
Оценка эффективной высоты волновода Земля-ионосфера по данным регистрации электромагнитных волн ОНЧ диапазона

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

Полярный геофизический институт,
Апатиты

Волновод Земля - ионосфера

Условие поперечного резонанса: совпадение фаз волн многократно отраженных от верхней и нижней границ волновода: $2h_{\text{эф}}k \cos \theta = 2\pi m$,

$$2h_{\text{эф}}k \cos \theta = 2\pi m,$$

здесь $k = 2\pi f/c$, f и θ – частота и угол падения волны, m — номер моды, $h_{\text{эф}}$ – эффективная высота отражения.

При вертикальном падении волны на стенки волновода ($\theta = 0$) $f_{\text{рез}} = c/(2h_{\text{эф}})$ - частота первого поперечного резонанса.

Для волновода Земля - ионосфера $f_{\text{рез}} \approx 1700-2100$ Гц.

Для описания состояния нижней ионосферы зачастую используют именно понятие частоты первого поперечного резонанса и, связанное с ней, понятие эффективной высоты отражения $h_{\text{эф}}$. Уменьшение $h_{\text{эф}}$ соответствует увеличению электронной концентрации в D-слое ионосферы и наоборот

Имея оценки θ возможно получить оценки $h_{\text{эф}}$ на любой частоте выше $f_{\text{рез}}$:

$$h_{\text{эф}} = \frac{c}{2 f \cos(\theta)}$$

В работе рассмотрена возможность оценки эффективной высоты отражения волновода Земля-ионосфера по данным наземной регистрации электромагнитных волн на частотах выше частоты первого поперечного резонанса (~1.8 кГц). В качестве источников сигналов использованы твик-атмосферики и сигналы ионосферного источника, возникающего в результате нагрева ионосферы мощным модулированным КВ радиоизлучением.

Параметры волн

По данным регистрации компонент ЭМ поля в точках наблюдения мы производили оценки:

➤ Индекса поляризации*

$$P_c = 2\text{Im}(\dot{B}_x \dot{B}_y^*) / B_h^2 \quad B_h = \sqrt{|\dot{B}_x|^2 + |\dot{B}_y|^2}$$

➤ Мгновенной частоты

$$f = \frac{d\phi}{2\pi dt}$$

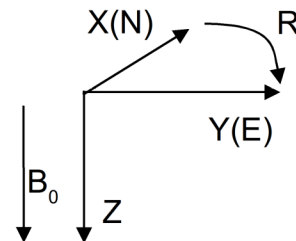
➤ Угла падения волн в приближении плоской волны**

$$\theta = \arcsin \left(\sqrt{\frac{[(\text{Im}(\dot{E}_z \dot{B}_x^*))^2 + (\text{Im}(\dot{E}_z \dot{B}_y^*))^2]}{c^2 (\text{Im}(\dot{B}_x \dot{B}_y^*))^2}} \right) \quad \text{при } |P_c| > 0,3$$

Эффективной высоты отражения

$$h_{\text{эф}} = \frac{c}{2 f \cos(\theta)}$$

\dot{B}_x , \dot{B}_y и \dot{E}_z - аналитическое представление компонент поля на частотах модуляции, полученное преобразованием Гильберта

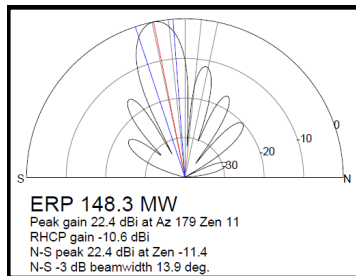
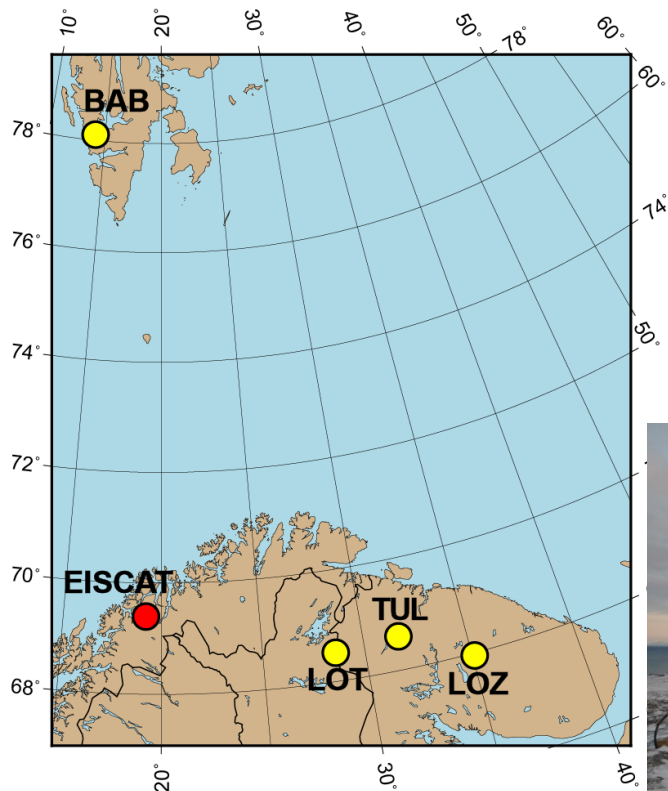


* Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. М.: Наука: Главная редакция физико-математической литературы. 1976. 494 с.

**Koichiro Tsuruda; Kanji Hayashi (1975). Direction finding technique for elliptically polarized VLF electro-magnetic waves and its application to the low-latitude whistlers. , 37(9), 0–1202.

Постановка эксперимента

Рассматривали результаты эксперимента по нагреву ионосферы мощным КВ излучением стенда «EISCAT/Heating», проведенного в **октябре 2016 г. ААНИИ (Россия)**. Излучение на частоте 4040 кГц проводилось в направлении магнитного зенита на X моде.



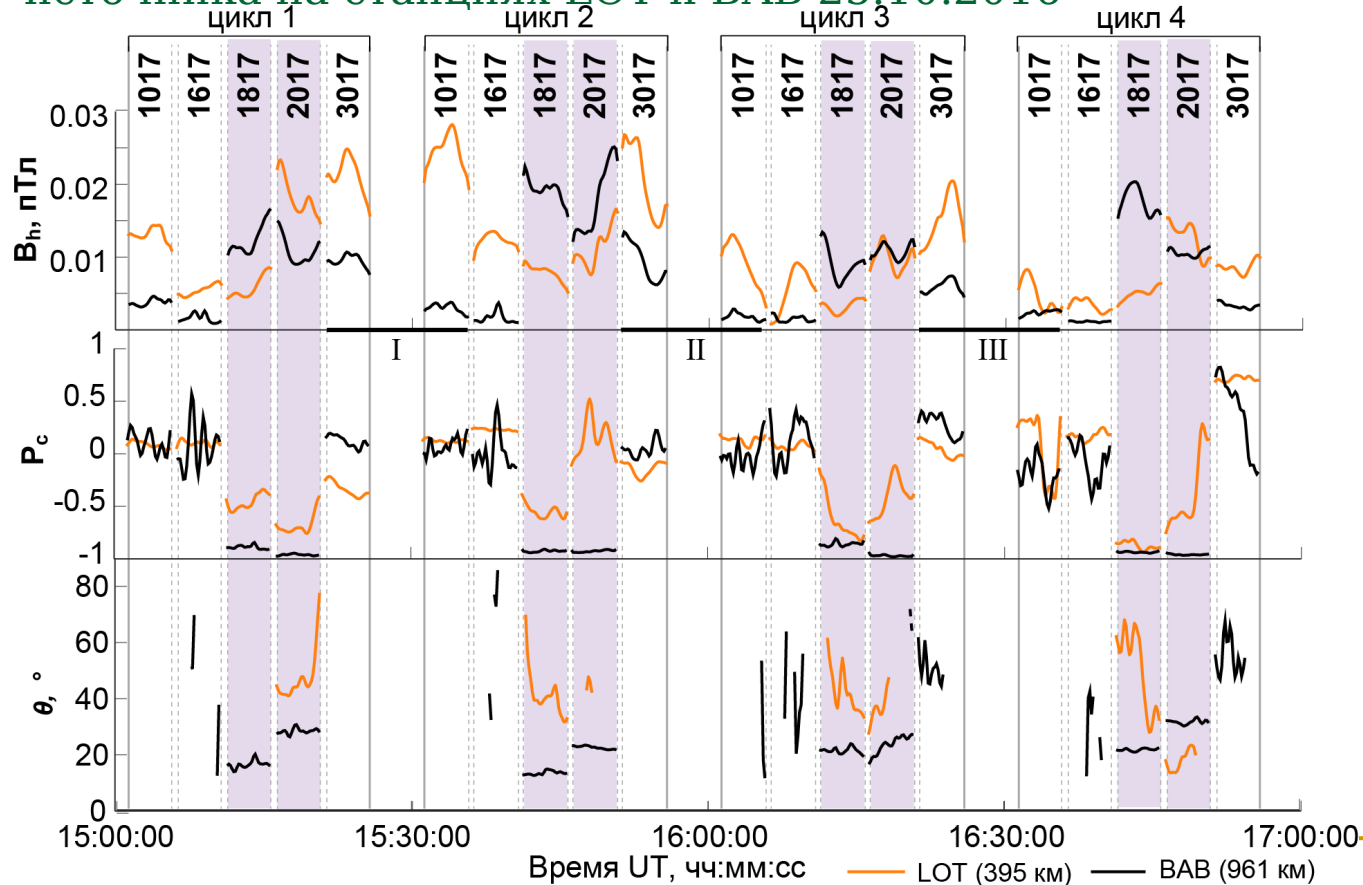
Регистрация сигналов ионосферного источника производилась в:

- **Лотта (LOT) – 395 км**
- **Верхнетуломский (TUL) – 509 км**
- **Ловозеро (LOZ) – 661 км**
- **Баренцбург (BAB) – 946 км**

Характеристики СНЧ/ОНЧ приемников ПГИ:

- АЦП - **24 бит, 4 канала, SAR**
- Частота дискретизации – **32 кГц**
- Рабочий диапазон частот **0.03 – 15 кГц**
- Синхронизация потока данных с Мировым Временем с ошибкой **не более 1 мкс**
- Гальваническое разделение аналоговой и цифровой частей
- Регистрация трех компонент ЭМ поля: B_x , B_y , E_z

Эксперимент: результаты измерения параметров поля ионосферного источника на станциях LOT и ВАВ 25.10.2016



На частотах близких к частоте первого поперечного резонанса Земля — ионосфера (f_{res}):

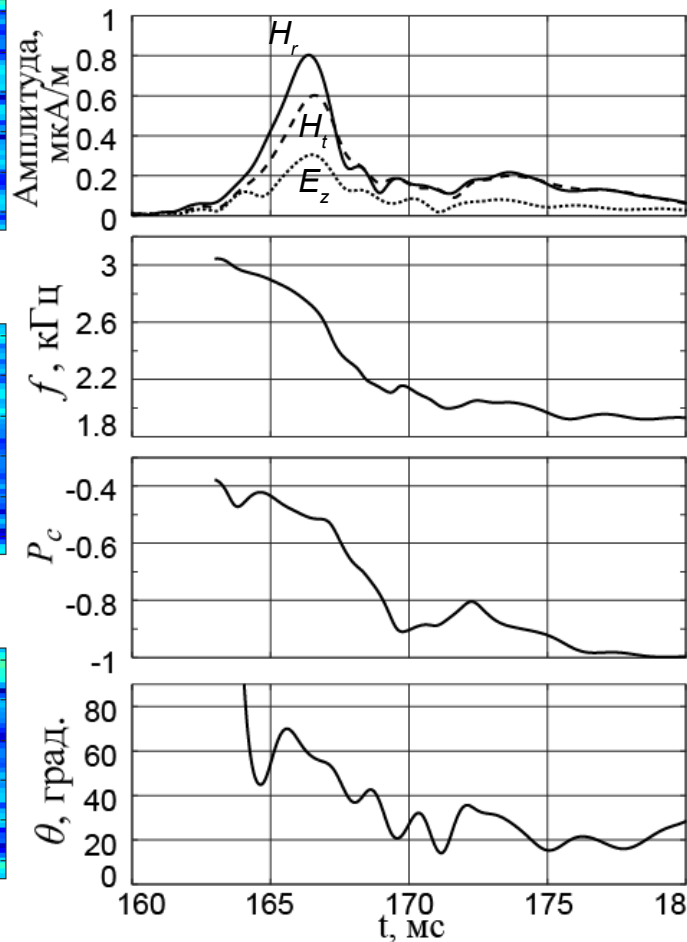
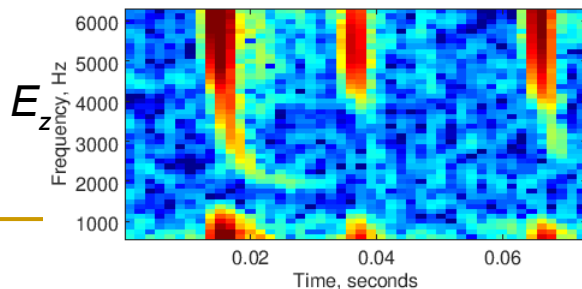
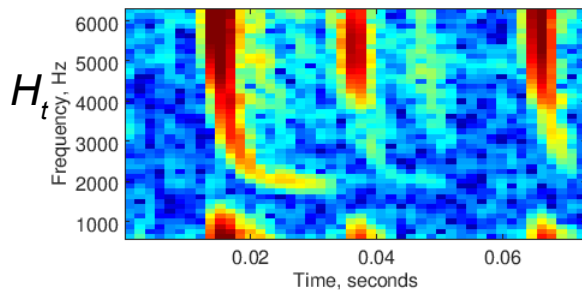
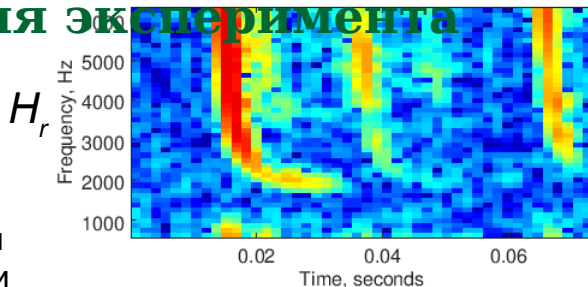
- Амплитуда горизонтального магнитного поля в ВАВ зачастую была выше чем в LOT
- Индекс поляризации в ВАВ близок к -1, в LOT около -0.5 и испытывает значительные вариации
- Угол падения в ВАВ в диапазоне в диапазоне 15-35° ($h_{эф}=85-91$ км), в LOT значения угла зачастую выше

Регистрация твик-атмосфериков на станции ЛОТ в период проведения эксперимента

Твик-атмосферики - формируются в результате многократных переотражений импульса, излученного разрядом молнии, от земной поверхности и нижней границы ионосферы.

Динамические спектры радиальной (H_r) и тангенсальной (H_t) компонент горизонтального магнитного поля и вертикальной электрической компоненты (E_z).

Оценки параметров поля «хвоста» твик-атмосферика.



Численная модель

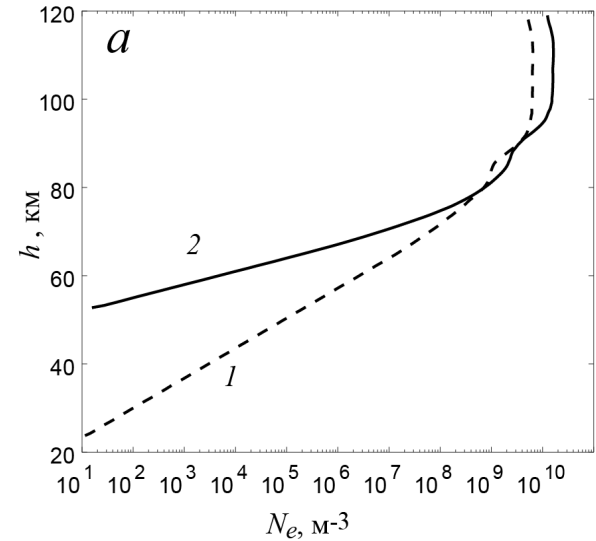
Для проведения численных расчетов электромагнитного поля у земной поверхности в приближении плоскострой среды использован метод решения волнового уравнения «**full-wave method**»*.

Параметры среды рассчитаны для времени проведения эксперимента с использованием моделей:

- IGRF для параметров статического магнитного поля,
- MSIS-E-90 для профилей концентрации и температуры нейтралов (N_2 , O_2),
- IRI-2016 для профиля фоновой температуры электронов.

Модель источника атмосферика

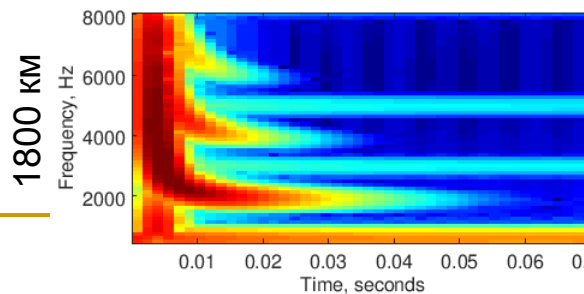
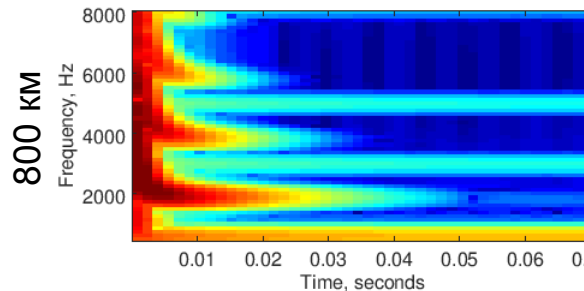
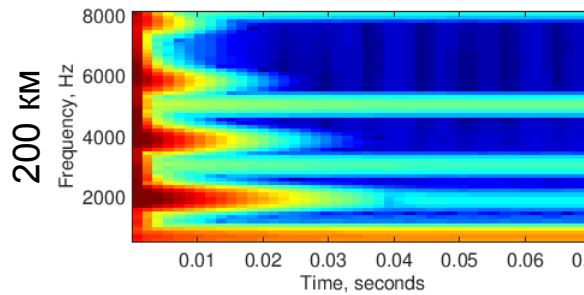
- Поле возбуждалось осциллирующим вертикальным током высотой 5 км;
- Функция тока задавалась в виде $I(t)=\exp(-at)-\exp(-bt)$ с параметрами $a = 5 \cdot 10^4$ и $b = 2 \cdot 10^6$;
- Условия отражения от нижней стенки волновода Земля-ионосфера заданы коэффициентами отражения от проводника с удельной проводимостью $\sigma = 2 \cdot 10^{-5}$ См \cdot м $^{-1}$ и относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 8$;
- Для каждой частоты из 2048 частот от 140 Гц до 10 кГц рассчитывались E_z , H_x , H_y для «дневной» (1) и «ночной» (2) ионосфер;
- Временные формы сигналов рассчитывались при помощи обратного преобразования Фурье для расстояний от 200 до 2000 км.



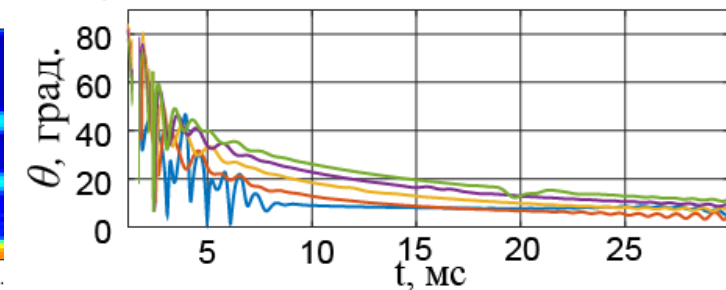
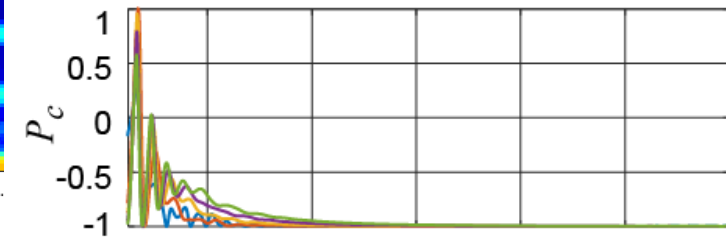
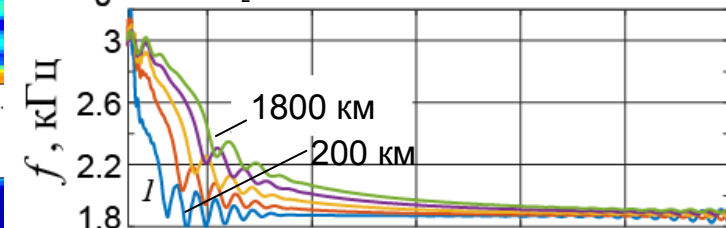
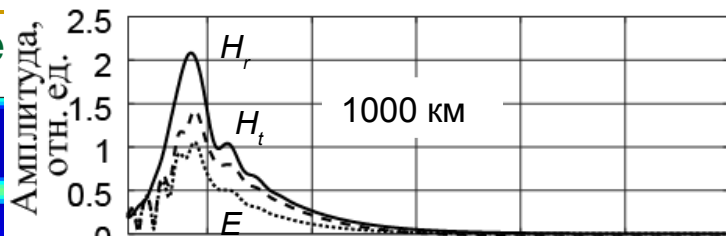
* N. G. Lehtinen, U. S. Inan. Radiation of ELF/VLF waves by harmonically varying currents into a stratified ionosphere with application to radiation by a modulated electrojet // J. Geophys. Res., 113, A06301, 2008.

Результаты моделирования атмосферы

Динамические спектры
радиальной (H_r)
компоненты
горизонтального
магнитного поля
модельного атмосферика
на расстояниях от
источника 200, 800 и
1800 км для профиля 2.



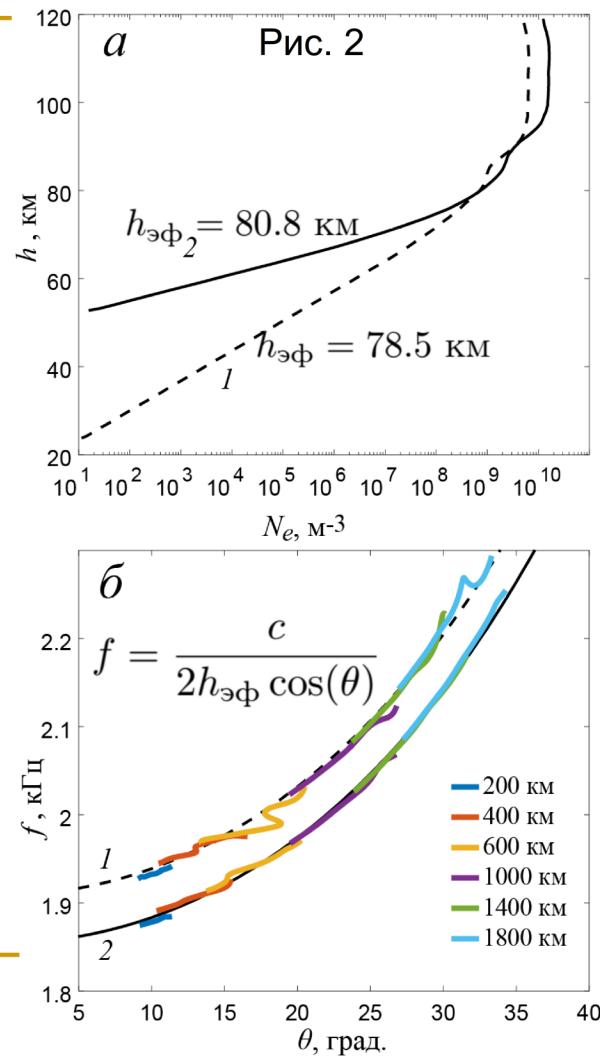
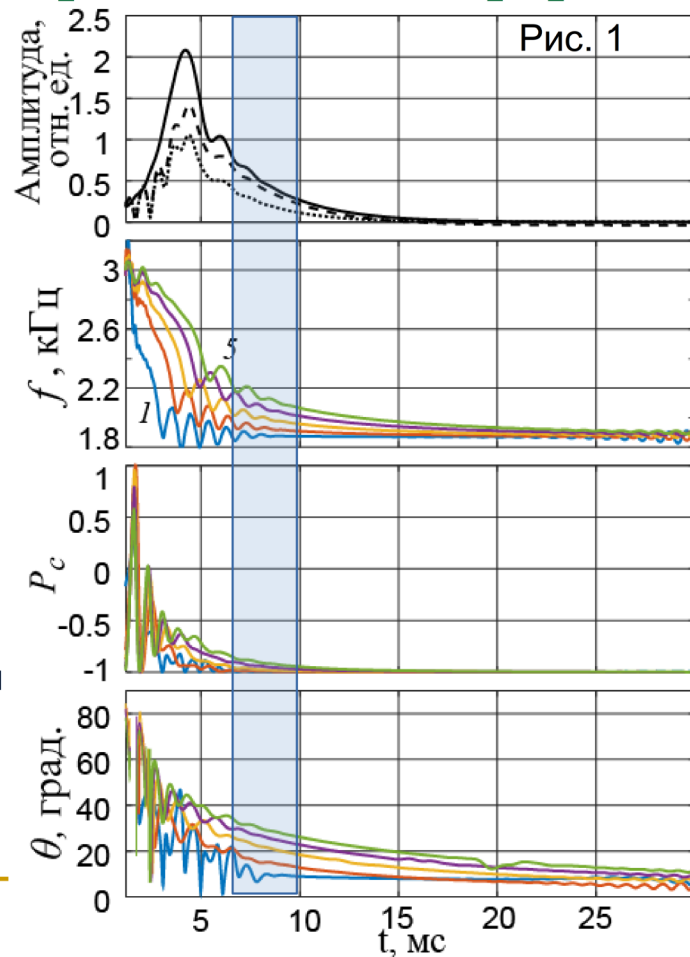
Параметры поля
«хвоста» модельного
атмосферика.



Результаты моделирования атмосфера:

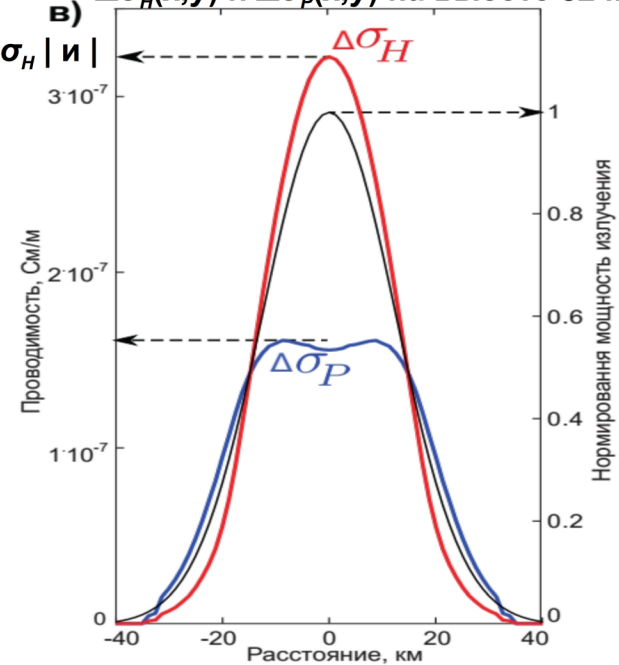
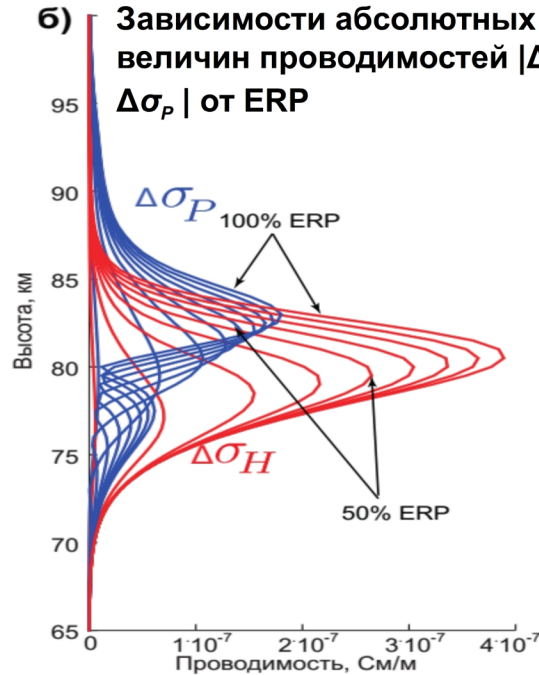
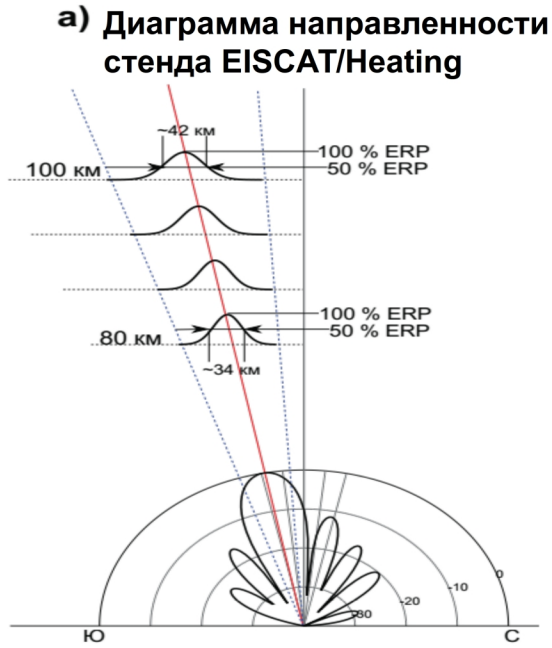
Зависимости $f(\theta)$ для двух профилей N_e и на различных расстояниях от источника (рис. 2б).

Оценки $h_{эф}$ по результатам регистрации твик-атмосфериков возможно производить даже на расстояниях порядка 200 км от источника.



Моделирование ионосферного источника

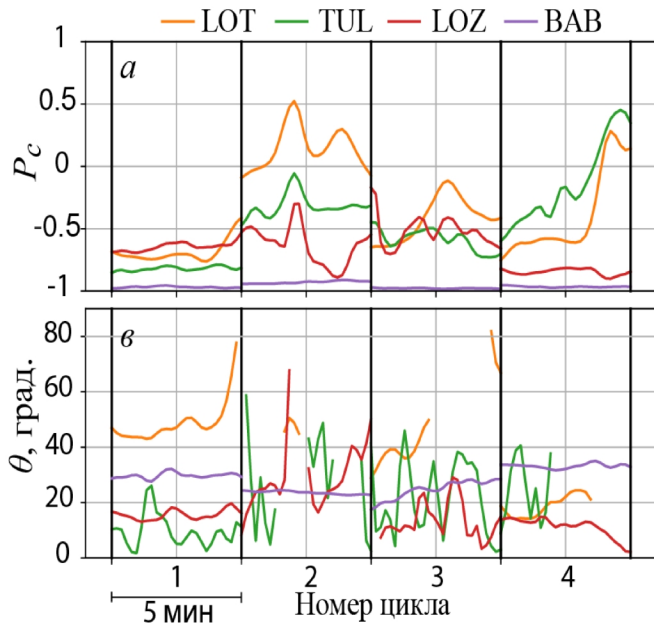
Пример разреза пространственных распределений проводимостей $\Delta\sigma_H(x,y)$ и $\Delta\sigma_P(x,y)$ на высоте 82 км



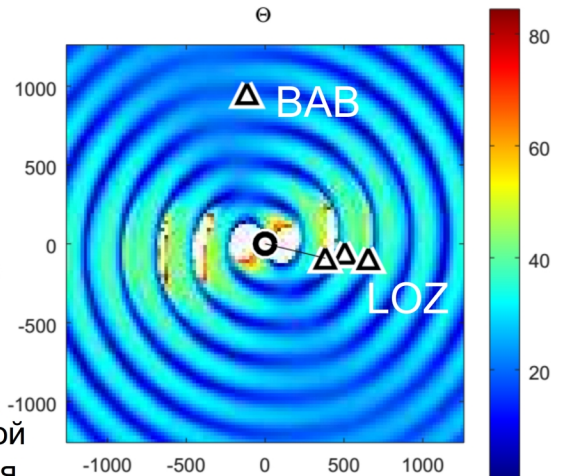
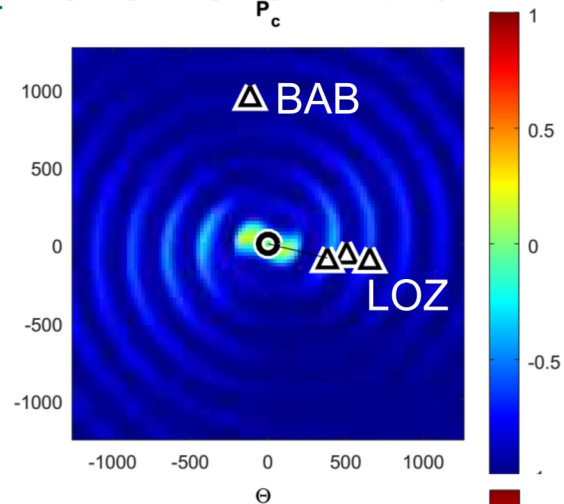
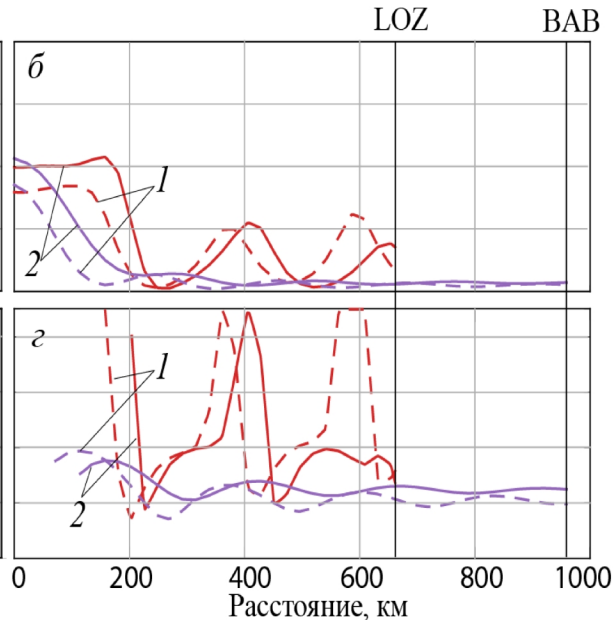
1. Для каждого слоя рассчитываются пространственные распределения $\Delta\sigma_H(x,y)$ и $\Delta\sigma_P(x,y)$.
2. Рассчитываются токи $J_H(x,y)=\Delta\sigma_H(x,y)E_0$ и $J_P(x,y)=\Delta\sigma_P(x,y)E_0$, вызываемые этими проводимостями, при постоянном по высоте поле E_0 , направленном на север, $|E_0|=25$ мВ/м.
3. Расчет распределения полей у земной поверхности производился с помощью «full-wave метода». На высотах источника в качестве условий непрерывности полей на границах слоев использованы полученные преобразованием Фурье токи $J_x(k_x, k_y)$ и $J_y(k_x, k_y)$, где k_x и k_y - горизонтальные компоненты волнового вектора.

Результаты моделирования поля ионосферного источника на частоте 2017 Гц

Параметры поля на станциях в эксперименте



Параметры поля вдоль трасс EISCAT-LOZ и EISCAT-BAB по результатам моделирования



Пространственные распределения индекса круговой поляризации горизонтального магнитного поля и угла падения.

Оценки эффективной высоты отражения по сигналам ионосферного источника и твик-атмосфериков

По полученным в ходе нагревного эксперимента данным регистрации компонент ЭМ поля мы провели оценки $h_{эф}$ в четырех цикла нагрева. Для этих оценок были использованы сигналы ионосферного источника на частоте 2017 Гц в ВАВ и зарегистрированные в это же время твик-атмосферики на станции LOT.

№ цикла	1	2	3	4
по нагреву, км	85.6	81.2	81.9	88.9
по твикам, км	83.1	77.2	80.0	84.3

Оценки угла θ и в том и в другом случае дают адекватные величины $h_{эф}$ и могут быть использованы для диагностики ионосферы.

Выводы

Проанализированы условия возбуждения волновода Земля — ионосфера на частотах вблизи частоты поперечного резонанса.

□ Показано, что источники находящиеся в волноводе (ионосферный источник и твик-атмосферики) возбуждают преимущественно левополяризованную моду которая обладает малым затуханием и хорошо распространяется в ночных условиях.

□ Углы падения θ , определенные с привлечением данных измерений вертикальной электрической компоненты, малы и составляют от 10° до 35° . Вблизи ионосферного источника поляризация и оценки θ нестабильны.

□ Оценки угла θ как в случае твиков, так и в случае ионосферного источника, дают адекватные величины эффективной высоты отражения $h_{\text{эф}}$ и могут быть использованы для диагностики нижней ионосферы. Но в случае ионосферного источника важно учитывать неоднородность его диаграммы излучения.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».