

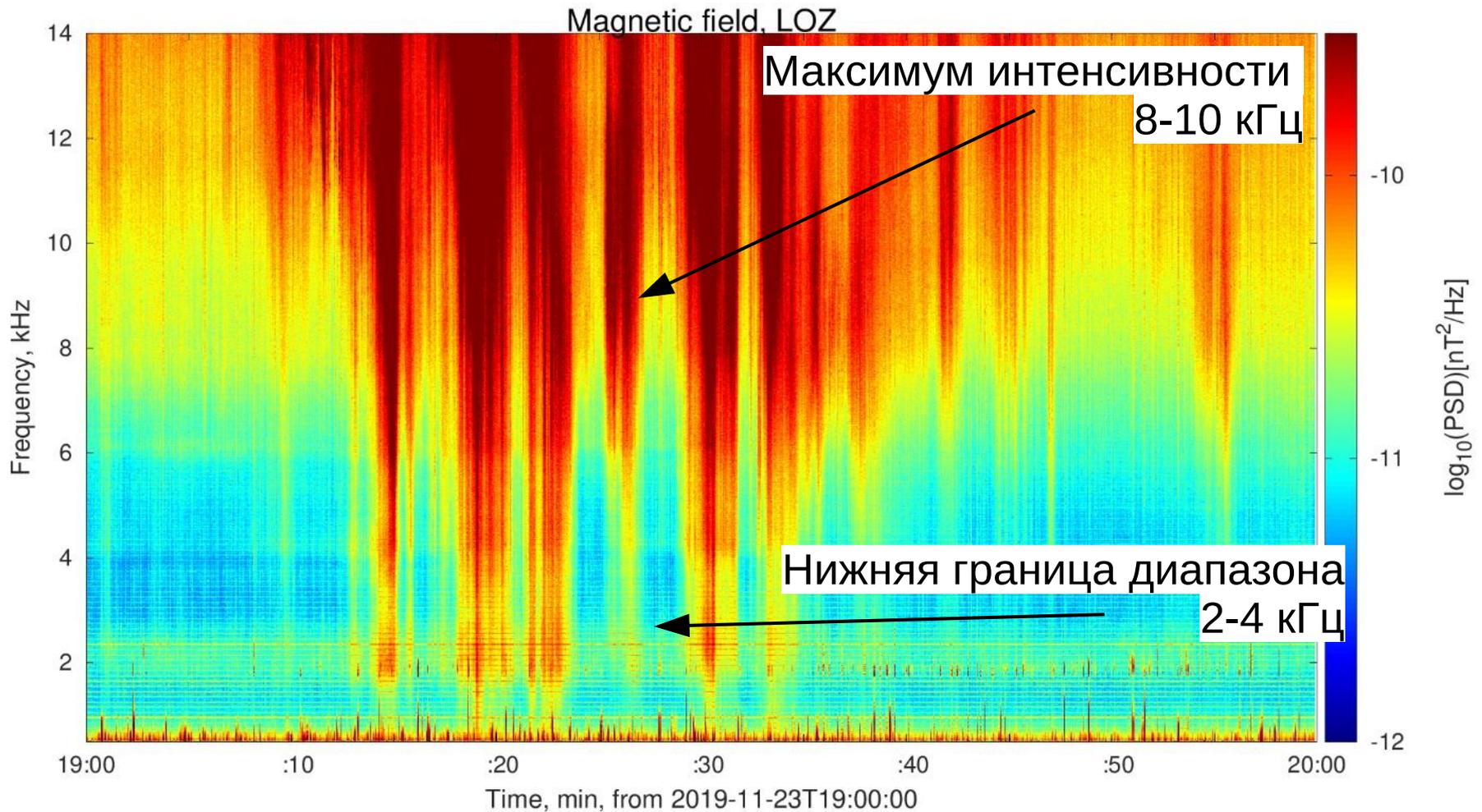
Исследование условий прохождения аврорального хисса от источника к земной поверхности

Никитенко А.С.¹, Федоренко Ю.В.¹, Бекетова Е.Б.²

¹Полярный геофизический институт

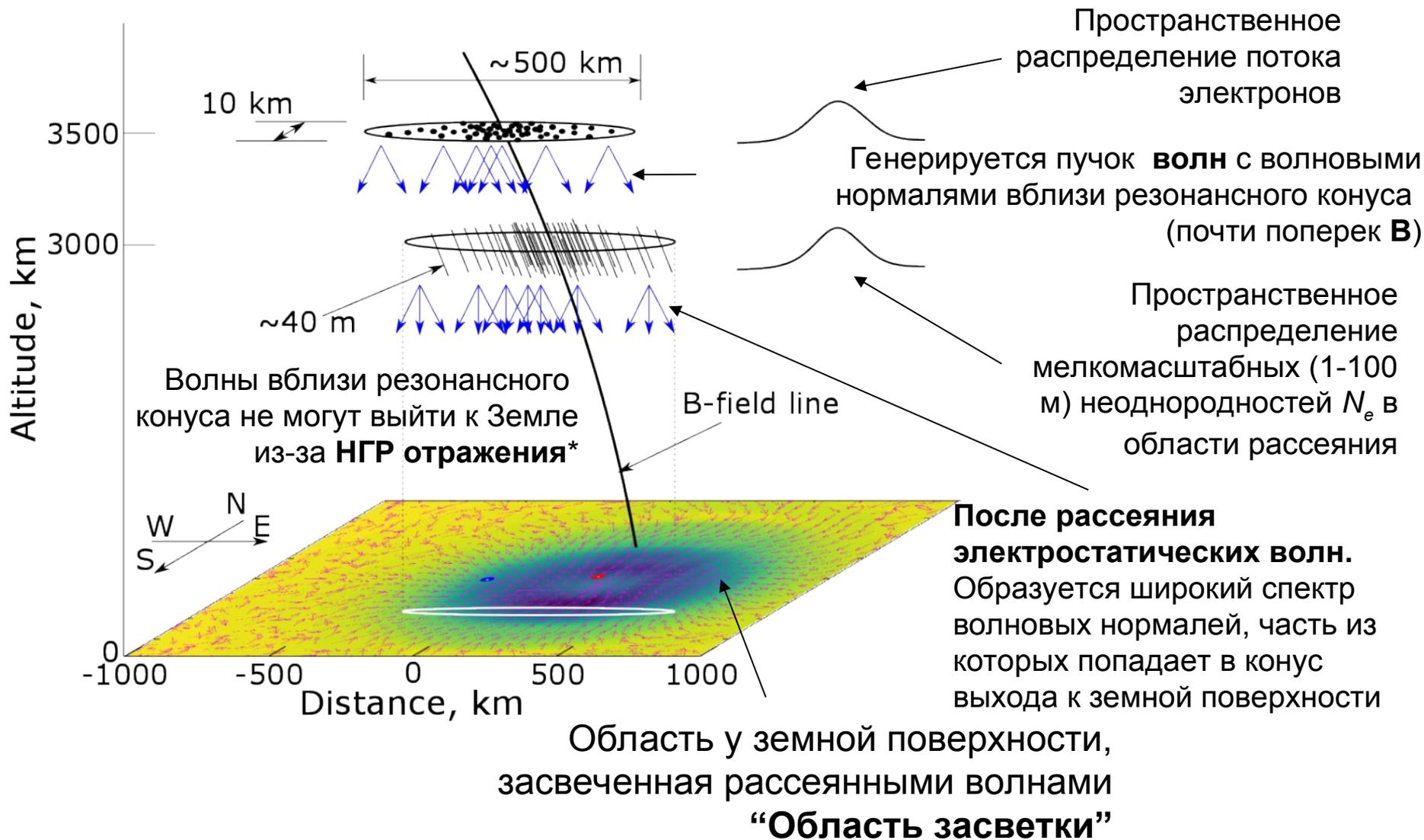
²*Филиал Мурманского арктического
госуниверситета в г. Апатиты, г. Апатиты,
Россия*

Авроральный хисс



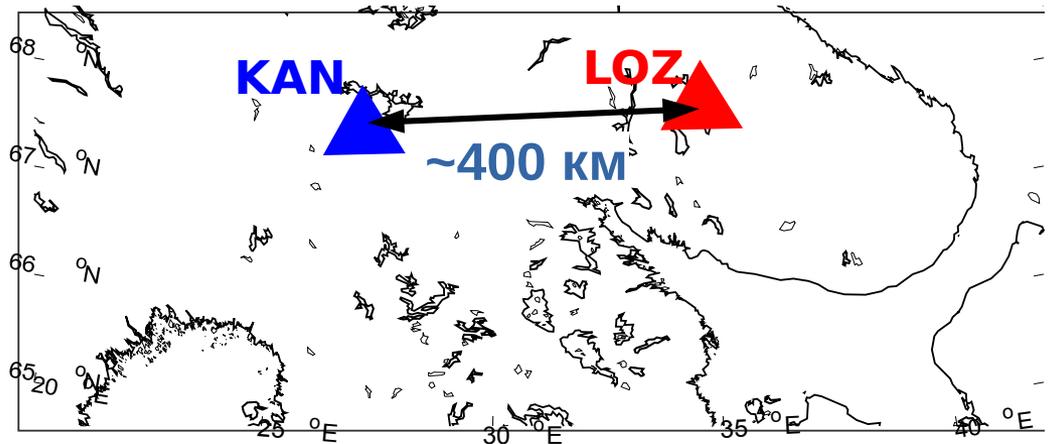
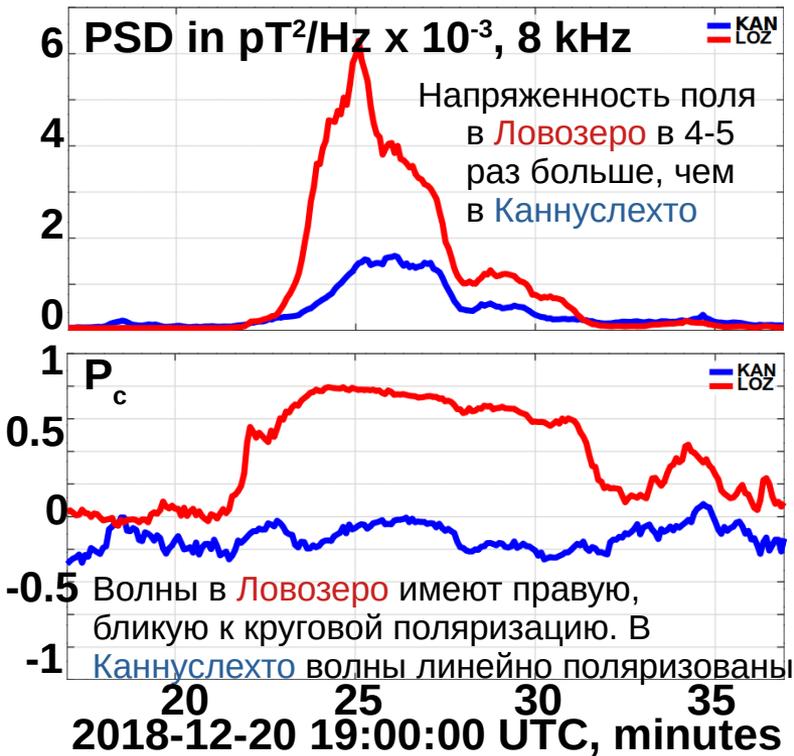
Возникает в результате развития черенковского резонанса электронов с энергиями 0.1-10 кэВ.

Генерация и распространение аврорального хисса к земной поверхности

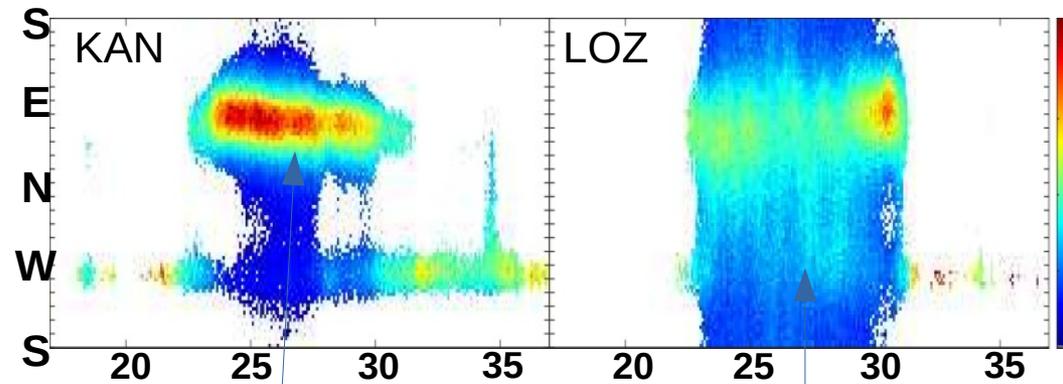


*НГР отражение наступает на высоте, где частота волны равна локальной частоте нижнегибридного резонанса

Регистрация аврорального хисса в разнесенных точках. Малые размеры области засветки.



Распределение плотности потока энергии по углам прихода



Диапазон углов прихода в 3 раза меньше, чем в LOZ. Волны приходят с востока (со стороны Ловозеро)

Плотность потока энергии распределена по диапазону углов 0-360 градусов. Область засветки "над головой"

- Правая круговая поляризация и распределение энергии по углам прихода в диапазоне $[0,360)$ в LOZ → точка около центра области засветки
- Линейная поляризация волн и малый относительно LOZ разброс по углам прихода в распределении в KAN → точка далеко от центра области засветки
- Размеры области засветки меньше расстояния между станциями

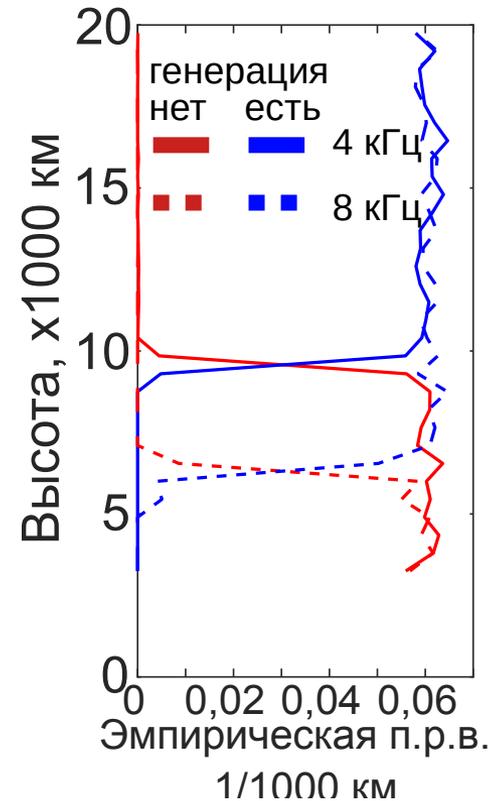
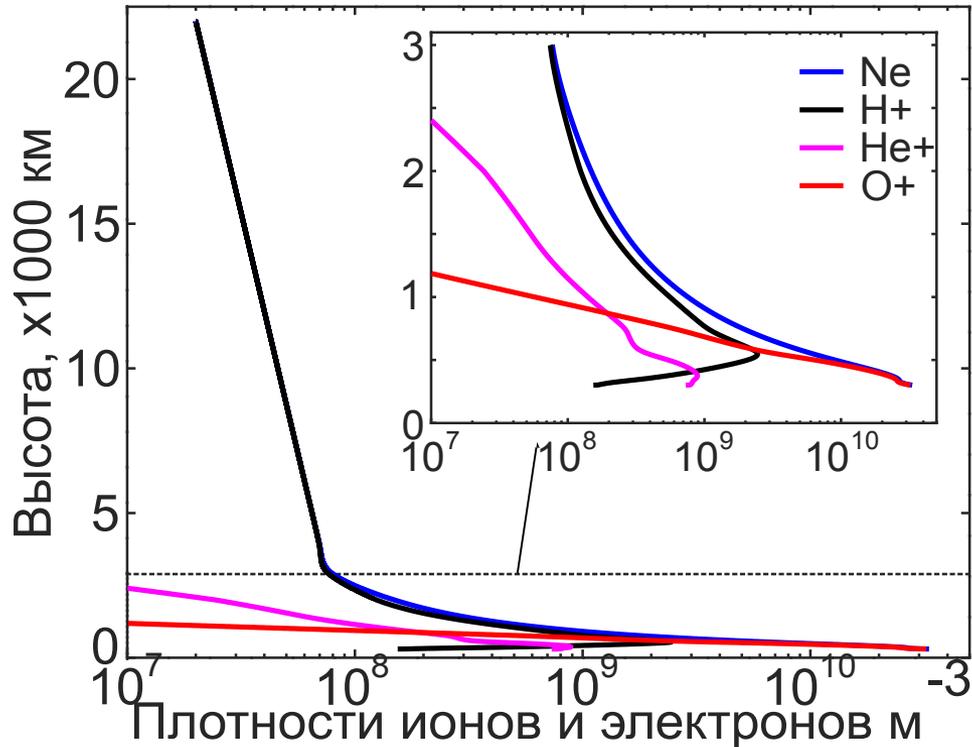
Моделирование распространения до высот НГР отражения.

- Авроральный хисс генерируется электронами с энергиями 0.1-10 кэВ на высотах ~5000-20000 км вследствие черенковского резонанса; скорость электронов рассчитывалась из максвелловского распределения по энергиям , $p(E) = E \exp(E/E_0)$, $E_0=5$ кэВ:

$$v_e \cos \theta = v_{\parallel} = v_{ph} = c/n_z; \quad \partial F / \partial v_{\parallel} = 0$$

- Компонента n находится из дисперсионного уравнения: $\det(n^2 I - n \cdot n^T - \hat{\epsilon}) = 0$
- Поток электронов имеет конечную ширину, поэтому акты генерации распределены не только по высоте, но и по широте и долготе.
- Распределение актов генерации по высоте считалось равномерным в промежутке от 3000 до 20000 км
- Распределение плотности электронов пучка было задано в виде распределения Гаусса с центром на силовой линии магнитного поля, пересекающей земную поверхность на широте 68 градусов и среднеквадратичным отклонением 0.25 градуса
- Вследствие цилиндрической симметрии задачи направления волновых нормалей не определены и считались равномерно распределенными в интервале $[0, 2\pi)$

Обсуждение результатов моделирования



- Дипольная модель геомагнитного поля.
- Концентрации электронов и ионов из IRI-2016
- Частота столкновений электронов и ионов с нейтралами рассчитывалась из [1,2].
- Концентрации нейтралов - модель NRLMSIS 2.0.
- Концентрации на высотах до 20 тыс. км – экстраполяция профилей IRI-2016 от 3 тыс. км так, чтобы $N_e=10^6$ м⁻³ на 22 тыс. км.

Наименьшая возможная высота генерации отличается для разных частот. Для 4 кГц она составляет около 10 тыс. км и около 6 тыс. км для 8 кГц.

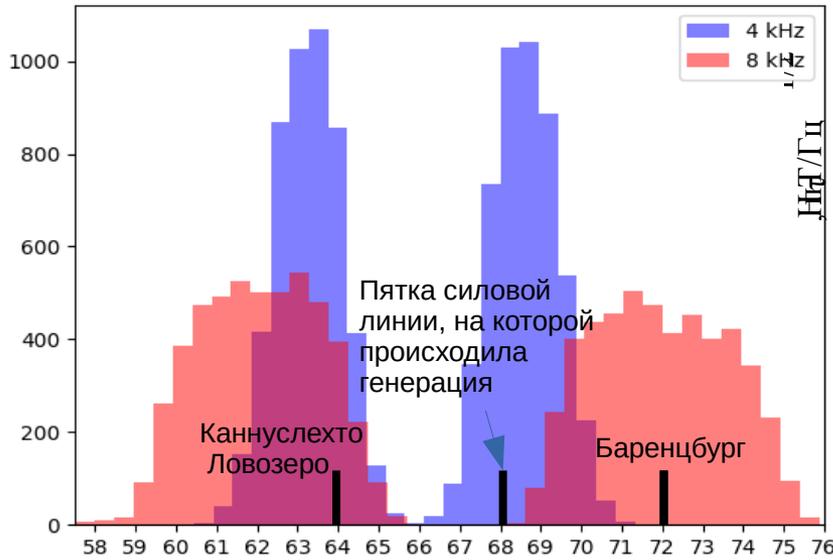
1. Davies A., Lester M., Robinson T.R. Deriving the normalized ion-neutral collision frequency from EISCAT observations // Ann. Geophys. V. 15. No 12. P. 1557–1569. 1997.

2. Banks P. Collision frequencies and energy transfer electrons // Planet. Space Sci. V. 14. No 11. P. 1085–1103. 1966.

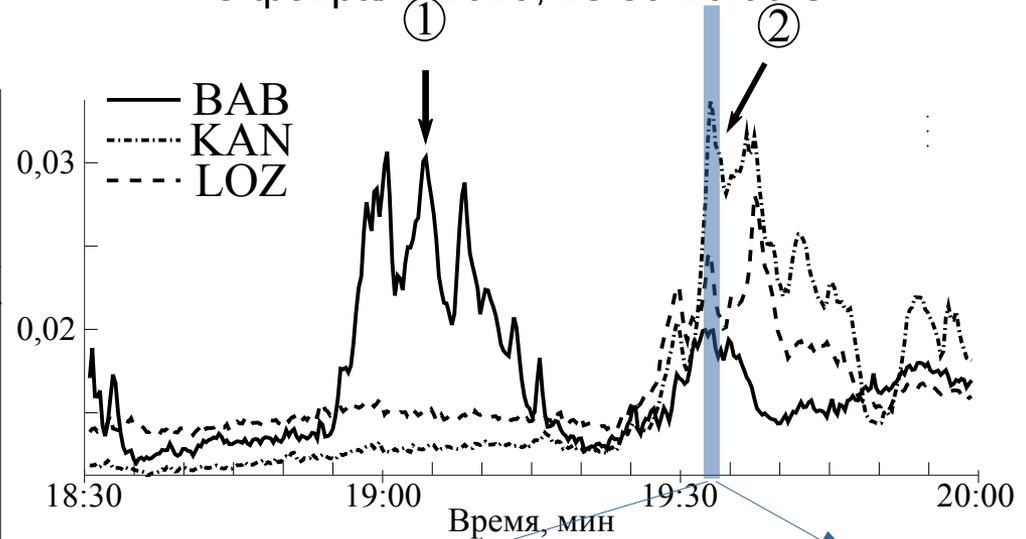
Обсуждение результатов моделирования

распределения широт, на высоте НГР отражения
(800 км для 8 кГц и 1300 км для 4 кГц).

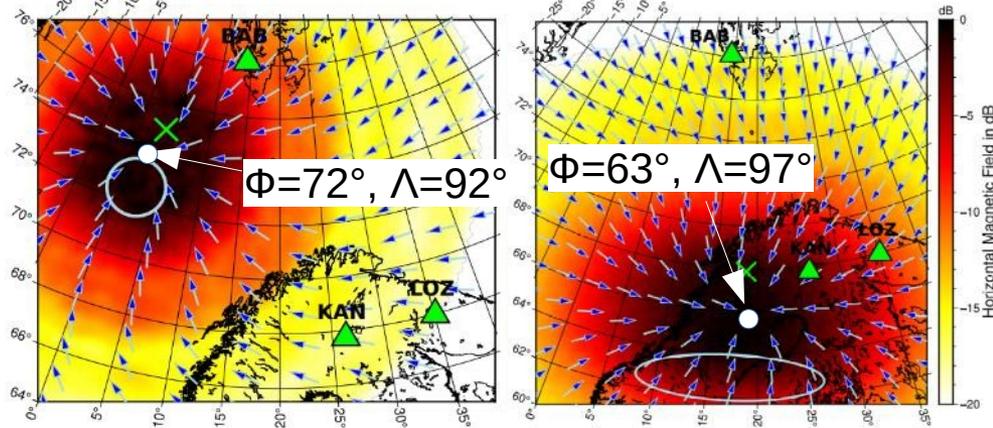
3 февраля 2019, 18:30-20:00 UT.



При учете случайного характера генерации электростатических волн в меридиональной плоскости формируется два пучка лучей к югу и северу от силовой линии, на которой произошла генерация. Ширина пучков по широте и отклонение лучей от силовой линии генерации на частоте 8 кГц на высоте НГР отражения выше по сравнению с 4 частотой кГц.



Положение и размеры "области засветки", оцененные на основе сравнения экспериментальных и модельных данных



Одновременное наблюдение всплесков на трех станциях не может быть объяснено существованием единственной области в ионосфере, заполненной мелкомасштабными неоднородностями

Моделирование рассеяния на неоднородностях N_e

- Для выхода аврорального хисса к земной поверхности электростатическая волна должна быть рассеяна на неоднородностях N_e .

На область с неоднородностями падает волна

$$E(x, y, z) = E_0 e^{ik_0(n_x x + n_y y + n_z z)}$$

Волновое поле падающей волны определяется из однородного уравнения:

$$(n^2 - n \cdot n^T - \hat{\epsilon}) E = 0$$

Поле в области неоднородностей представляет собой сумму падающей и рассеянной волн $E + E_s$

Борновское приближение основано на предположении, что $E \gg E_s$, т.е. рассеянным полем пренебрегают. Тогда волновое уравнение записывается в виде

$$\nabla \times (\nabla \times E_s) - k_0^2 \hat{\epsilon}_0 E_s \approx k_0^2 \Delta \hat{\epsilon} E$$

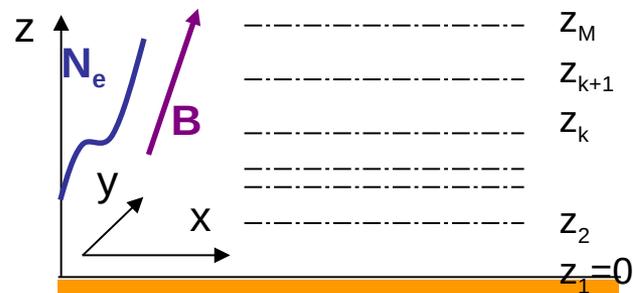
Ток, возникающий в неоднородностях определяется как

$$\Delta J = -ik_0 \Delta \hat{\epsilon} \cdot E / (Z_0 \epsilon_0)$$

- Так как $|E_0|$ не определен, мы полагаем, что амплитуда волны есть случайная величина, распределенная по Рэлею, а ее начальная фаза равномерно распределена в интервале $[0, 2\pi]$.

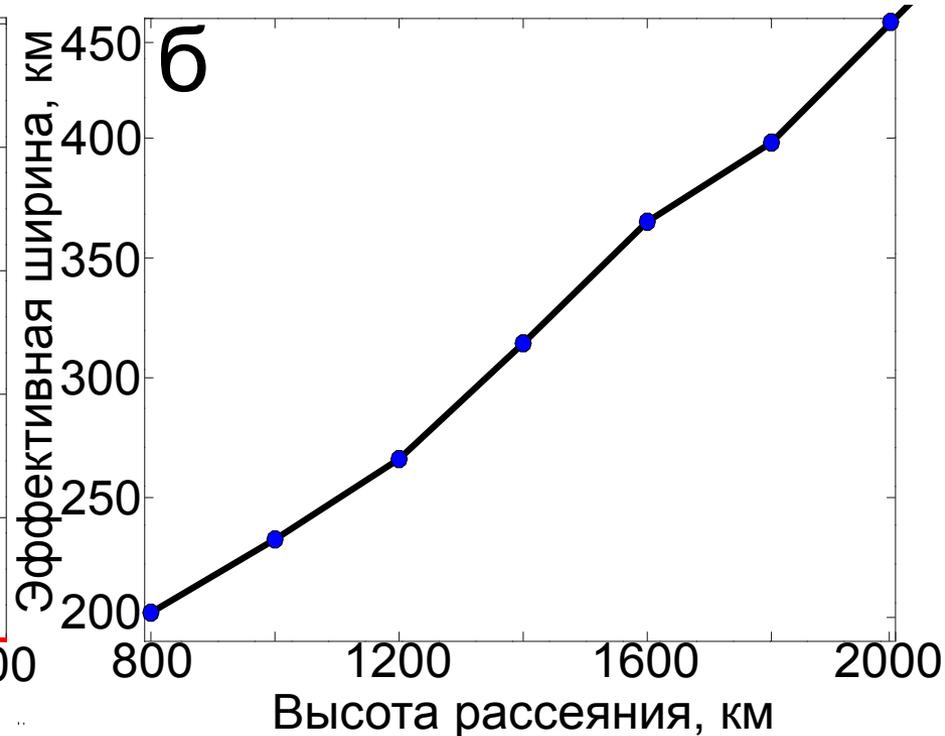
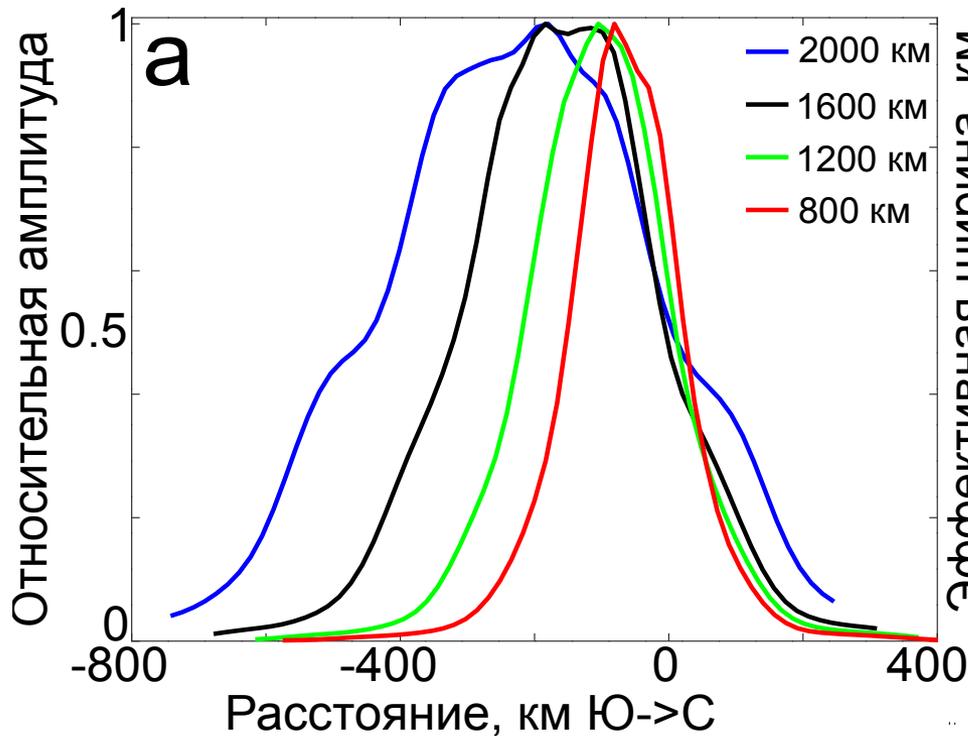
Распространение рассеянных волн к земной поверхности

- Для расчета полей на земной поверхности мы использовали конечно-разностный метод решения волнового уравнения (full-wave метод)
- Область моделирования от земной поверхности до высоты неоднородностей разбивалась на слои, толщина которых была согласована со скоростью изменения N_e .
- На верхнем слое в качестве граничных условий использовалось условие свободного ухода волн. В нижнем слое граничные условия задавались как коэффициенты отражения TE и TM мод от земной поверхности.
- Источники в виде компонент тока $\Delta \mathbf{J}$ задавались как граничные условия для слоев с неоднородностями.



* 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 // Journal of Geophysical Research, V. 113, A06301, 2008.

Обсуждение результатов моделирования



Распределения магнитного поля у Земли в меридиональной плоскости при рассеянии волн на области с неоднородностями шириной 50 км на высоте 800 км, 1200 км, 1600 км и 2000 км;

зависимость эффективной ширины области засветки от высоты рассеяния.

С ростом высоты рассеяния ширина “области засветки” растет практически линейно. Кроме того, увеличивается расстояние между положением максимума распределения напряженности магнитного поля на земной поверхности и пяткой силовой линии, на которой произошла генерация. Рассеяние электростатических волн на высотах 800-1200 км могло обусловить наблюдаемую локальность области засветки.

Выводы

- С помощью моделирования распространения аврорального хисса от источника к земной поверхности исследованы ионосферные условия, обуславливающие наблюдаемые экспериментально малые размеры области засветки.
- Выявлено, что для выбранной модели ионосферы наименьшая возможная высота генерации отличается для разных частот. Для 4 кГц она составляет около 10 тыс. км и около 6 тыс. км для 8 кГц.
- При учете случайного характера генерации электростатических волн в меридиональной плоскости формируется два пучка лучей к югу и северу от силовой линии, на которой произошла генерация. Ширина пучков по широте и отклонение лучей от силовой линии генерации на частоте 8 кГц на высоте НГР отражения выше по сравнению с 4 частотой кГц.
- Показано, что с ростом высоты рассеяния электростатических волн в конус выхода ширина области засветки растет практически линейно. Кроме того, увеличивается расстояние между положением максимума распределения напряженности магнитного поля на земной поверхности и пяткой силовой линии, на которой произошла генерация.
- Возникновение двух пучков волн позволяет объяснить результаты одновременных наблюдений аврорального хисса в авроральных и приполярных широтах 03 февраля 2019 18:30-20:00 UT, когда регистрация всплесков была обусловлена существованием двух областей с неоднородностями. Рассеяние электростатических волн на высотах НГР отражения (800-1200 км) могло вызвать малые размеры области засветки, наблюдаемые в Каннуслахто и Ловозеро 20 декабря 2018 года 19:17-19:37 UT.