

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

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

Полярный геофизический институт КНЦ РАН, Апатиты, Россия

В работе представлены результаты анализа влияния изменений поглощения космического радиосигнала в нижней ионосфере на выход авроральных шипений к земной поверхности по данным наземных наблюдений в обсерваториях ПГИ Ловозеро и Туманный. Рассмотрены три всплеска авроральных шипений, окончание которых сопровождается ростом риометрического поглощения до значений 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 поглощения в ионосфере 0.6 дБ обуславливает 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 полное прекращение регистрации авроральных шипений на земной поверхности.

# ЭКСПЕРИМЕНТ

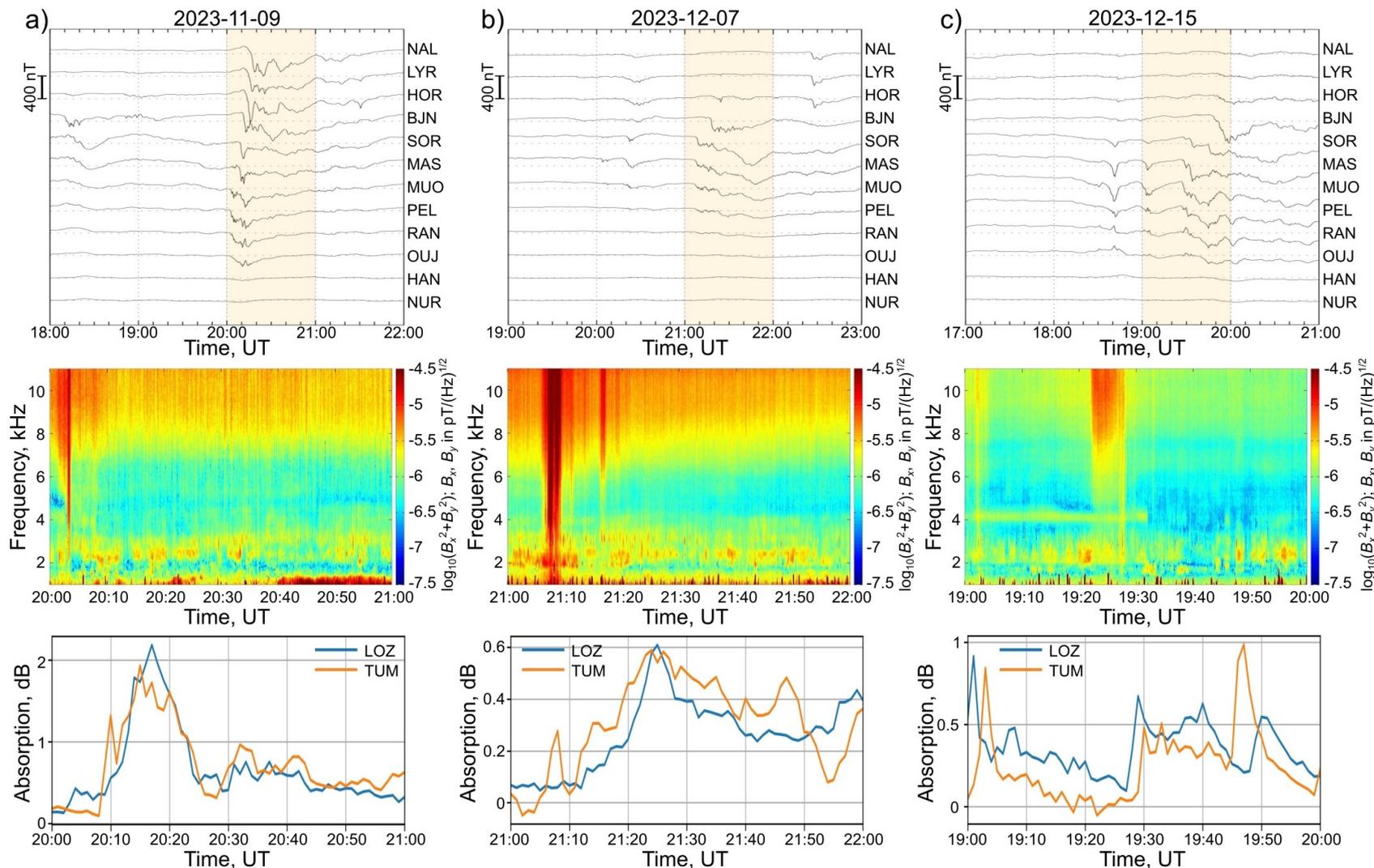
Работа проводилась на основе данных наблюдений аврорального хисса и риометрического поглощения на Кольском полуострове в обсерватории Ловозеро ( $67.97^\circ$  с. ш.,  $35.02^\circ$  в. д.) и в расположенной в ста километрах к северу от нее обсерватории Туманный ( $69.07^\circ$  с. ш.,  $35.73^\circ$  в. д.). Мы анализировали события, в которых после всплеска риометрического поглощения прекращалась регистрация аврорального хисса. Измерения ОНЧ полей проводились в обс. Ловозеро с помощью трехкомпонентного приемника [Пильгаев, 2021]. Для измерения значений риометрического поглощения использовались риометры в обс. Ловозеро и обс. Туманный. Эти риометры работают на частоте 38.5 МГц, а их приемные антенны имеют угловую апертуру  $44^\circ$ .

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



*Карта точек наблюдений*

# ЭКСПЕРИМЕНТ



(сверху вниз) Магнитограммы скандинавской меридиональной цепочки IMAGE, спектрограммы горизонтальной компоненты магнитного поля в диапазоне частот 1-11 кГц в obs. Ловозеро и графики зависимости уровня риометрического поглощения в obs. Ловозеро и obs. Туманный от времени для событий 2023 г.: а) 9 ноября 20:00-21:00 UT, б) 7 декабря 21:00-22:00 UT и в) 15 декабря 19:00-20:00 UT.

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

# МОДЕЛИРОВАНИЕ

Наблюдаемое в эксперименте увеличение риометрического поглощения связано с высыпанием авроральных электронов, которое часто происходит во время магнитосферной суббури. Энергии высыпающихся электронов варьируются от  $\sim 100$  эВ до нескольких сотен кэВ, что позволяет им проникать до D-слоя ионосферы (60-90 км). Для исследования влияния риометрического поглощения на выход аврорального хисса к земной поверхности необходимо решить две задачи:

- Найти профили электронной концентрации Ne, обеспечивающие наблюдаемый уровень риометрического поглощения.
- Оценить затухание аврорального хисса при распространении к земной поверхности через ионосферу для выбранных профилей.

Для нахождения необходимых профилей электронной концентрации Ne мы применили модель ионизации ионосферы [Lehtinen, Inan, 2007], которая позволяет связать величину потока высыпающихся электронов и их энергию с изменениями профиля ионосферы.

Для расчета распространения аврорального хисса сквозь модифицированную ионосферу к земной поверхности мы использовали так называемый полноволновой (или full-wave) метод, основанный на решении волнового уравнения в плоскостистой среде [Lehtinen, Inan, 2008].

*Lehtinen, N. G., and U. S. Inan (2007), Possible persistent ionization caused by giant blue jets, Geophys. Res. Lett., 34, L08804, doi: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. V. 113. A06301. 2008. doi:10.1029/2007JA012911*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ. ФОРМИРОВАНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ

- Формирование профилей электронной концентрации ионосферы во время высыпания высокоэнергичных электронов с помощью pyGPI5 (реализация на языке Python модели ионизации [Lehtinen, Inan, 2007]);
- Расчет фоновой концентрации, на основе которой происходит формирование добавочной концентрации, обусловленной высыпаниями энергичных электронов, с помощью стандартной эмпирической модели IRI-2020.
- Концентрация и температура нейтральных частиц, необходимые для расчета возмущенного профиля  $N_e$ , оценивались по модели NRLMSISE-00. Распределение по энергиям высыпающихся электронов задано в виде максвелловского распределения по энергиям. Дифференциальный поток электронов определяется выражением:

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

где  $Q_0$  - полный поток энергии высыпающихся электронов в кэВ/(см<sup>2</sup>·с),  $E_0$  - характеристическая энергия в кэВ, при которой спектральный поток имеет максимум [Fang et al., 2008]. Для удобства далее мы измеряли поток энергии высыпающихся электронов в мВт/м<sup>2</sup>,  $Q_0[\text{мВт/м}^2] = Q_0[\text{кэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})] \cdot 1.6 \cdot 10^{-9}$ .

- Поиск профилей электронной концентрации, способных обеспечить наблюдаемые экспериментально значения риометрического поглощения, мы проводили методом перебора, варьируя энергию  $E_0$  и плотность потока  $Q_0$  высыпающихся электронов.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ.

## МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Модель включает в себя [Лебедь и др., 2019]:

- Формирование случайного поля квазиэлектростатических волн (т. е. Авроральные шипения) в пучке высыпающихся электронов.
- Расчет рассеяния квазиэлектростатических волн на мелкомасштабных неоднородностях  $N_e$  в верхней ионосфере
- Расчет распространения квазиэлектростатических волн до высоты рассеяния и рассеянных волн к наземному наблюдателю full-wave методом в приближении плоско-слоистой среды

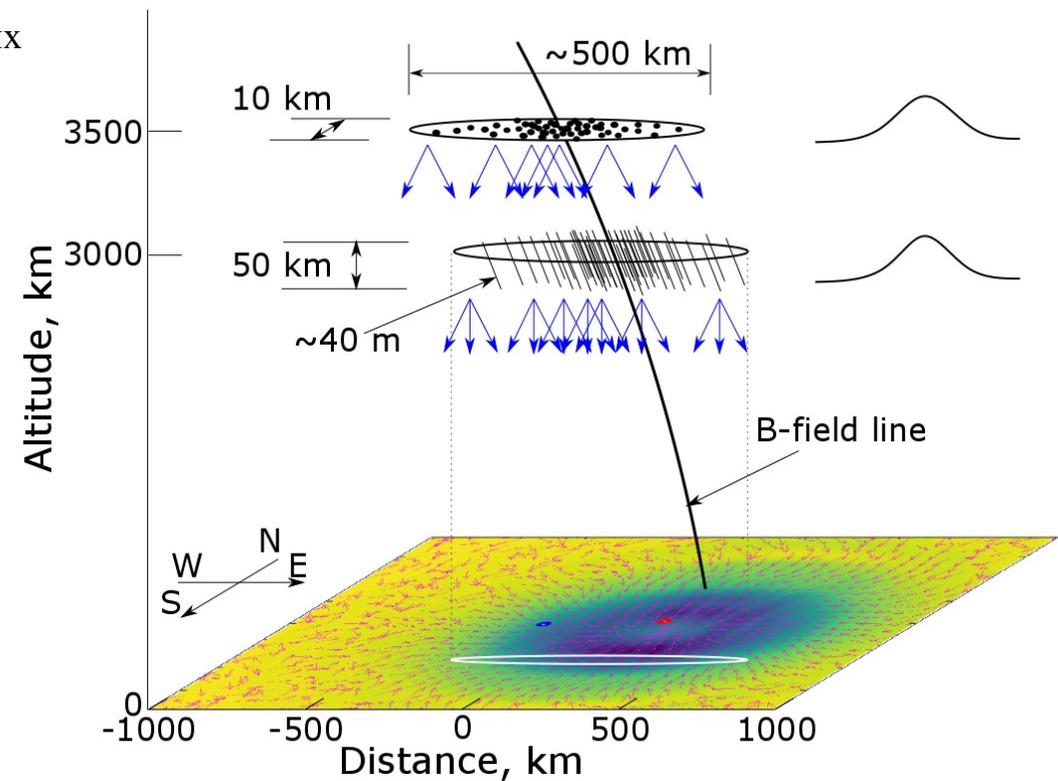
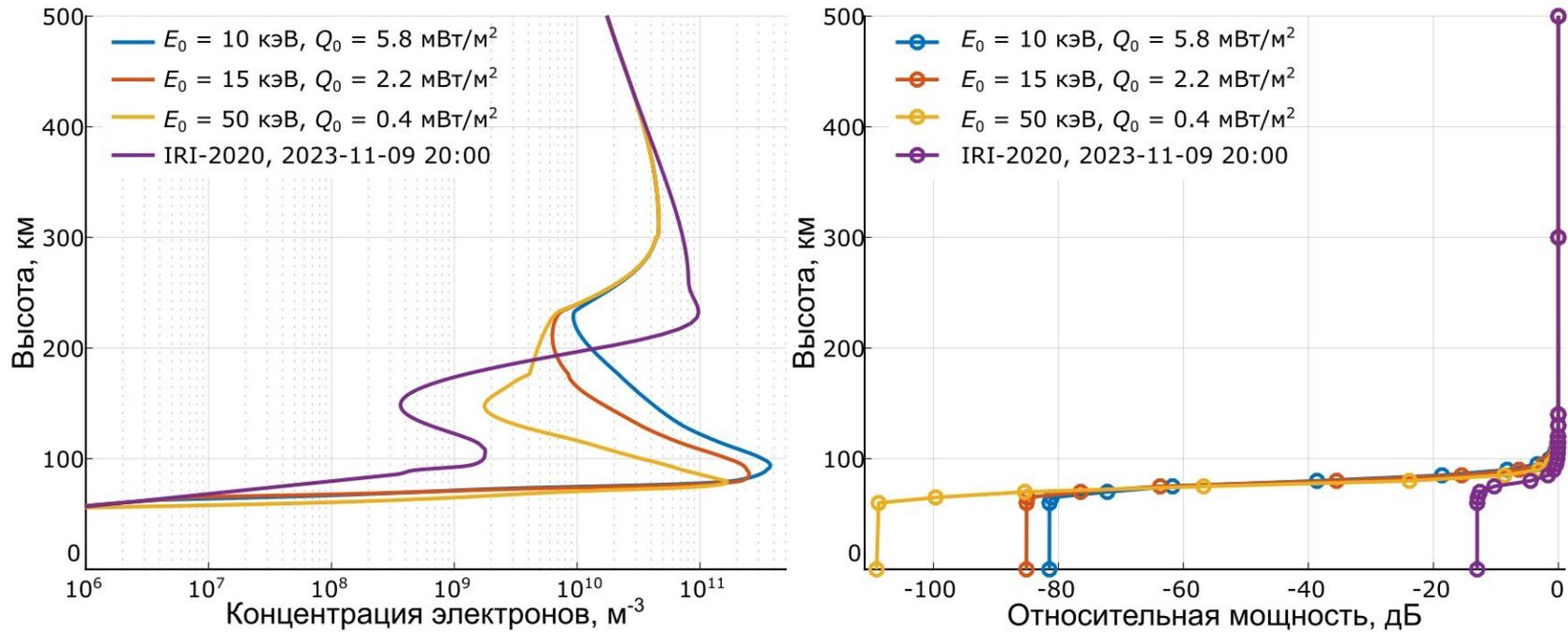


Схема моделирования распространения авроральных шипений к земной поверхности

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

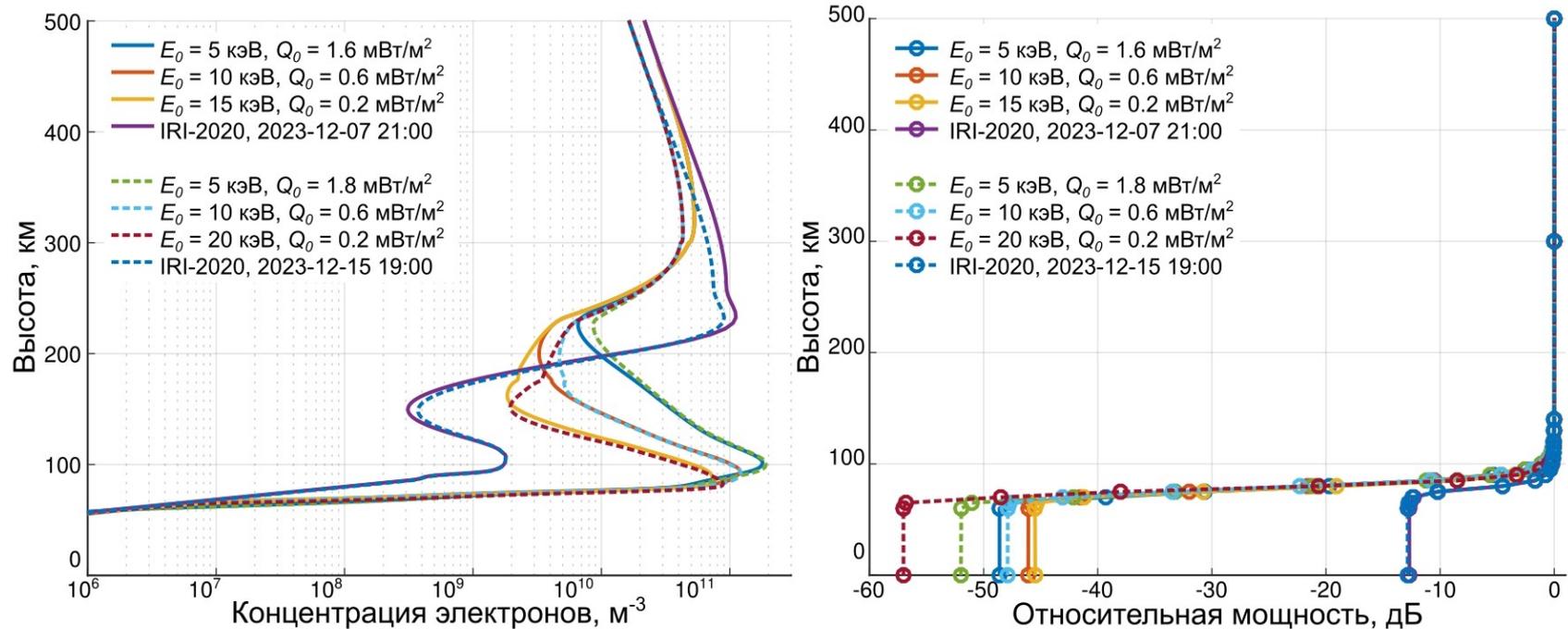


Моделирование события 1. Слева – профили электронной концентрации ионосферы: фоновый, полученный с помощью модели IRI-2020, и возмущенные, которые могут обеспечить риометрическое поглощение в  $2.2 \pm 0.1$  дБ. Справа – соответствующие этим профилям зависимости относительной мощности свистовой волны с высотой  $A_{hiss}(h)$ .

Во время события 1 риометрическое поглощение достигло значения 2.2 дБ. Наблюдаемая экспериментально величина поглощения космического радишума возможна при характеристических энергиях  $E_0$  высыпающихся электронов больше 10 кэВ. При этом, чем выше энергия высыпающихся электронов, тем ниже они проникают в ионосферу. Так, наличие электронов с энергией 50 кэВ приводит к максимуму электронной концентрации на высоте 79 км (слева).

На рисунке справа показаны рассчитанные зависимости относительной мощности свистовой волны от высоты  $A_{hiss}(h)$ , соответствующие профилям, показанным слева. Видно, что  $A_{hiss}$  свистовой волны начинает резко уменьшаться с высоты  $\sim 100$  км, где присутствует увеличенная электронная концентрация. Для спокойного фонового профиля  $N_e$  полное ослабление свистовой волны после прохождения от области рассеяния до земной поверхности через ионосферу составило  $\approx 13$  дБ. Возмущенные высыпающимися электронами профили электронной концентрации приводят к затуханию аврорального хисса в 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.

# РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ



Моделирование событий 2 и 3. Слева – профили электронной концентрации ионосферы: фоновый, полученный с помощью модели IRI-2020, и возмущенные, которые могут обеспечить риометрическое поглощение в  $0.6 \pm 0.1$  дБ (сплошными линиями) и в  $0.7 \pm 0.1$  дБ (штриховыми линиями). Справа – соответствующие этим профилям зависимости относительной мощности свистовой волны с высотой  $A_{hiss}(h)$ .

В данных случаях, среди профилей  $N_e$ , приводящих к экспериментальным значениям риометрического поглощения, были те, что образованы распределениями высыпающихся электронов с характеристическими энергиями  $E_0 = 5$  кэВ, то есть электронами из диапазона тех же энергий, что и у электронов, ответственных за генерацию аврорального хисса. Поскольку глубина проникновения в ионосферу электронов с энергиями 5-15 кэВ меньше, максимумы электронной концентрации (по сравнению с событием 1) здесь находятся чуть выше, на высотах порядка 90 км.

В данном случае высыпающиеся электроны приводят к ослаблению свистовых волн примерно на 45-50 дБ. В этом случае уровень отношения сигнал/шум на земной поверхности будет порядка -5 дБ, что составляет 0.3 от мощности сигнала аврорального хисса над ионосферой. Поскольку в данном случае мощность сигнала аврорального хисса сопоставима или меньше уровня естественных шумов волновода Земля-ионосфера, в данной ситуации авроральный хисс также не будет обнаружен в данных регистрации электромагнитного поля. Таким образом, наблюдаемое экспериментально прекращение хисса в обл. Ловозеро, сопровождаемое одновременным ростом риометрического поглощения во время начала суббури, скорее всего вызвано ухудшением условий распространения свистовых волн в нижней ионосфере.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены события наземной регистрации аврорального хисса (авроральных шипений), который пропадает во время брейкапа сияний, сопровождаемого ростом риометрического поглощения до значений 0.6-2.2 дБ. Для объяснения наблюдаемого эффекта было проведено моделирование распространения пучка рассеянных на мелкомасштабных неоднородностях ионосферы свистовых волн, формирующих авроральный хисс, к земной поверхности в условиях невозмущенного профиля электронной концентрации и возмущенного высыпаниями энергичных электронов с максвелловским распределением по скоростям и различными значениями плотности их потока  $Q_0$  и характеристической энергии  $E_0$ . Анализ результатов моделирования показал, что рост риометрического поглощения даже до уровня 0.6 дБ обуславливает ослабление хисса на 45-50 дБ относительно его мощности на высоте 800 км, что сопоставимо с уровнем собственных шумов волновода Земля-ионосфера. В свою очередь, при уровне риометрического поглощения в 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».