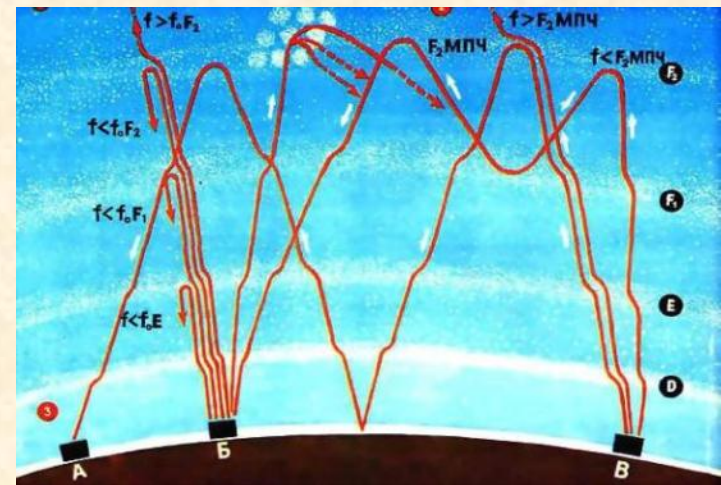




Особенности моделирования КВ радиоканала при искусственной модификации ионосферы

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С.

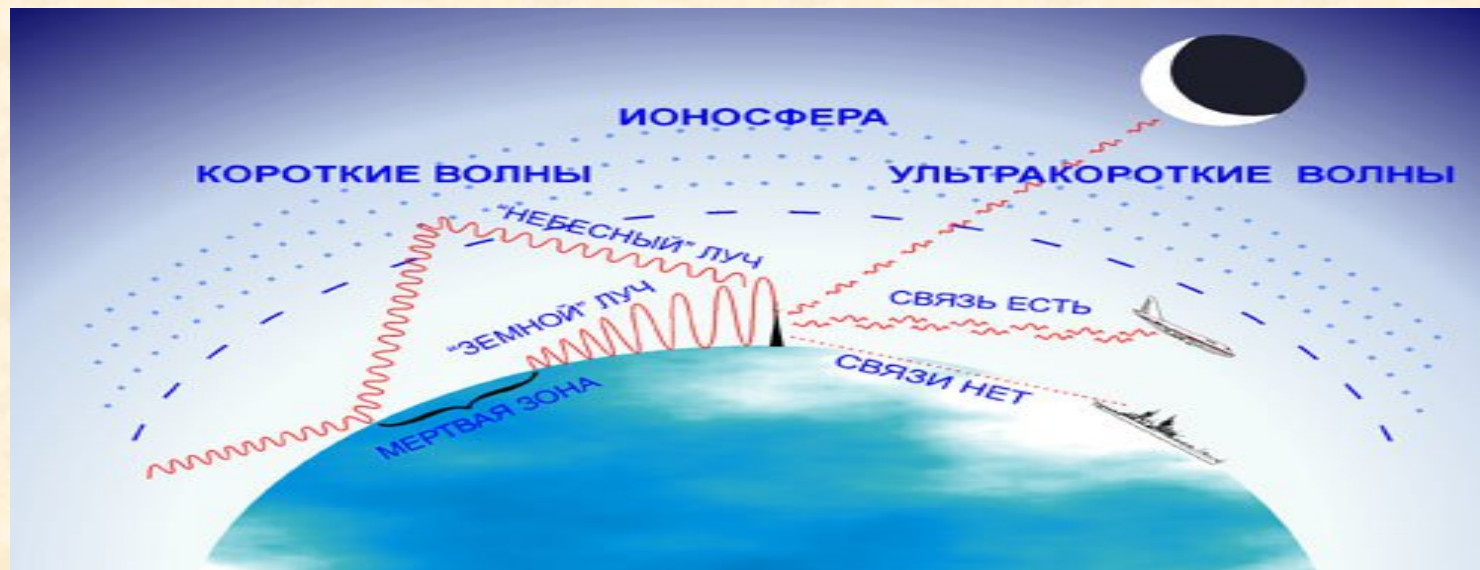
- Исследование **ионосферы Земли** является одним из важнейших направлений в геофизике и радиофизике.
- Ионосфера - чрезвычайно сложная система, поведение которой обусловлено как процессами, происходящими в ионосфере как таковой, так и **определяющим** влиянием излучения Солнца, процессами в магнитосфере и вариациями магнитного поля Земли, движениями в верхней атмосфере. Особый интерес представляет поведение **авроральной ионосферы**.
- Изучение физических явлений в ионосферной плазме **методом воздействия мощных КВ радиоволн**.
- Для исследования вызванных КВ радиоволнами **возмущений ионосферной плазмы** разработан и использован широкий **набор диагностической техники**: разнообразные системы радиозондирования, доплеровские измерения, радары, телекамеры оптических измерений, магнетометры и др. научно-измерительные приборы, установленные как на поверхности Земли, а также и на спутниках.
- Интерпретация экспериментальных результатов требует построение определенной **модели проводимого эксперимента** для учета основных (известных) факторов, влияющих на поведение системы как целого.
- Модель должна **адекватно описывать** весь круг процессов, который можно учесть в ходе эксперимента и при этом **не быть слишком сложной**, т.к. чрезмерное усложнение модели может привести к уменьшению достоверности получаемых результатов моделирования.
- **Задача:** **Создание модели КВ радиоканала при наличии искусственного возмущения**
 Модель строится исходя как из существующего уровня наших знаний, так и из требований предъявляемых к модели в ходе конкретного эксперимента.



Численная модель радиоканала разработана для определения траекторные (энергетических) и доплеровские характеристик КВ радиосигналов в **плавно-неоднородной анизотропной** ионосфере с **локальными неоднородностями** в границах **метода ГО**.

Модель описывает:

- рефракционные явления с резкими границами;
- эффекты рассеяния на локальных неоднородностях (механизмов ракурсного и обратного рассеяния).



Моделирование характеристик КВ радиоволн в магнитоактивной плазме

В произвольной трехмерно-неоднородной магнитоактивной среде решение задачи распространения радиоволн не может быть найдено **аналитически**, ввиду сложности описания функционала среды (ионосферы). В настоящее время не существует строгой теории распространения радиосигналов в ионосфере, содержащей многомасштабные неоднородности. Решение ищется **численными методами** как для представления среды распространения КВ радиоволн, так и для описания самого процесса распространения. Численное решение задачи распространения КВ радиоволн в плавно-неоднородной анизотропной фоновой среде с локальными неоднородностями можно найти при **решении волнового уравнения методом геометрической оптики (ГО)**. Использование численных методов решения уравнений ГО расчета лучей в ионосфере в применении к различным реально встречающимся неоднородным средам вызывает известные трудности. Среди них отметим задание параметров среды, нацеливание лучей на данную точку наблюдения и т.д.

Система обобщающих уравнений для **анизотропной нестационарной** среды имеет вид:

$$\frac{dr}{dt} = 2c^2 \left(k - \frac{1}{2} \frac{\omega^2 \partial n^2}{c^2 \partial k} \right) / \frac{\partial \omega^2 n^2}{\partial \omega}$$
$$\frac{dk}{dt} = \omega \frac{\partial n}{\partial r} / \frac{\partial \omega n}{\partial \omega}$$
$$\frac{d\omega}{dt} = -\omega \frac{\partial n}{\partial t} / \frac{\partial \omega n}{\partial \omega},$$

где r — радиус-вектор в ионосферной плазме. Задача решения векторных уравнений распространения **упрощается**, если **принять условия**: Ионосферу рассматривать изотропной, сферически-симметричной средой на шаге интегрирования; не учитывать влияние соударений электронов на диэлектрическую проницаемость при расчете траекторных характеристик КВ радиосигнала. В этих условиях векторные уравнения сводятся к одному скалярному (**уравнению эйконала**).

Уравнения для лучевой траектории и волнового вектора k в сферической системе координат в магнитоактивной плазме

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{\omega}{B} \cdot \frac{1}{(R_z + r) \sin \theta} \left(k_\phi \left(\frac{c^2}{\omega^2} - D \frac{\cos^2 \alpha}{|k|^2} \right) \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\omega}{B(R_z + r)} \left(\frac{c^2}{\omega^2} k_\theta - D_\theta \right)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\omega}{B} \cdot \left(\frac{c^2}{\omega^2} k_r - D_r \right)$$

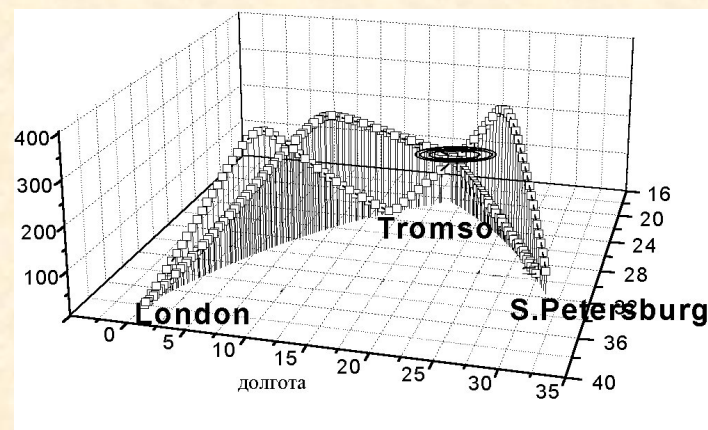
$$\frac{\partial k_r}{\partial t} = - \frac{\omega}{2B} \cdot \frac{\partial A}{\partial r} + k_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} + k_\phi \frac{\partial \phi}{\partial t} \sin \theta$$

$$\frac{\partial k_\theta}{\partial t} = - \frac{\omega}{2B} \cdot \frac{\partial A}{\partial \theta} \cdot \frac{1}{(R_z + r)} - k_r \frac{\partial \theta}{\partial t} + k_\phi \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos \theta$$

$$\frac{\partial k_\phi}{\partial t} = - \frac{\omega}{2B} \cdot \frac{\partial A}{\partial \phi} \cdot \frac{1}{(R_z + r) \cdot \sin \theta} - k_r \frac{\partial \phi}{\partial t} \sin \theta - k_\theta \frac{\partial \phi}{\partial t} \cos \theta$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \left(A + A^2 F(1 - F/Q)/(1 - V) \right) \cdot \cos \alpha / V / n \cdot \frac{\partial V}{\partial t}$$

Последовательное интегрирование (методом характеристик) позволяет определить в каждой точке луча следующие параметры: **координаты**, значения составляющих **волнового вектора** нормали и групповой скорости, время группового запаздывания. Кроме этого рассчитывается фазовая характеристика радиосигнала – **доплеровская частота**.



где r , λ , \square - высота, долгота и коширота радиус-вектора соответственно; R_z – радиус Земли.

Моделирование распространения диагностических радиоволн и их рассеяния на МИИН в искусственно возмущенной области ионосферы (ИВО), проводилось по модели ионосферного радиоканала **TRASSA & CHANNEL**, разработанной в **ААНИИ**.

Модель радиоканала разработана для определения траекторных характеристик распространения сигналов КВ диапазона на основе численного решения характеристической системы уравнений методом геометрической оптики. Вычисления проводятся для пространственно неоднородной, анизотропной, нестационарной ионосферы.

Алгоритм расчета параметров распространения радиоволн разработан для интерпретации экспериментальных данных по «нагреву» ионосферы мощными КВ радиоволнами на трассе «Диагностический передатчик» – «ИВО» – «Приемник».

Алгоритм поиска разделен на решение двух задач распространения на участках трассы «Диагностический Передатчик» – ИВО и ИВО – С.-Петербург. Граничным условием соединения решений двух задач распространения являлось выполнение условий образования конуса зеркального рассеяния при рассеянии на МИИН ионосферы.

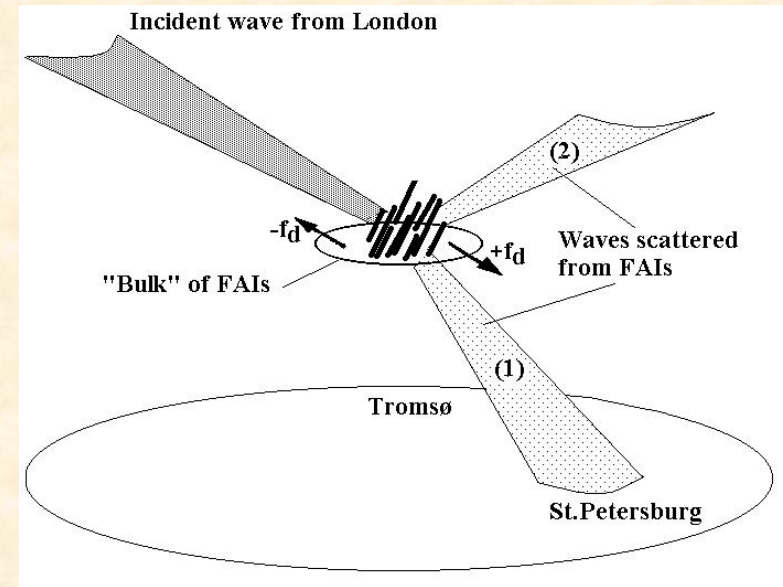
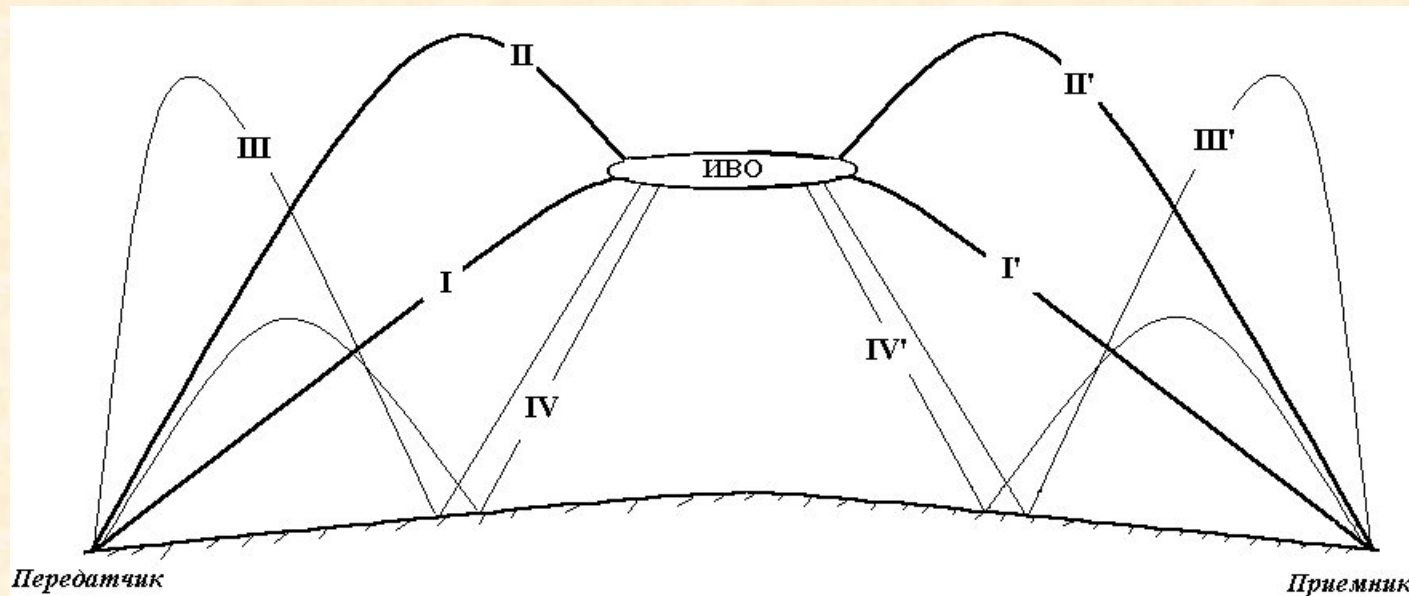
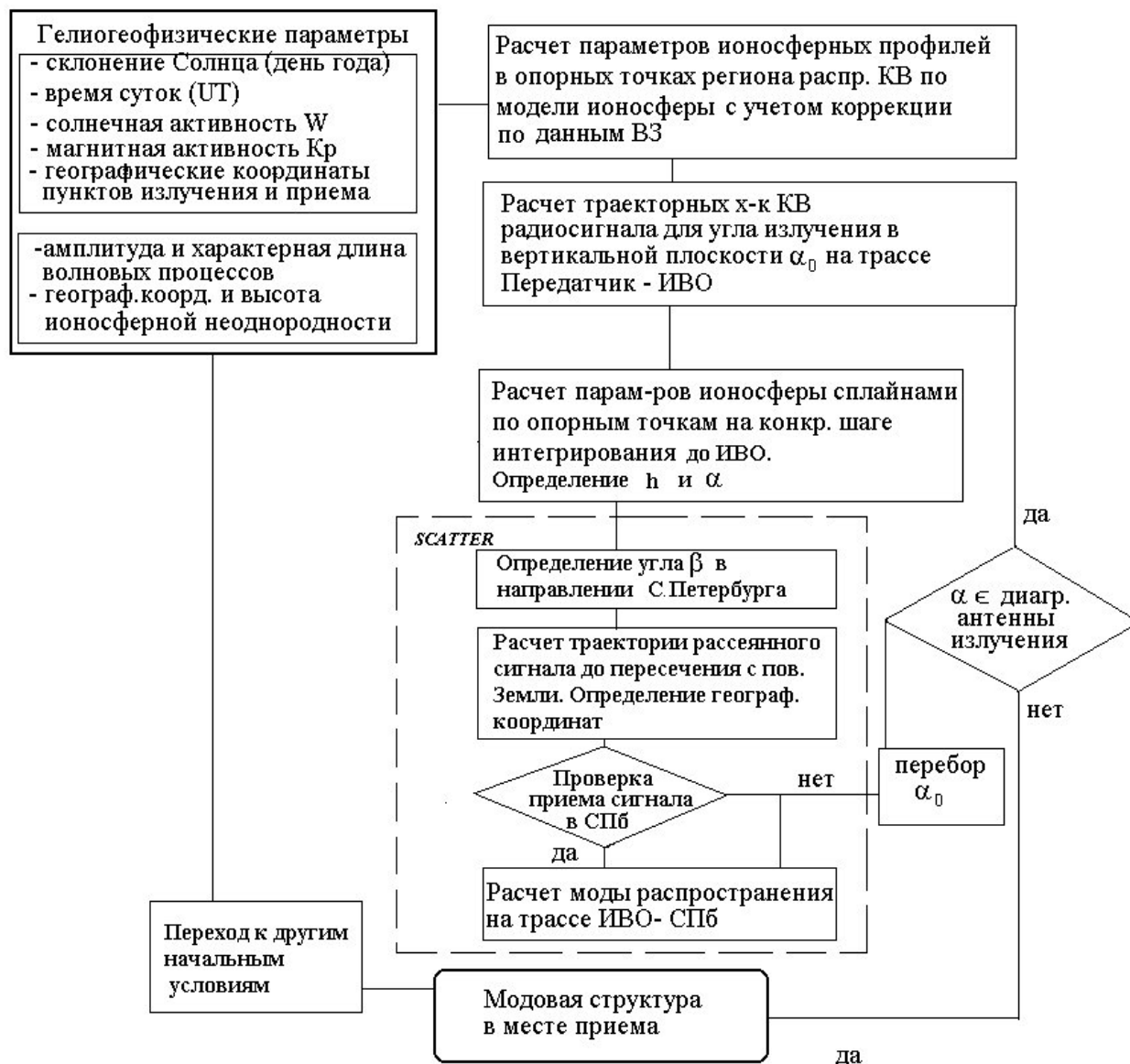


Схема геометрии ракурсного рассеяния волны на МИИН на уровне F слоя над EISCAT. Падающая диагностическая волна приходит в место рассеяния после отражения от F-области ионосферы.



Алгоритм вычисления траекторных характеристик распространения КВ радиосигналов



Для определения характеристики лучевых траекторий сигналов в ионосфере, неоднородной вдоль направления распространения КВ радиоволн, разработан **алгоритм** на основе метода **двухмасштабного разложения**, учитывающий плавные горизонтальные неоднородности ионосферы.

Вдоль радиолинии рассчитываются характеристики волны: **координаты**, составляющие **волнового вектора нормали**, **время группового запаздывания** и **доплеровская частота**.

Модель КВ радиоканала.

Программное обеспечение для определения параметров КВ радиоканала

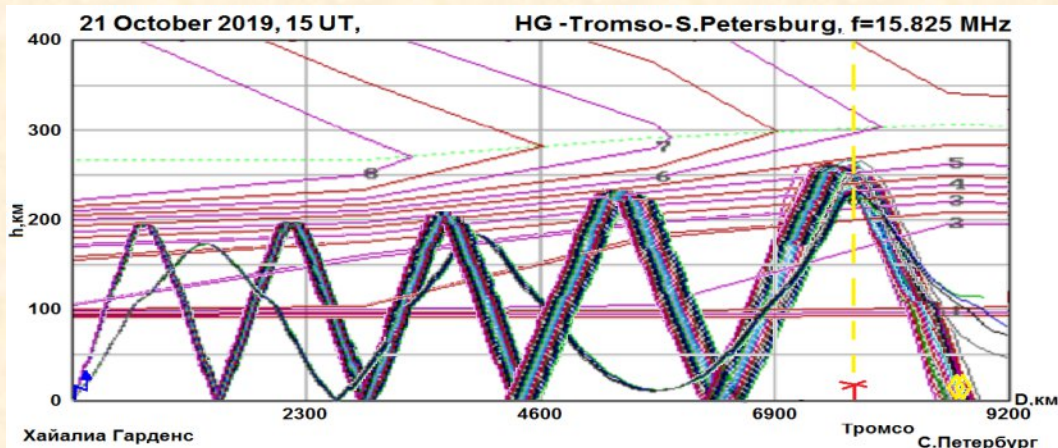
Программа предназначена для численного определения характеристик распространения сигналов КВ диапазона вдоль трассы передатчик – приемник в полярных, авроральных и средних широтах *в том числе в условиях воздействия мощных КВ радиоволн.*

Входные данные: день года, время суток, солнечная и магнитная активности, географические координаты пунктов излучения и приема (и нагревного стенда при необходимости).

Выходные данные (в графическом и численном форматах): траектории, сдвиг f_{dopl} , углы приема, МПЧ, уровень поля.

Результаты моделирования траекторных характеристик распространения сигнала с частотой 158295 кГц на трассе Хайлиа Гарденс (США) – Tromse – С.Петербург при ракурсном рассеянии на МИИН над Тромсе для геофизических условий октября 2019г. – $W\sim 1, K_p=0, t= 15\text{UT}, W_s\sim 100.$;

Лучевые расчеты показали, что на трассе Хайлиа Гарденс– Tromse- С.Петербург возможны моды распространения 4F2 и 3F2.

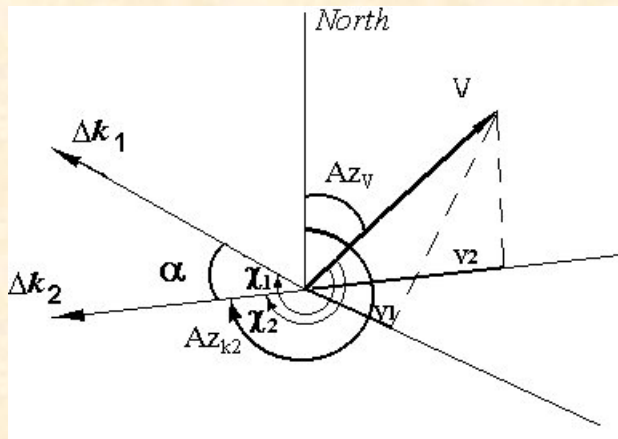


Метод реконструкции V МИИН

По данным ракурсных измерений на двух и более диагностических радиотрассах представляется возможным определить вектор (амплитуду и направление) скорости V движения МИИН. Проекция скорости движения ионосферных неоднородностей $V_{\varphi k}$ на направление вектора разности φk волновых векторов падающей (k_0) и рассеянной (k_s) волн $\varphi k = k_s - k_0$ определяется выражением [Гершман и др. 1984]:

$$V_{\varphi k} = (f_D \ominus f) \triangleleft (c \ominus 2 \sin(\square \ominus 2)), \quad (1)$$

где f_D - доплеровское смещение частоты, f - частота диагностической радиоволны, \square - угол рассеяния, c - скорость света.



Если f_{D1} и f_{D2} - одновременные измерения [на двух трассах, $\square_{\varphi 1}$ и $\square_{\varphi 2}$ - углы (1) определяют V_1 и V_2 , тогда

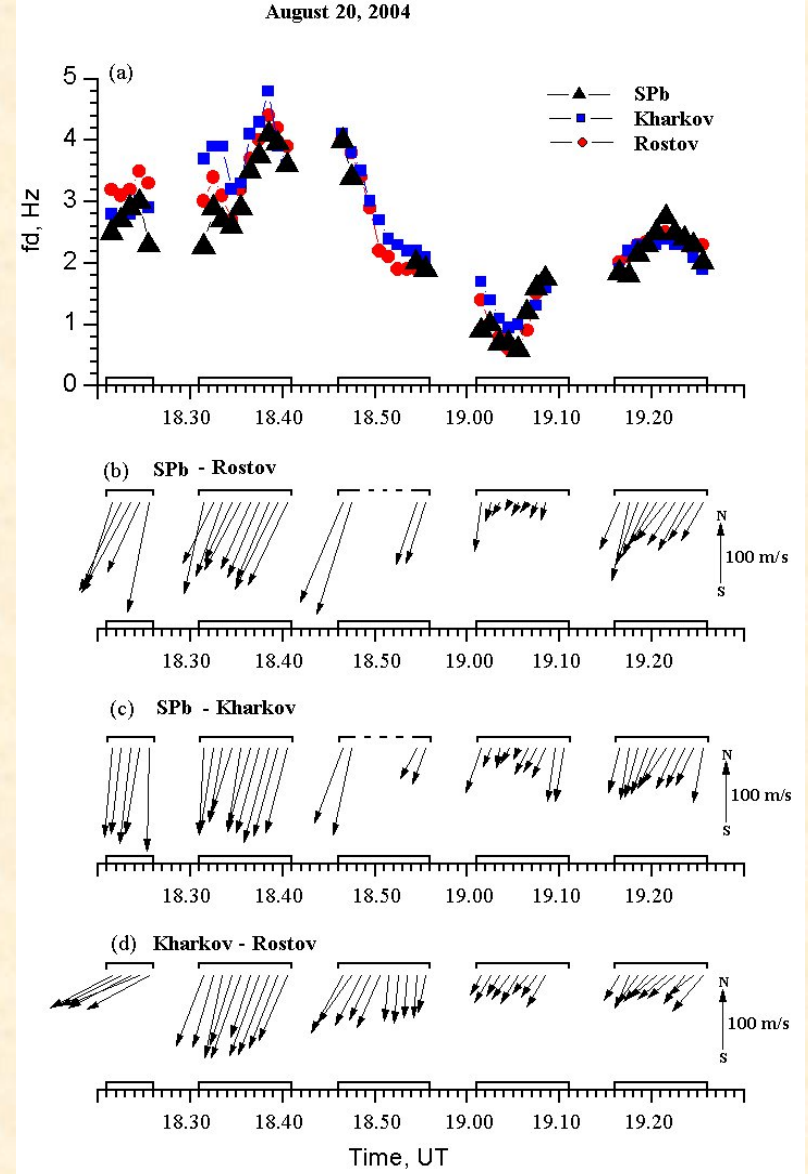
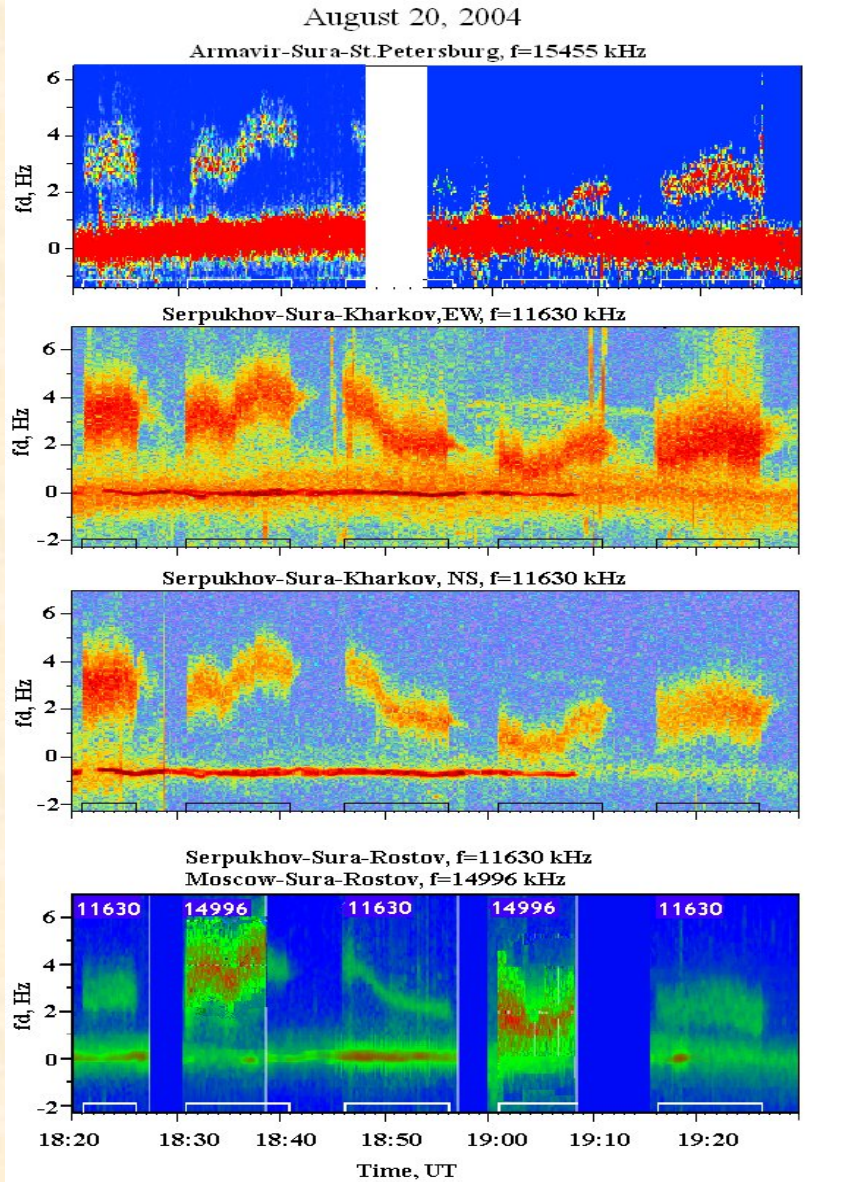
амплитуда V и азимутальное направление Az_V вектора скорости V есть:

$$V = V_2 / \cos\{\arctg[(\cos \vartheta - \delta) / \sin \vartheta]\},$$

$$Az_V = Az_{k1} - \arctg[(\cos \vartheta - \delta) / \sin \vartheta], \quad (2)$$

где $\delta = V_1 \ominus V_2$; $\alpha = |Az_{k1} - Az_{k2}|$ угол между азимутальными направлениями разностных векторов φk_1 и φk_2 (Az_{k1} и Az_{k2}) на первой и второй трассе.

Sura heating campaign (August 2004)



Заключение

- **Разработана адаптивная модель ионосферного радиоканала.** Модель предназначена для численного определения характеристик распространения сигналов КВ диапазона вдоль трассы передатчик – приемник в полярных, авроральных и средних широтах *в том числе в условиях воздействия мощных КВ радиоволн.* **для определения параметров диагностических трасс доплеровских измерений методом ракурсного рассеяния**
- **Предложен метод реконструкции полного вектора движения ионосферных неоднородностей в искусственно возмущенной области ионосферы по данным одновременных доплеровских наблюдений на нескольких радиотрассах.**

Авторы выражают благодарность сотрудникам Европейской научной Ассоциации EISCAT за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсе, Норвегия, а также сотрудникам Лейстерского университета (Англия)

Спасибо за внимание!