



ВЛИЯНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ НА ДАЛЬНЕЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕКАМЕТРОВЫХ ВОЛН ПО ДАНЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА

Борисова Т.Д.¹, Н.Ф. Благовещенская¹, А.С. Калишин¹

¹ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, С.-Петербург

borisova@aari.nw.ru

Нелинейное взаимодействие мощных радиоволн с ионосферной плазмой носит резонансный характер и приводит к искусственному возмущению ионосферы, сопровождающемуся *стимулированным развитием неоднородностей* электронной плотности *различных масштабов*, вплоть до размеров, определяемых угловой шириной диаграммы направленности [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007]. Такие неоднородности в определённых геофизических условиях могут оказывать существенное *влияние на характеристики радиосигналов декаметрового диапазона*, проходящих через возмущённую область (ВО) ионосферы. Основные радиофизические проявления *влияния искусственно возмущённой области* на зондирующие радиоволны сводятся к двум эффектам:

- *рассеянию на мелкомасштабных неоднородностях* и
- *дополнительной рефракции на крупномасштабной структуре возмущения*, которая может иметь, в зависимости от режима нагрева, пониженную или повышенную относительно фонового значения величину электронной плотности.

В настоящем докладе представлены результаты исследования характеристик распространения диагностических сигналов декаметрового диапазона на протяженных радиотрассах в периоды модификации высокоширотной ионосферы КВ нагревным комплексом *EISCAT/Heating* (г.Тромсе, Норвегия). Экспериментальные наблюдения диагностических сигналов радиостанций, расположенных во Флориде (США), проведены методом ракурсного рассеяния на обсерватории ААНИИ «Горьковская» вблизи С.-Петербурга в **октябре 2016 г.**

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ В ОКТЯБРЕ 2016г. ГЕОМЕТРИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

•КВ нагревной комплекс **EISCAT/Heating** (Норвегия, г.Тромсе 69.6° N, 19.2° E, $L = 6.2$): частоты нагрева **4.544 и 5.423 МГц** на ФАР 2, с эффективной мощностью излучения **135 и 150 МВт** для О- и Х- мод поляризации; циклы нагрева 10 мин нагрев/5 мин пауза; излучение в магнитный зенит.

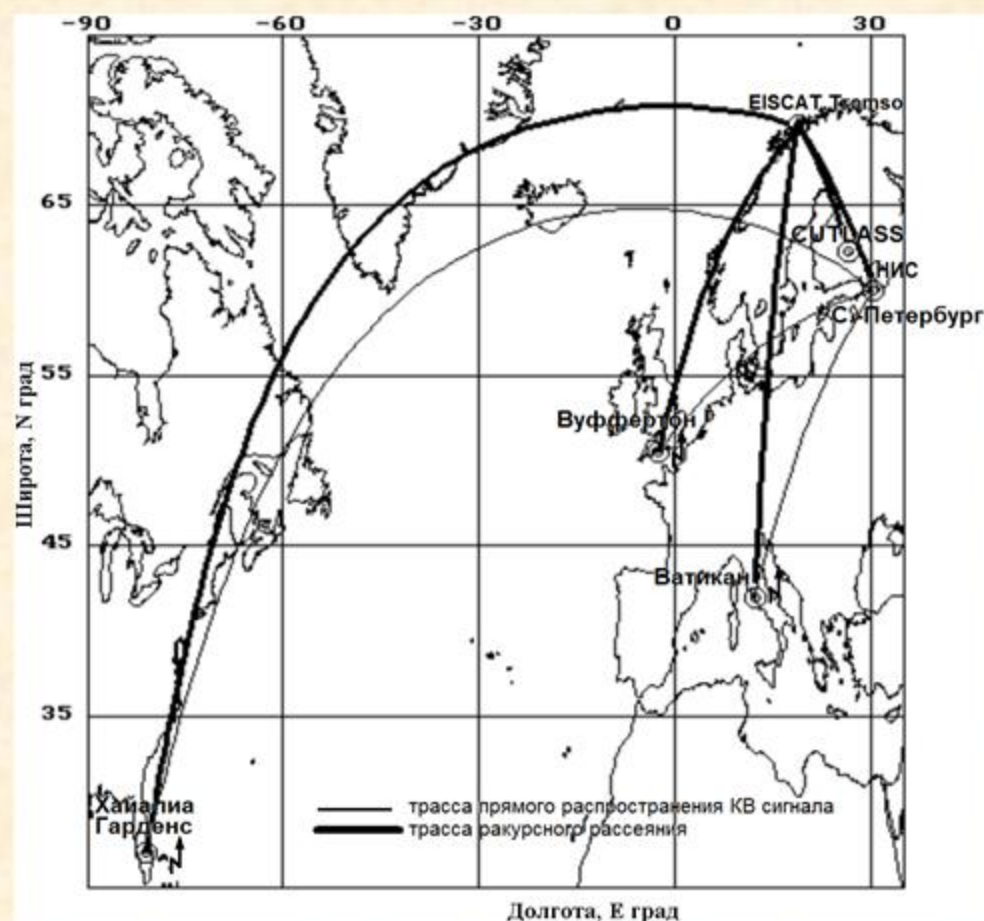
•Радар некогерентного рассеяния **EISCAT** на частоте 930 МГц вблизи Тромсе: режим *beata*, обеспечивающий проведение измерений с разрешением по времени 5с и по высоте 3км; измерения вдоль направления магнитного поля в Тромсе.

•КВ радар **CUTLASS** в Ханкасалми (Финляндия): измерения на одном луче **5 в режиме стерео-мода**, ориентированном на ионосферные высоты над Тромсе.

•многоканальный приемный **КВ доплеровский комплекс** для регистрации диагностических сигналов методом ракурсного рассеяния (метод би-статического КВ радара) и контроля излучения нагревного стенда в Тромсе, для дистанционной диагностики на обсерватории ААНИИ «Горьковская» под г. С. Петербург на расстоянии **1200 км от г.Тромсе**.

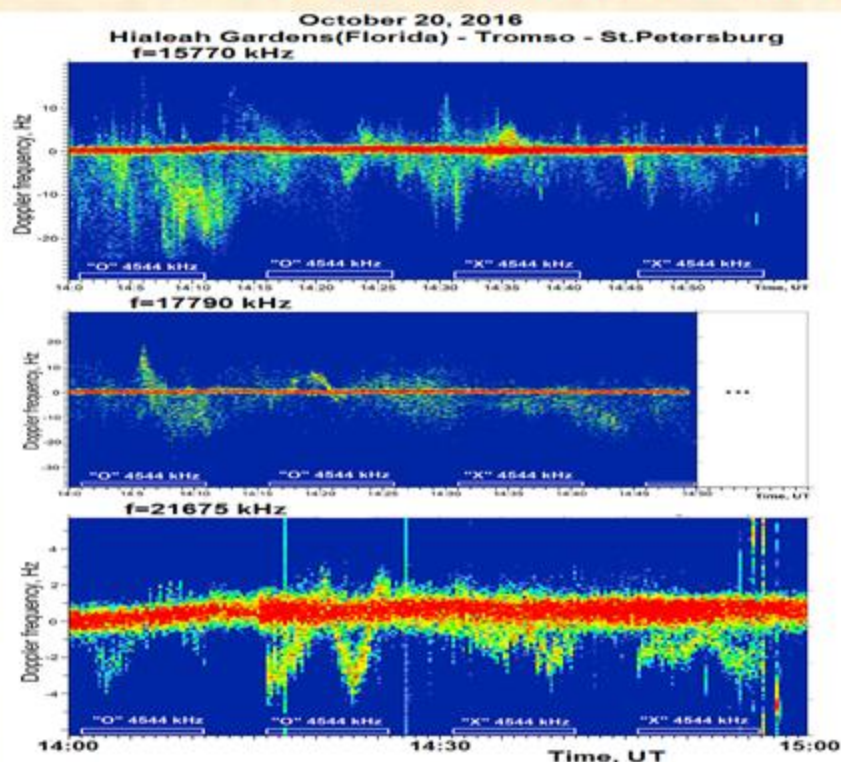
Экспериментальные наблюдения 20 – 21 октября 2016 г. выполнены в эпоху минимума солнечной активности, $W < 30$. Магнитные условия были спокойными: $K_p \sim 0+$, сумма за сутки равнялась $\Sigma K_p = 1 - 4$.

Месторасположение КВ нагревного комплекса **EISCAT/Heating**, радара некогерентного рассеяния радиоволн (UHF radar), когерентного КВ радара **CUTLASS**, обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» под г. С. Петербург и диагностических трасс.



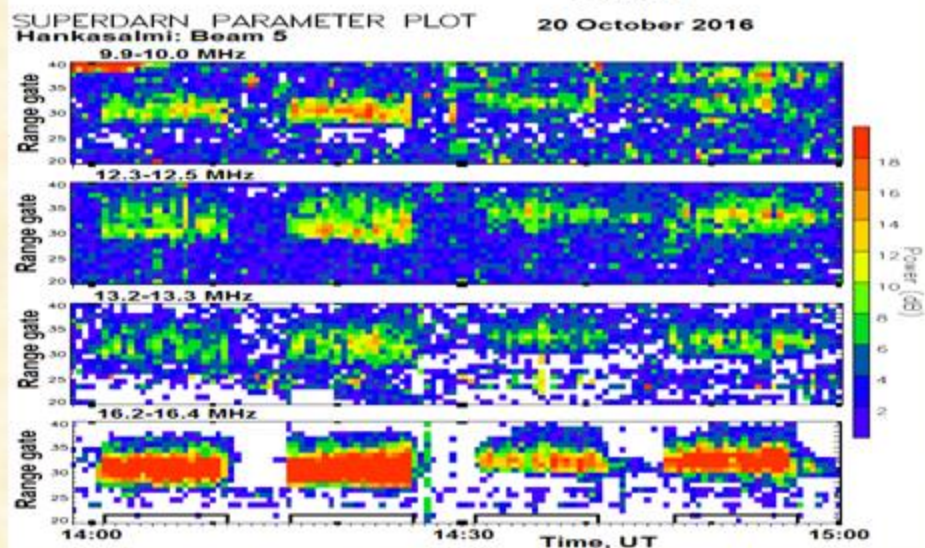
МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Результаты наблюдений 20 октября 2016г.

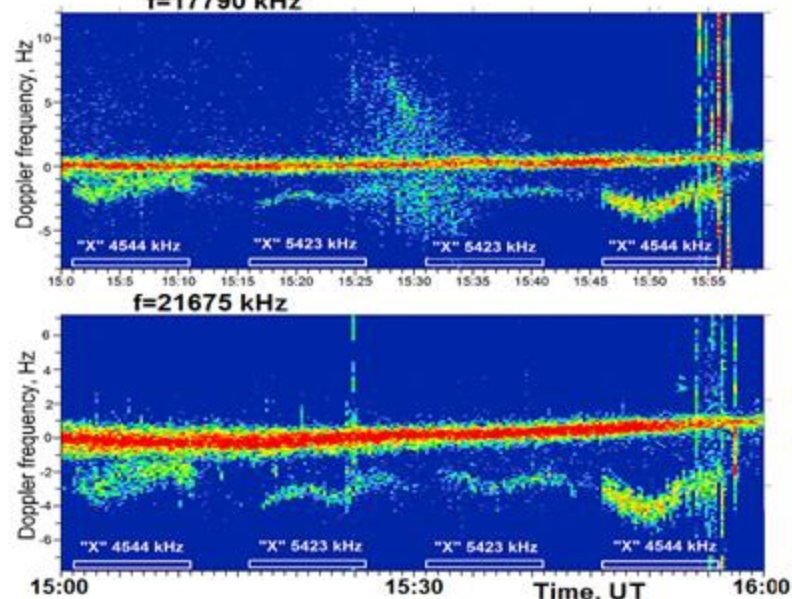


(вверху) Динамические доплеровские спектры **диагностических КВ сигналов** во время нагревного эксперимента 20 октября 2016г. на трассе Хайялиа Гарденс – Тромсе – С.Петербург (9000 км), $f_{\text{диагн}} = 15770, 17790$ и 21675 кГц. На осях времени квадратными скобками отмечены интервалы работы нагревного комплекса «Heating», нагревная частота ($f_H = 4544$ кГц) и поляризация. Излучение проводилось в магнитный зенит. Нулевая доплеровская частота $f_D=0$ соответствует распространению диагностических КВ сигналов по дуге большого круга на трассе Хайялиа Гарденс – С.Петербург.

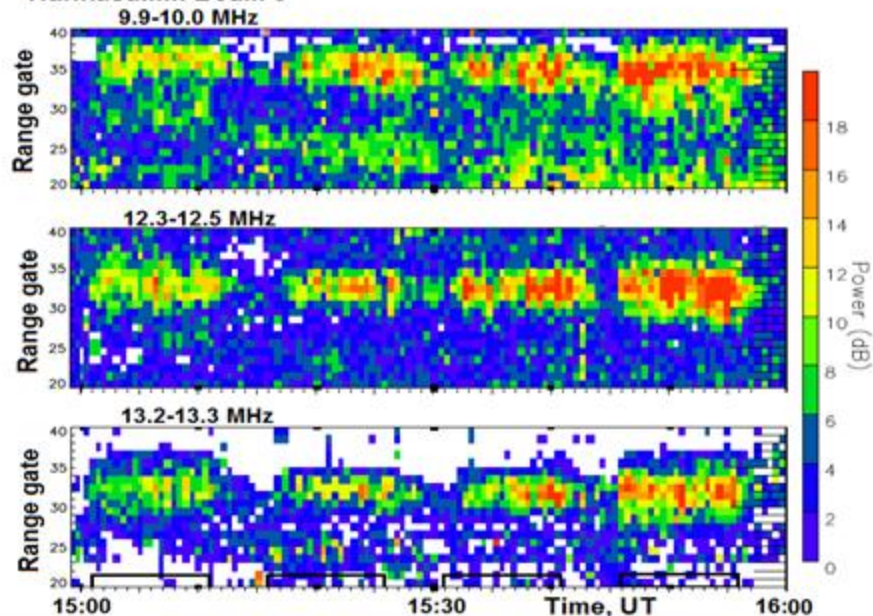
(внизу) Данные наблюдений когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе) на частотах порядка 10, 12.4, 13.2 и 16.3 МГц 20 октября 2016г. Приведено поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) – мировое время UT. В каждом и цикле нагрева наблюдались сигналы, рассеянные на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 9.2 - 15$ м. Циклы нагрева отмечены на оси времени.



October 21, 2016
Hialeah Gardens(Florida) - Tromso - St.Petersburg
 $f=17790$ kHz



SUPERDARN PARAMETER PLOT 21 October 2016
Hankasalmi: Beam 5
9.9-10.0 MHz



Результаты наблюдений 21 октября 2016г.

(вверху) Динамические доплеровские спектры диагностических КВ сигналов во время нагревного эксперимента 21 октября 2016г. на трассе Хайялиа Гарденс – Тромсе – С.Петербург, $f_{\text{диагн}} = 17790$ и 21675 кГц. На осях времени квадратными скобками отмечены интервалы работы нагревного комплекса «Heating», нагревные частоты $f_H = 4544$ и 5423 кГц, X мода поляризации. Излучение проводилось в магнитный зенит. Нулевая доплеровская частота соответствует распространению диагностических КВ сигналов по дуге большого круга на трассе Хайялиа Гарденс – С.Петербург.

(внизу) Данные наблюдений когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсе) на частотах порядка 10, 12.4 и 13.2 МГц 20 октября 2016г. Приведено поведение мощности рассеянных сигналов в координатах дальность (Range gate) – мировое время UT. В каждом n цикле нагрева наблюдались сигналы, рассеянные на неоднородностях с поперечными масштабами $l_{\perp} \sim 9.2 - 11$ м. Циклы нагрева отмечены на оси времени.

Модель КВ радиоканала.

Моделирование распространения диагностических радиоволн и их рассеяния на ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях, 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.

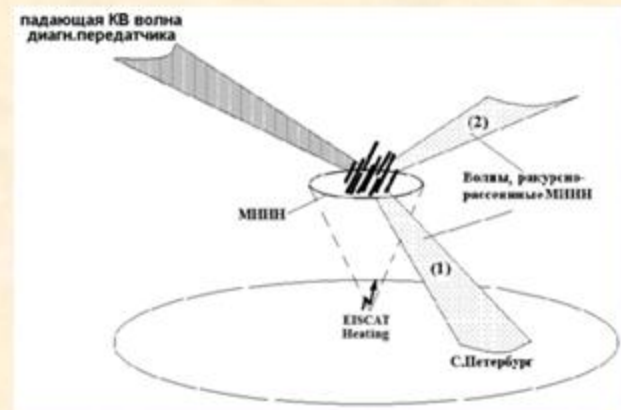
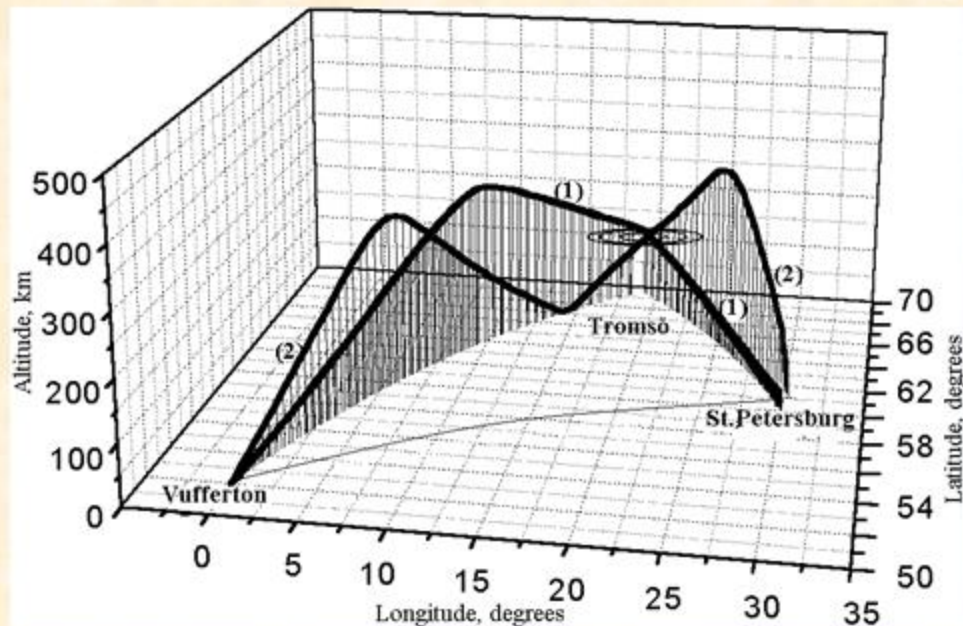
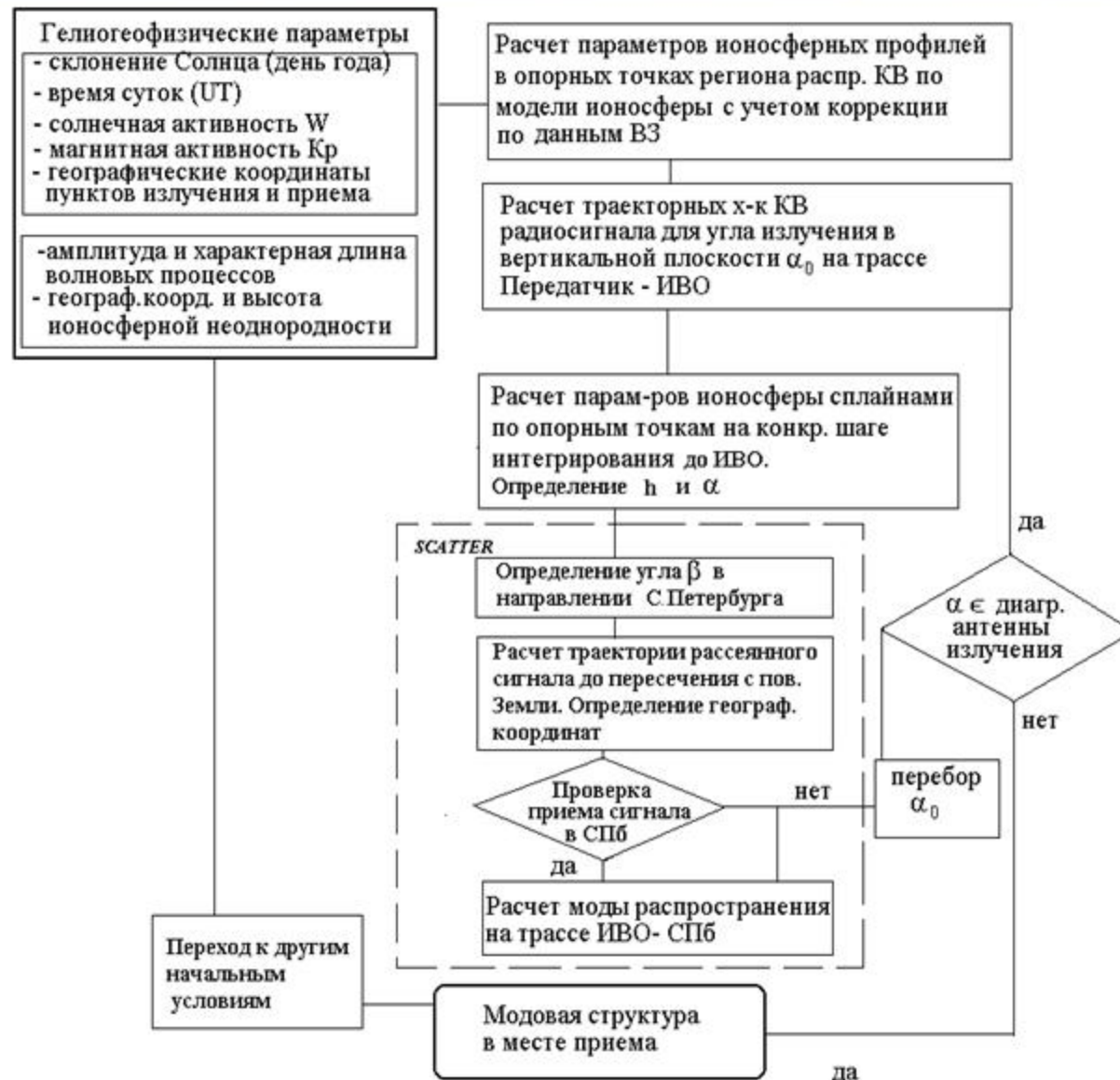


Схема геометрии ракурсного рассеяния волны на ионосферных неоднородностях на уровне F слоя над EISCAT. Падающая диагностическая волна приходит в место рассеяния после отражения от F-области ионосферы.

Алгоритм вычисления траекторных характеристик распространения декаметровых радиосигналов



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_{dop} , углы приема, МПЧ, уровень поля

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

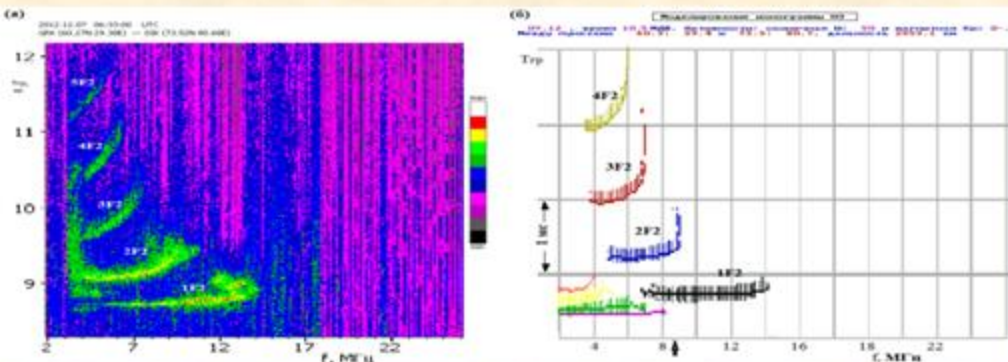
Коррекция модели ионосферы

В модели радиоканала за основу принята глобальная модель ионосферы, описывающая регулярные зависимости изменения N_e ионосферы от широты, долготы, высоты, времени суток и дня года, солнечной и магнитной активностей, заданных числом Вольфа (W) и трехчасовым индексом K_p соответственно. Модель ионосферы включает отдельные ионосферные слои E , $F1$, $F2$. Предусмотрена возможность описания спорадической ионизации на высотах Es - и FS -слоев ионосферы.

Коррекция модельного распределения электронной концентрации в модели КВ радиоканала выполняется по экспериментальным данным измерений параметров ионосферы наземными средствами (ЛЧМ комплексы НЗИ, ионозонды) и текущим параметрам солнечной и магнитной активностей.

Положения для **Коррекции** модели ионосферного слоя F.

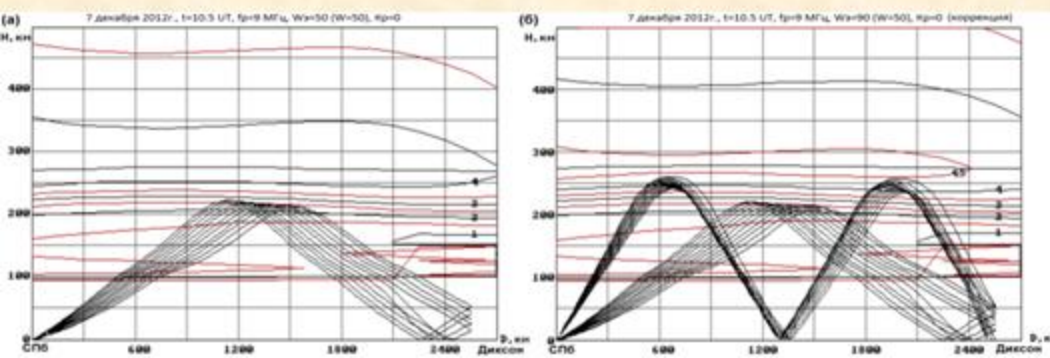
1. Определение входного параметра модели ионосферы заданного **эффективным аналогом числа Вольфа**, являющегося функцией солнечной и магнитной активностей.
2. **Коррекция описания высотного профиля N_e** по данным ионограмм вертикального и наклонного зондирования.
3. Учет влияния **крупномасштабных неоднородностей** ионосферы.



Пример проведения коррекции по данным ЛЧМ с НЗИ.

(а) Ионограмма на трассе наклонного зондирования НИС «Горьковская» – Диксон, измеренная 7 декабря 2012г., в 06:33 UT. Отмечены наблюдаемые моды распространения сигналов: 1F2, 2F2, 3F2, 4F2 и 5F2.

(б) Результаты моделирования ионограммы НЗ на трассе НИС «Горьковская» – Диксон. Расчеты выполнены с учетом коррекции модели ионосферы по данным НЗИ для $W_{eff}=90$, $t=10.50$ МДВ (МДВ=UT+4).



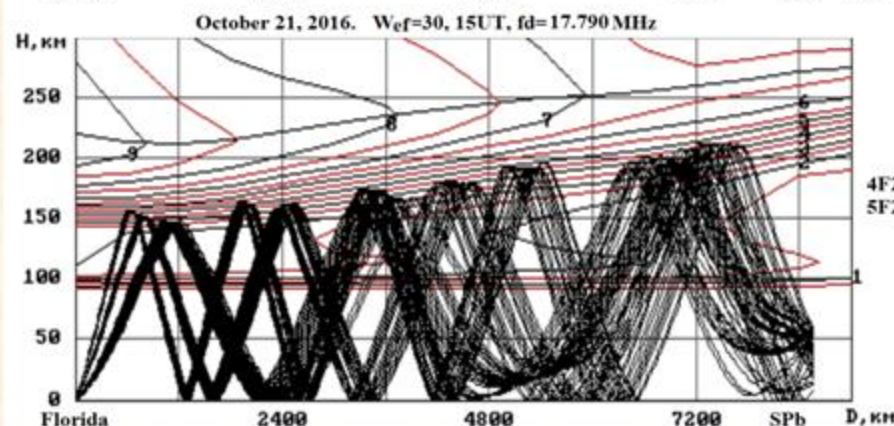
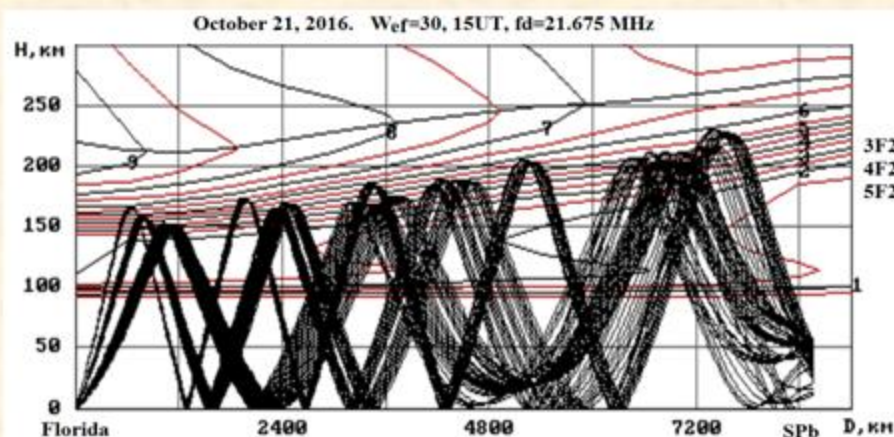
Результаты моделирования траекторий распространения КВ радиосигнала с частотой 9 МГц на трассе С.Петербург – Диксон для условий 7 декабря 2012г. – $W \sim 49$, $K_p=0$, $t=10.30$ МДВ (6.30 UT). (а) без коррекции $W_s \sim 50$; (б) с учетом коррекции по данным НЗИ, $W_s \sim 90$.

Модель КВ радиоканала.

Программное обеспечение для определения параметров КВ радиоканала

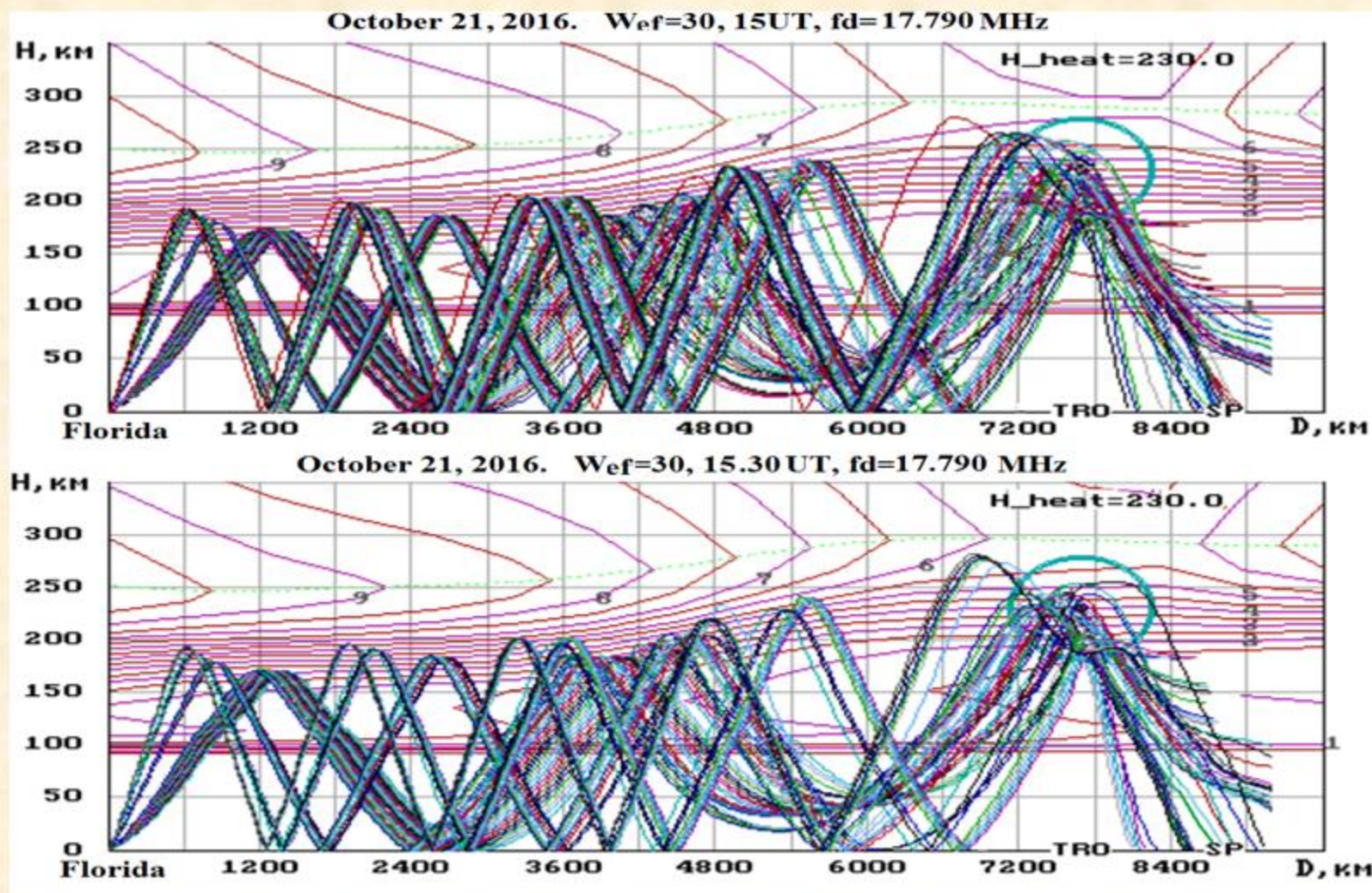
Получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

«Программное обеспечение для модернизации параметров КВ радиоканала, учитывающее эффекты модификации высокоширотной ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн, представляющее модель КВ радиоканала»



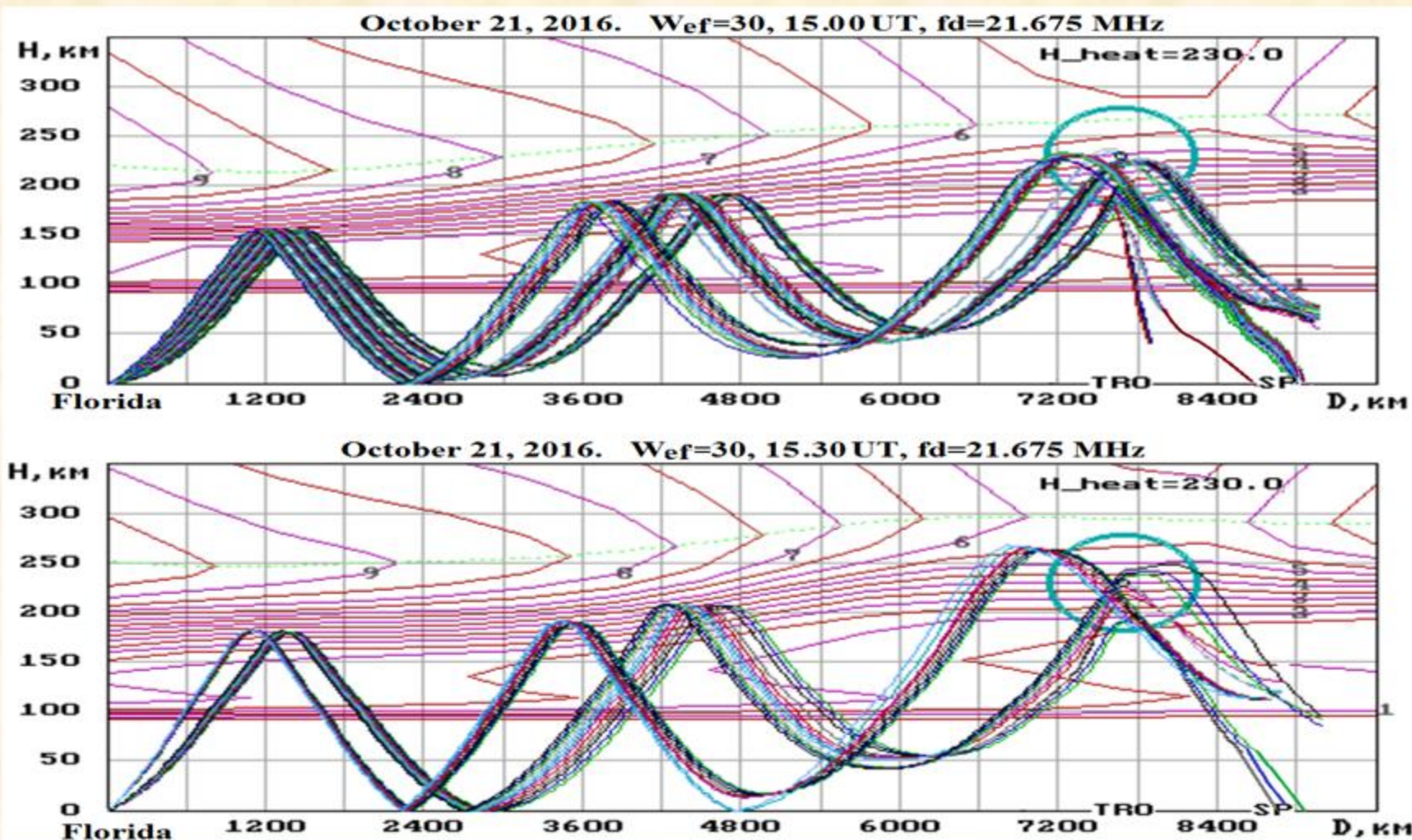
Результаты моделирования траекторных характеристик распространения сигнала с частотами 17.790 и 21.675 МГц на (прямой) трассе Хайялиа Гарденс – С.Петербург для геофизических условий октября 2016г. – $W_{ef}=30$ ($W'_{p}=16$, $K_p=0$), $t=15$ UT, $W_p=30$. Протяженность трассы–9000км; Лучевые расчеты показали, что на трассе Хайялиа Гарденс – С.Петербург возможны моды распространения 3F2, 4F2 и 5F2 для $f_{diag}=21.675$ МГц и 4F2 и 5F2 для $f_{diag}=17.790$ МГц.

21 октября 2016г. (Моделирование с учетом ракурса на МИИН в ИВО над Тромсе)



Траектории распространения диагностических КВ сигналов на частоте 17.790 МГц на трассе Хайалиа Гарденс – Тромсе – С.Петербург при ракурсном рассеянии над станцией EISCAT/Heating **21 октября 2016г**, для моментов времени $t= 15.00$ и 15.30 UT. Расчеты сделаны для расположения области ракурсного рассеяния на высотах слоя $F2$ ионосферы

21 октября 2016г. (Моделирование с учетом ракурса на МИИН в ИВО над Тромсе)



Траектории распространения диагностических КВ сигналов на частоте 21.675 МГц на трассе Хайалиа Гарденс – Тромсе – С.Петербург при ракурсном рассеянии над стендом EISCAT/Heating **21 октября 2016г**, для моментов времени $t= 15.00$ и 15.30 UT. Расчеты сделаны для расположения области ракурсного рассеяния на высотах слоя $F2$ ионосферы

Выводы

- Выполнены наблюдения ракурсно- рассеянных на искусственных ионосферных неоднородностях диагностических сигналов декаметрового диапазона на трассах протяженностью около 9000км. МИИН создавались при воздействии мощных КВ радиоволн обыкновенной и необыкновенной поляризаций комплекса EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия) , излучаемых в направлении МЗ на частотах $f_H=4.544$ и $f_H=5.423$ МГц. Прием осуществлен на НИС «Горьковская» ААНИИ С.-Петербурга на расстоянии 1200 км от Тромсе.
- Продемонстрировано влияние частоты диагностического сигнала на эффект формирования РР сигналов на МИИН на протяженных трассах. На высоких частотах влияние искусственных неоднородностей с поперечными размерами $l_{\perp} < 10$ м отчетливо регистрируются в периоды излучения нагревного комплекса. На более низких диагностических частотах наблюдается влияние неоднородностей естественного происхождения на формирование сдвига доплеровской частоты.
- Разработана адаптивная модель ионосферного КВ радиоканала. Модель предназначена для численного определения характеристик распространения сигналов декаметрового диапазона вдоль трасс «передатчик – приемник» и «передатчик – ионосферные неоднородности – приемник» в полярных, авроральных и средних широтах *в том числе в условиях воздействия мощных КВ радиоволн.*
- Показана возможность наблюдения ракурсно- рассеянных диагностических сигналов на протяженных трассах по результатам экспериментальных измерений и численного моделирования.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Европейской научной Ассоциации EISCAT за помощь в проведении экспериментов в г. Тромсе, Норвегия, а также Лейстерского университета (Англия) за обеспечение работы системы радаров CUTLASS в Финляндии в период экспериментов.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!