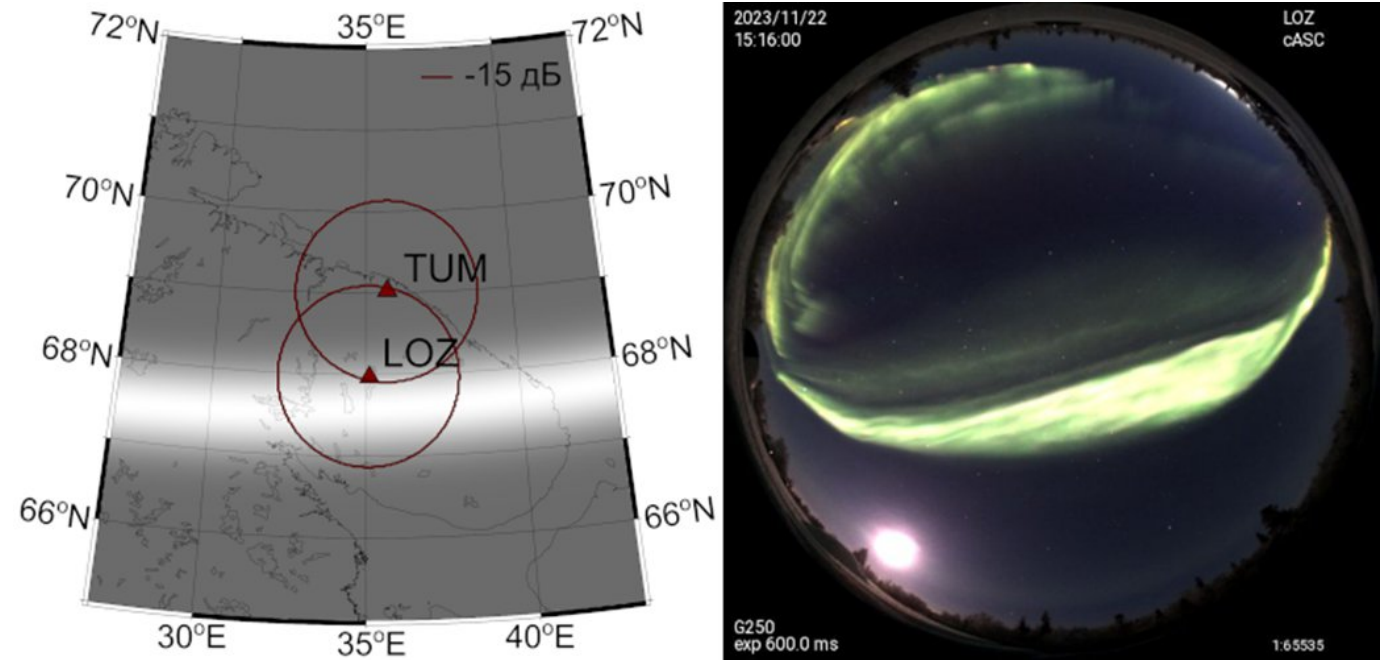


Рис. 6. Слева - проекция области поглощения на земную поверхность для события (9); справа - снимок all-sky камеры в obs. Ловозеро 22 ноября 2023 г. 15:16:00 UT.

Выводы

Разработана численная модель, основанная на методе Монте-Карло, которая по данным измерений узкоапертурных риометров в двух точках (обсерватории Ловозеро и Туманный) позволяет оценить наиболее вероятные положение области повышенного поглощения в ионосфере.

Применение модели к событиям одновременной регистрации авроральных шипений и всплесков поглощения показало возможность количественного анализа параметров выпадающих электронов и локализации области поглощения. Для событий с достаточно высоким уровнем поглощения (>0.4 дБ) и заметной разницей в его значениях между станциями модель позволяет получить единственное и физически обоснованное решение. Для событий (5), (7) и (9), в которых обсуждаемые события появления авроральных шипений и риометрического поглощения сопровождались видимыми в обл. Ловозеро сияниями, оцененное положение и размеры области поглощения практически совпадают с положением и размерами наблюдаемой авроральной дуги.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что разработанная модель является эффективным инструментом для диагностики пространственного распределения области повышенного поглощения в ионосфере по данным наземных риометрических измерений. Совпадение оцененных положений областей поглощения с наблюдаемыми авроральными дугами указывает на то, что в исследованных событиях поглощение вызывалось электронами, выпадающими в тех же структурах, что обусловили полярные сияния и генерацию авроральных шипений. При этом оцененные размеры и положение этой области подтверждают предположение о том, что одновременное наблюдение всплесков шипений и риометрического поглощения вызвано локальностью области выхода шипения в волновод Земля-ионосфера и зоны поглощения в ионосфере и их пространственным разнесением.

Перспективным направлением развития представленной модели является расширение модели для обработки данных трех и более пунктов риометрических наблюдений, что позволит преодолеть ограничения, связанные с вырожденностью решений при близких уровнях поглощения, и перейти к восстановлению двумерной структуры области. Для повышения адекватности моделирования планируется исследование возможности замены гауссова профиля на более сложные формы, лучше описывающие реальную пространственную структуру выпадений.

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».