

# МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ШИПЕНИЙ ОТ ОБЛАСТИ ГЕНЕРАЦИИ ДО ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Лебедь О.М.<sup>1</sup>, Федоренко Ю.В.<sup>1</sup>, Маннинен Ю.<sup>2</sup>,  
Клейменова Н.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Апатиты

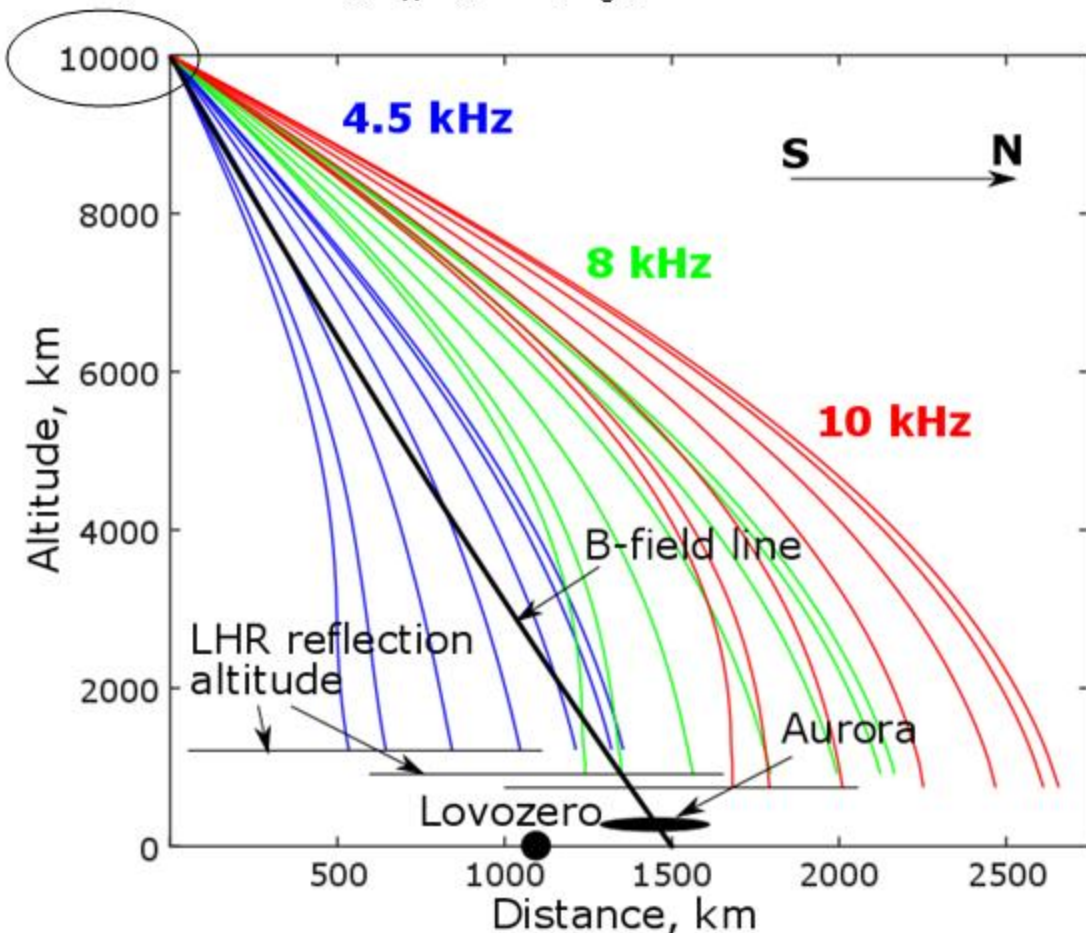
<sup>2</sup> Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland

<sup>3</sup> Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), г. Москва

# Модель распространения авроральных шипений

## 2. Распространение к области рассеяния

- Для проведения дальнейших расчетов мы перешли из системы координат, связанной с магнитным полем ( $z \parallel B_0$ ) в систему координат, связанную с вертикалью ( $z \parallel -\text{grad}(N_e)$ ).



- В плоскослоистой среде по закону Снелла при переходе через границу слоя **сохраняются** компоненты  $n_x$  и  $n_y$ . Компонента  $n_z$  **пересчитывается** в соответствии с параметрами плазмы.
- Используя геометрооптическое приближение и расчет направлений вектора Пойнтинга, мы построили лучи, вдоль которых будут распространяться волны.

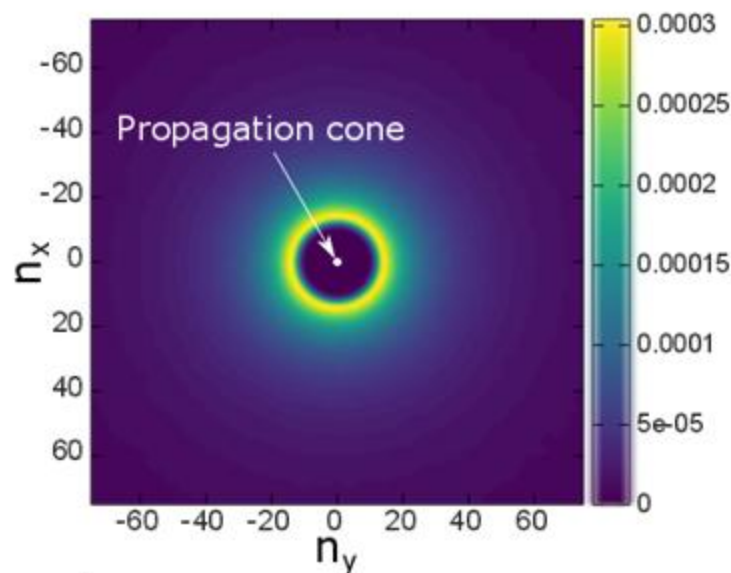
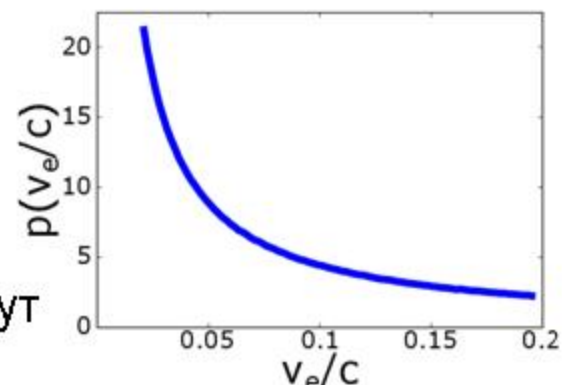
# Модель распространения авроральных шипений

## 1. Генерация аврорального хисса

- Авроральный хисс генерируется электронами с энергиями 0.1-10 кэВ на высотах ~5000-20000 км вследствие черенковского резонанса:

$$v_e \cos \theta = v_{ph} = c/n_z$$

- Возникают электростатические волны с  $n_{\perp} \gg 1$ , в то время как к земле могут выйти только электромагнитные волны с  $n_{\perp} < 1$ .
- Из симметрии задачи ( $B_0 || z$ ) следует, что волны могут излучаться равновероятно во всех направлениях.



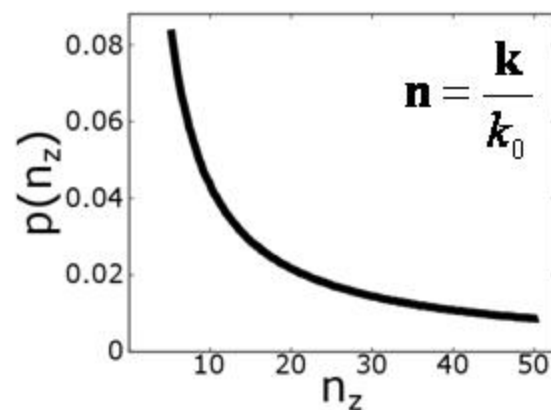
Совместная плотность распределения  $n_x$  и  $n_y$

- Из распределения  $n_x$  и  $n_y$  видно, что волны, попадающие в конус прохождения, не могут быть сгенерированы



Для выхода к земле необходимо рассеяние на неоднородностях

Типовое распределение электронов по скоростям



Распределение  $n_z$  электростатических волн

# Современное представление о генерации и распространении аврорального хисса (АХ)

## Рассеяние на неоднородностях $N_e$ :

*Ngo, H.D., Electrostatic waves stimulated by VLF whistler mode waves scattering from magnetic field aligned plasma density irregularities, Ph.D. thesis, Stanford Univ., Stanford, Calif., 1989.*

- не полностью учитывает случайный характер АХ

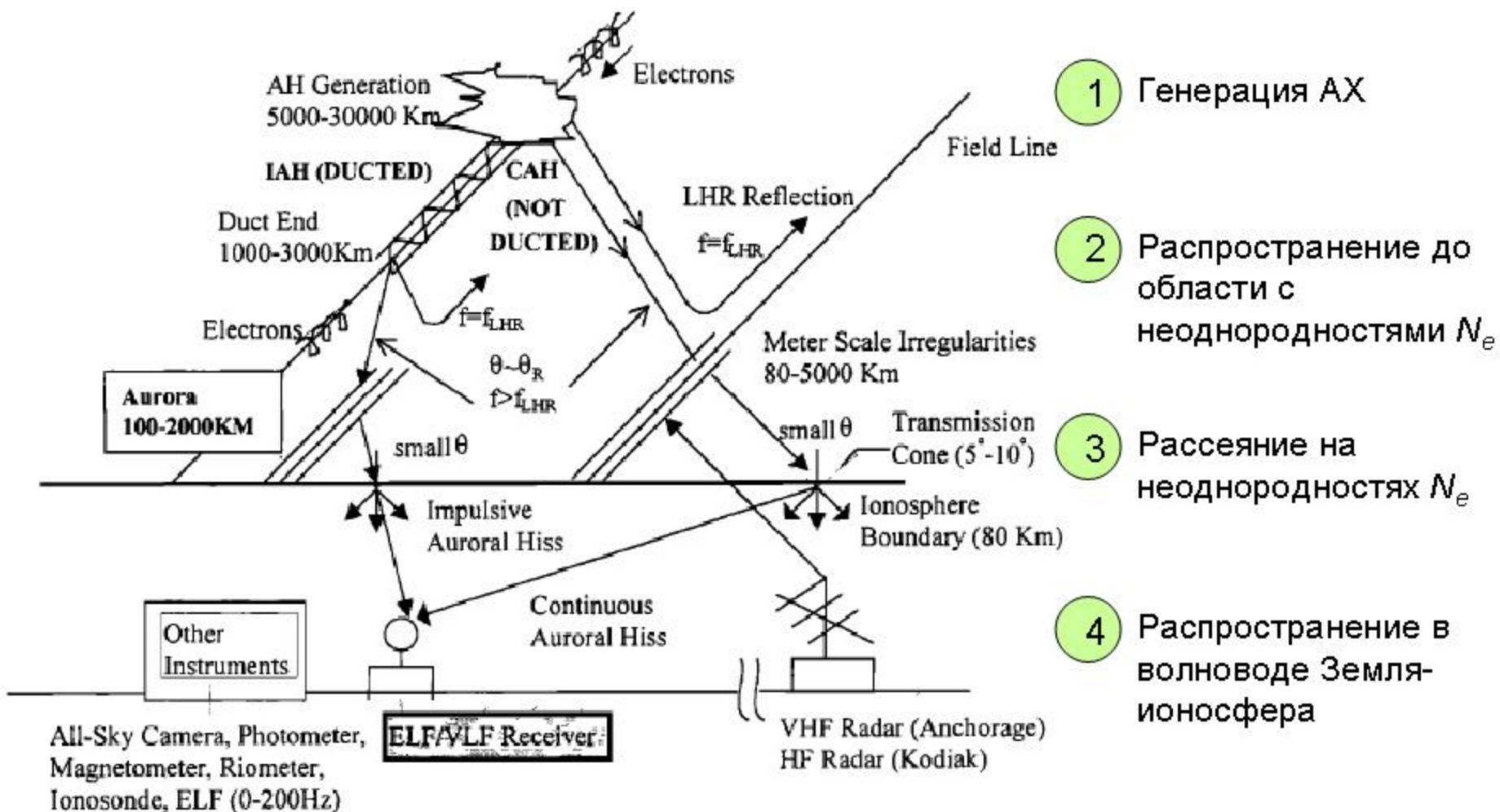
*Shklyar D., Chum J., Jiricek F. Characteristic properties of Nu whistlers as inferred from observations and numerical modelling // Annales Geophysicae, V. 22, № 10, P. 3589–3606, 2004.*

*Кузичев И.В. Вопросы распространения и взаимодействия с энергичными частицами низкочастотных волн в ионосфере и магнитосфере Земли // автореферат диссертации, 2013.*

- выявляет физические процессы, определяющие рассеяние АХ, но не позволяет решить реальную физическую задачу
- не подходит для 3D случая

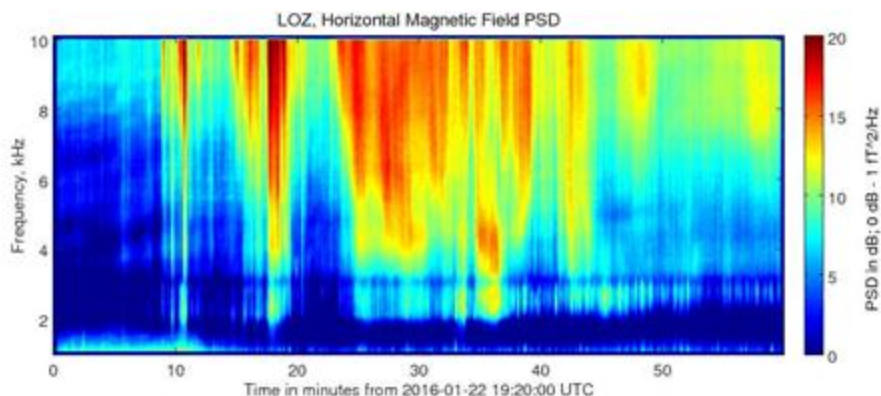
➤ **Для интерпретации наблюдений нужна модель, связывающая все этапы распространения от места генерации до земной поверхности.**

# Современное представление о генерации и распространении аврорального хисса (АХ)



\* V.S. Sonwalkar, J. Harikumar An explanation of ground observations of auroral hiss: Role of density depletions and meter-scale irregularities // JGR, V. 105, No. A8, pp. 18867-18883, 2000.

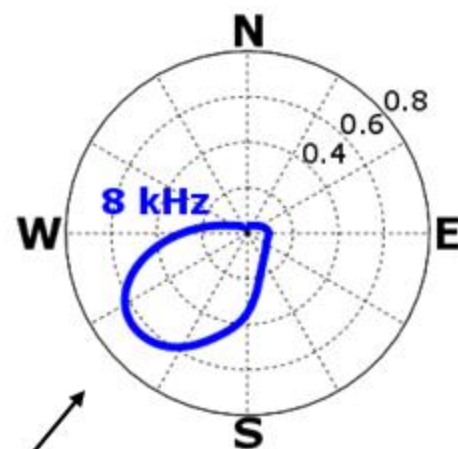
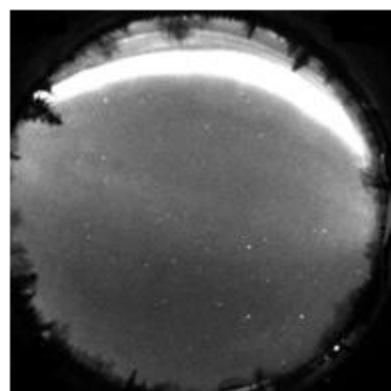
# Авроральные шипения (хиссы)



↑  
Спектрограмма типичного аврорального хисса

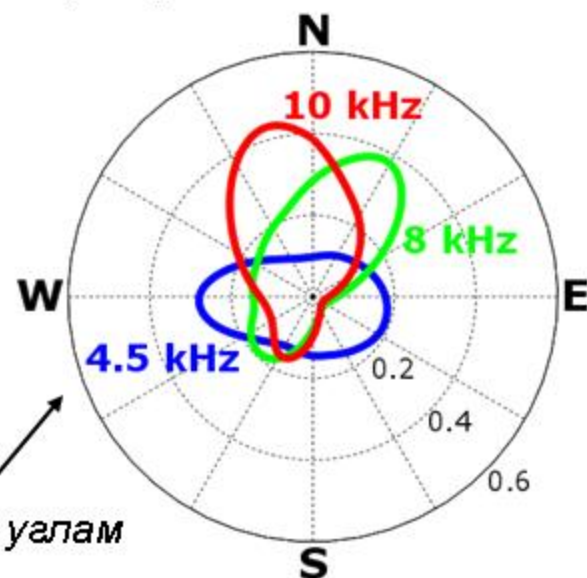
- В ПГИ разработан подход, позволяющий анализировать не только средние значения поляризации, направления вектора Пойнтинга, волнового импеданса, но и их **плотности распределения**.

23 декабря 2016 г. 17:47:00



Нормированная плотность распределения энергии по углам

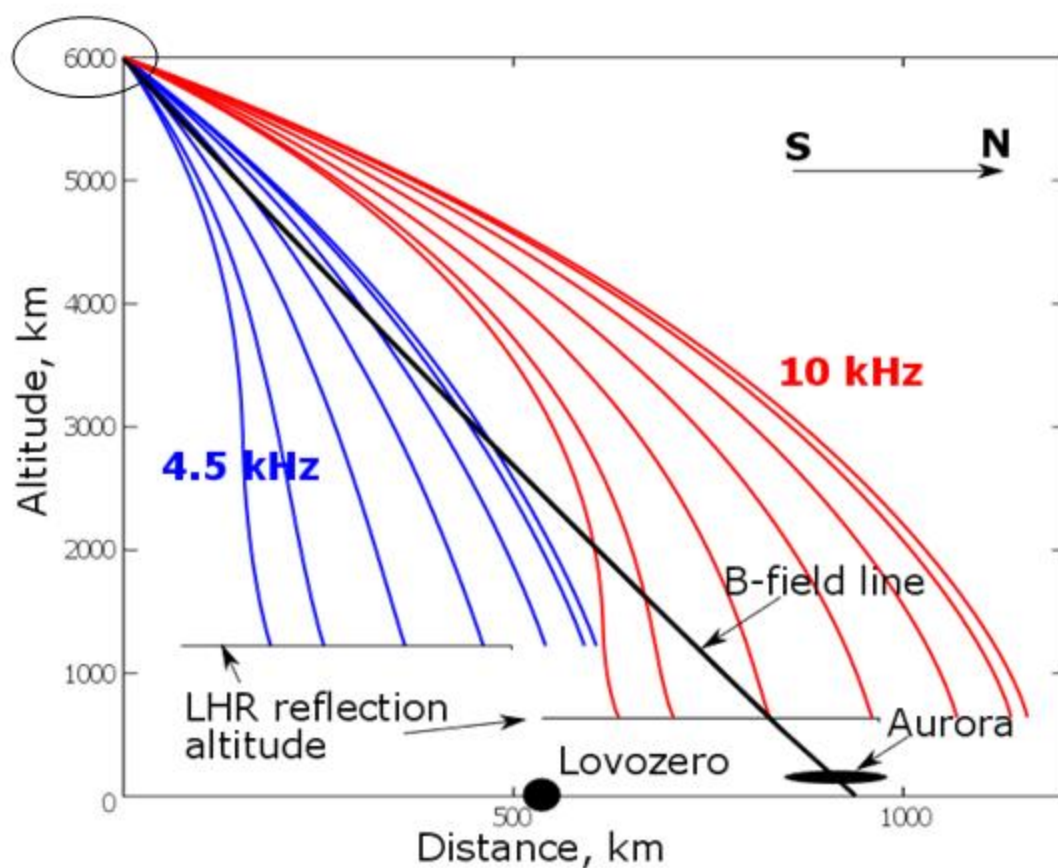
22 февраля 2018 г. 18:10:00



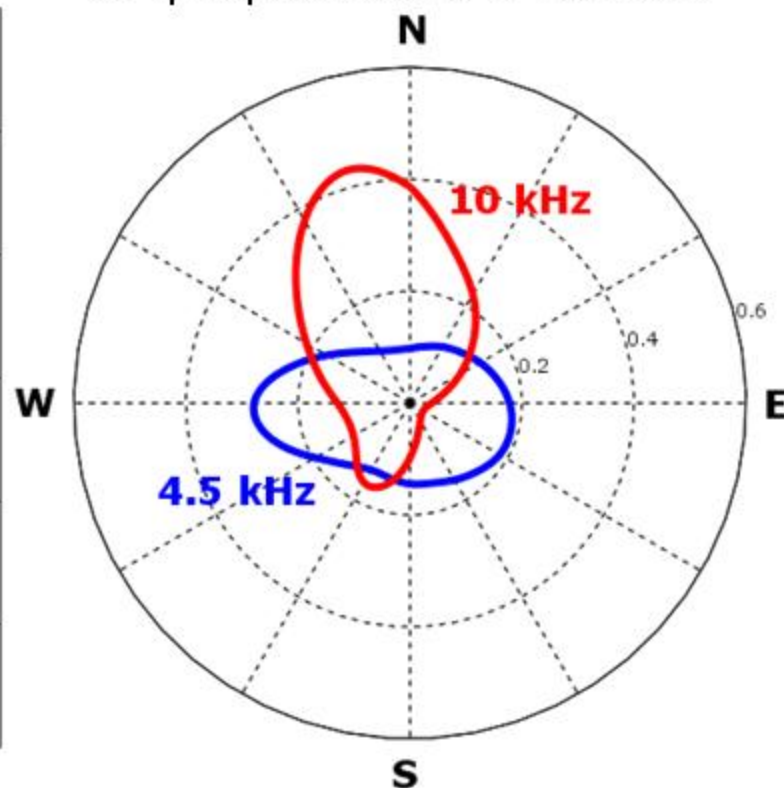
- Для интерпретации каждого конкретного случая регистрации аврорального хисса необходима модель.

# Модель распространения авроральных шипений

## 2. Распространение к области рассеяния



22 февраля 2018 г. 18:10:00



- Предположение, что авроральный хисс был сгенерирован на высотах порядка 6000 км, позволяет объяснить результаты эксперимента 22.02.2018, а именно, что на частоте 4.5 кГц излучение наблюдается над головой, а на частоте 10 кГц излучение приходит с севера.

# Модель распространения авроральных шипений

## 3. Рассеяние на неоднородностях

- Для того, чтобы электростатическая волна могла стать электромагнитной и выйти к земле, она должна испытать рассеяние на неоднородностях  $N_e$ .

На область с неоднородностями падает волна

$$\mathbf{E}e^{ik_0 n \mathbf{r}} = \mathbf{E}e^{ik_0 (n_x x + n_y y + n_z z)}$$

Компонента  $n_z$  в слое с неоднородностями находится из уравнения Букера, а компоненты  $\mathbf{E}$  с точностью до постоянного множителя определяются нетривиальным решением однородного уравнения

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

Ток, возникающий в неоднородностях, в борновском приближении определяется как

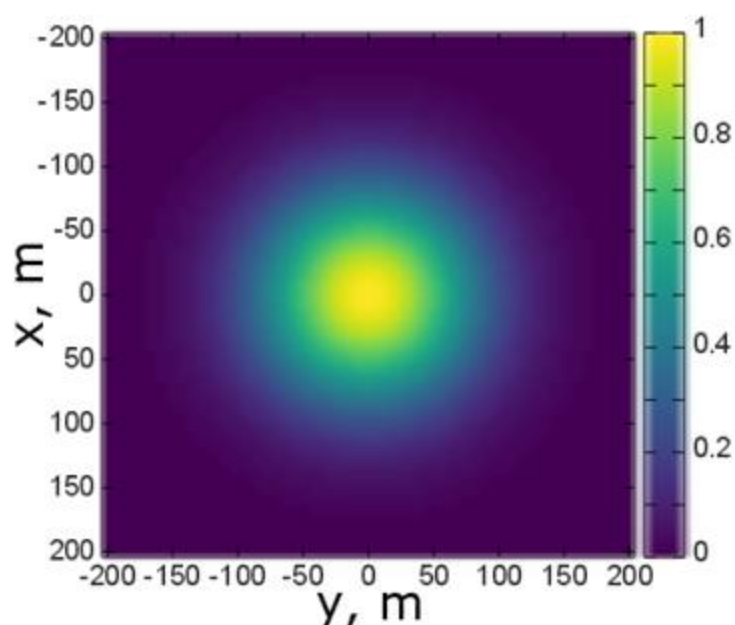
$$\Delta \mathbf{J} = -i \frac{\omega}{c} \Delta \epsilon \cdot \mathbf{E} / Z_0$$

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

# Модель распространения авроральных шипений

## 3. Рассеяние на неоднородностях

- Для того, чтобы посчитать ток  $\Delta J(x, y)$ , необходимо задать поле неоднородностей  $\Delta \varepsilon(x, y)$ .

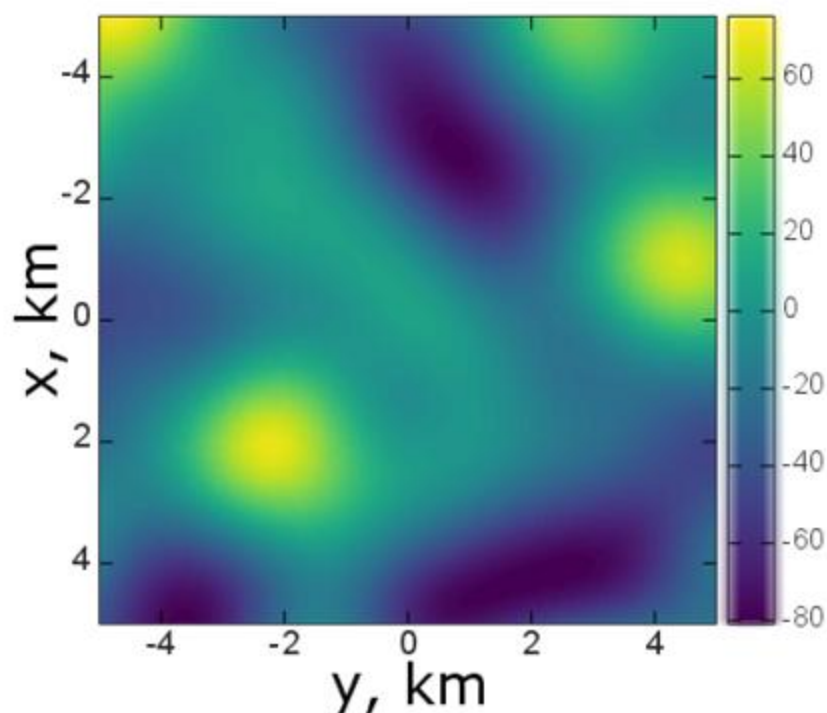


*Корреляционная функция,  
используемая при моделировании  
рассеяния на мелкомасштабных  
неоднородностях ( $3\sigma \sim 100$  м)*

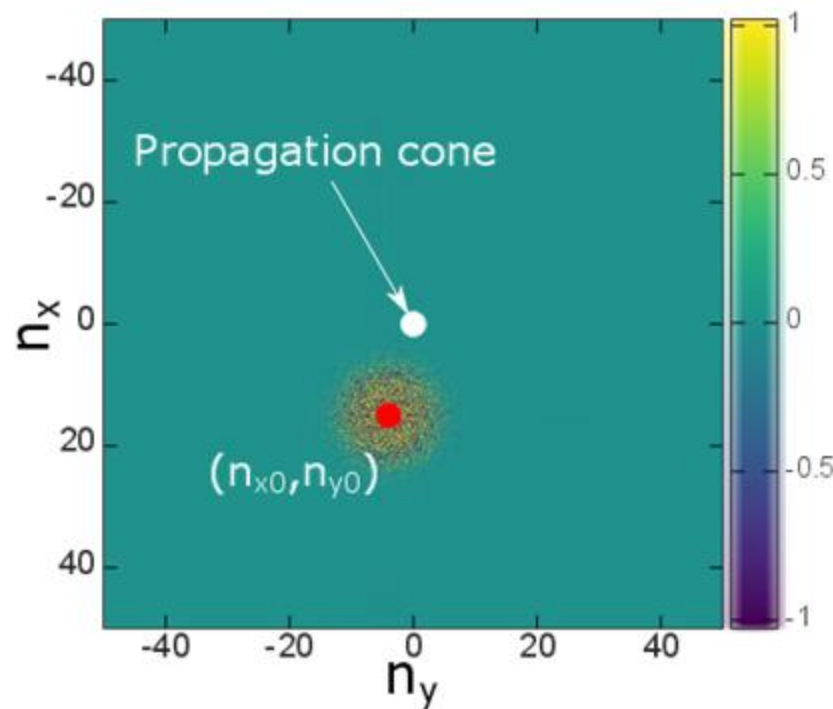
- Поле неоднородностей определяется плотностью распределения вариаций  $N_e$  и корреляционной функцией.
- Мелкомасштабные неоднородности имеют радиус корреляции порядка десятков метров, а крупномасштабные – до 1 км.

# Модель распространения авроральных шипений

## 3. Рассеяние на крупномасштабных неоднородностях



*Пример поля крупномасштабных неоднородностей*

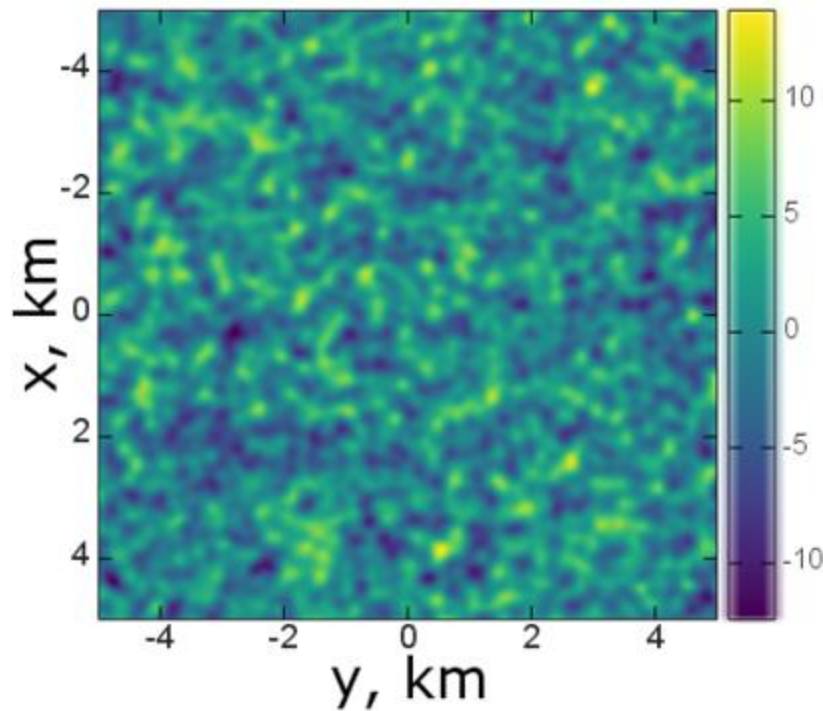


*Спектр компоненты тока*

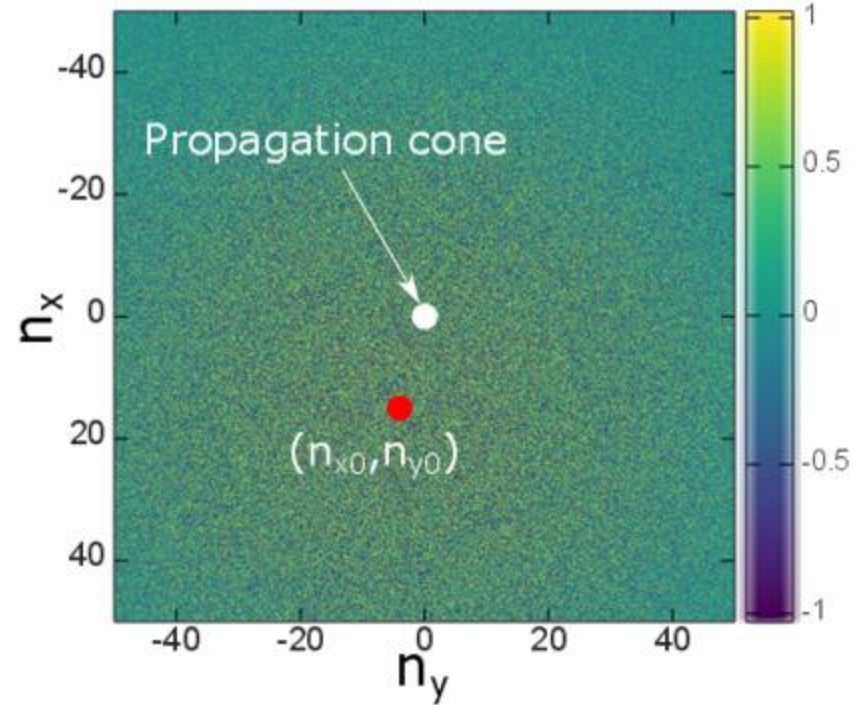
- Видно, что при данном масштабе неоднородностей результат рассеяния электростатической волны с компонентами  $(n_{x0}, n_{y0})$  имеет довольно **узкий** спектр тока.
- Электромагнитные волны, возбуждаемые таким спектром тока, не попадают в конус выхода и не могут выйти к земле.

# Модель распространения авроральных шипений

## 3. Рассеяние на мелкомасштабных неоднородностях



*Пример поля мелкомасштабных неоднородностей*



*Спектр компоненты тока*

- Из рисунка видно, что при данном масштабе неоднородностей результат рассеяния электростатической волны с компонентами  $(n_{x0}, n_{y0})$  имеет **широкий** спектр тока.
- Этот ток возбуждает электромагнитные волны, некоторые из которых попадают в конус выхода и выходят к земле.

# Модель распространения авроральных шипений

## 4. 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 с проводимостью  $\sigma=10^{-5}$  См и  $\epsilon=10$ .
  - Источники в виде компонент тока  $\Delta J$  задавались как граничные условия для слоя с неоднородностями.

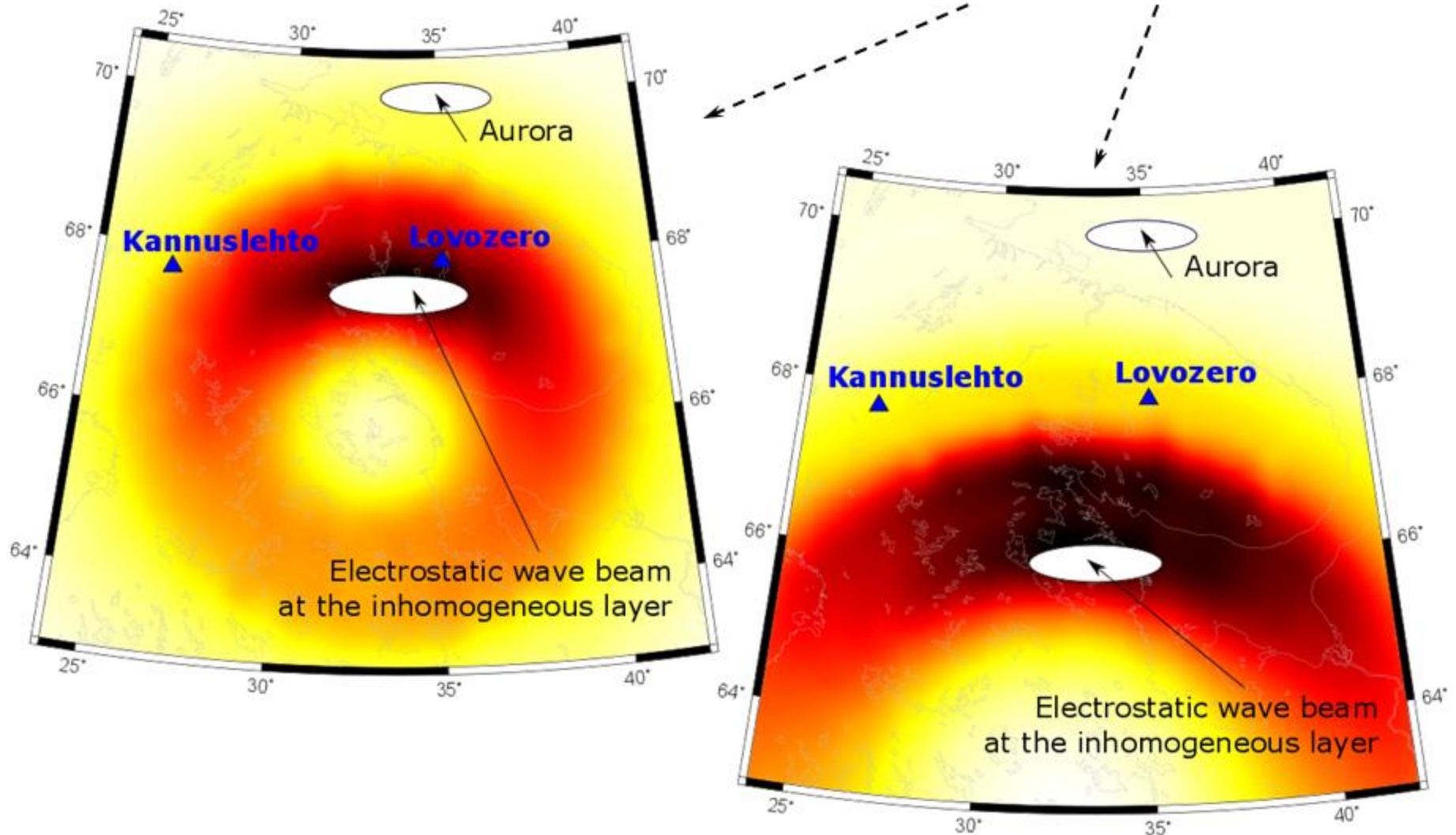
*\* Lehtinen N.G., Inan U.S. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet // Journal of Geophysical Research, V. 113, A06301, 2008.*

# Модель распространения авроральных шипений

## 4. Распространение рассеянных волн к земной поверхности

Результаты расчета для волны с частотой 10 кГц

Слой с неоднородностями расположен на высоте 1500 км и 2500 км.

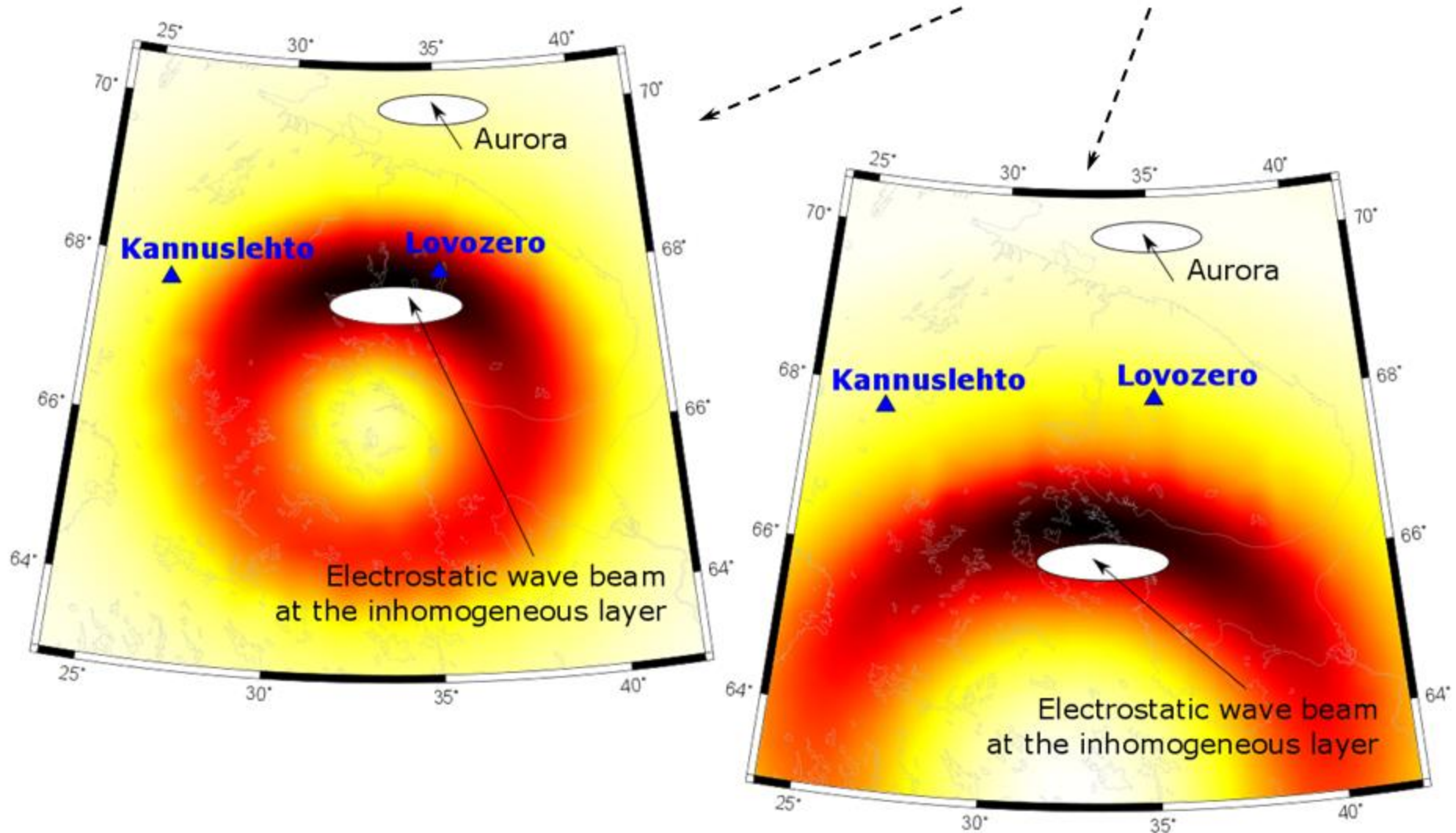


# Модель распространения авроральных шипений

## 4. Распространение рассеянных волн к земной поверхности

Результаты расчета для волны с частотой 4.5 кГц

Слой с неоднородностями расположен на высоте 1500 км и 2500 км.



## Выводы

- Разработана модель, включающая в себя блоки, описывающие структуру электростатических волн на высотах порядка 20000 км, их распространение до области с мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации, расположенной на высотах ниже 5000 км, рассеяние на этих неоднородностях в конус прохождения и распространение к земной поверхности.
- Показано, что результаты моделирования согласуются с результатами наблюдений.

**Спасибо за внимание**