

Двадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА (Физические основы, методы и технологии мониторинга
окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

14 - 18 ноября 2022 г.

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТЕЙ ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРОХОЖДЕНИЕ КВ СИГНАЛОВ

Суворова З.В., Мингалев И.В., Козелов Б.В.

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

- Известно, что высыпания энергичных частиц в области высоких широт и следующее за этим повышение концентрации электронов на высотах E-слоя ионосферы (90-120 км) приводят к нарушениям прохождения КВ сигналов.
- Пространственные размеры подобных высыпаний колеблются в широких пределах – от нескольких сотен метров до десятков км.
- Цель работы – рассмотреть прохождение КВ сигналов через неоднородности электронной концентрации на высотах D и E слоев высокоширотной ионосферы.
- Были рассмотрены неоднородности с горизонтальными размерами от 30 до 80 км, вызванные высыпаниями частиц различных энергий (10, 20, 30, 40 кэВ) с различной плотностью потока.
- Лучевые траектории проходили через неоднородность после отражения от F2-слоя ионосферы.

Описание модели распространения КВ волн

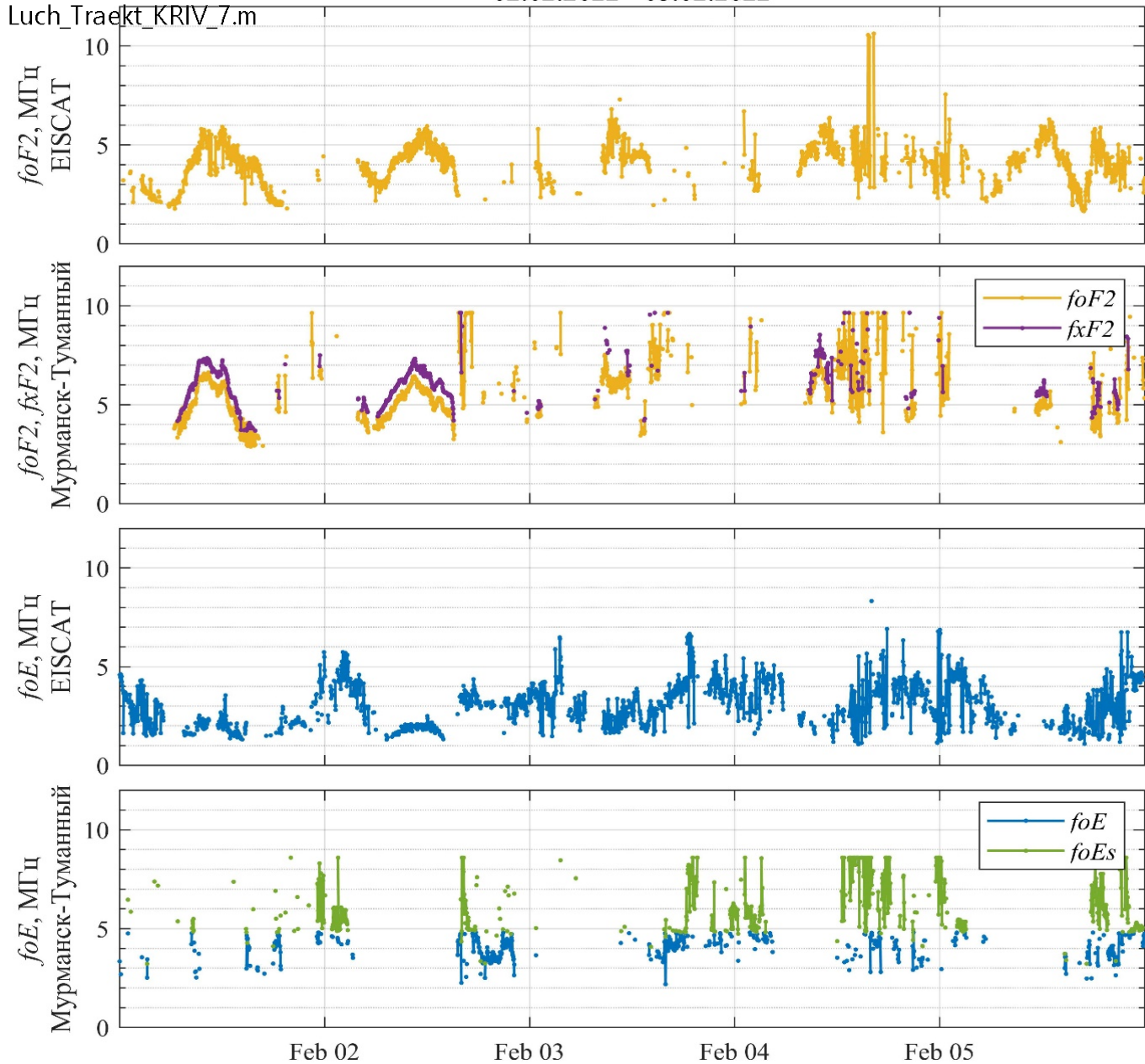
Для моделирования использовалась разработанная в ПГИ модель для расчета лучевых траекторий коротких радиоволн и поглощения этих волн на траекториях. Расчеты проводятся в приближении геометрической оптики с учетом анизотропии ионосферной плазмы и отклоняющего поглощения за счет столкновений электронов без каких-либо упрощений.

Для расчета концентрации и температуры электронов в ионосферной плазме используется глобальная эмпирическая модель ионосферы ГДМИ, разработанная в ИЗМИРАН, с дополнительной ионизацией энергичными электронами по модели, разработанной в ПГИ.

Для расчета частоты столкновений электронов используются температура и концентрации нейтральных составляющих атмосферы, рассчитанные с помощью эмпирической модели NRLMSISE-00.



Критические частоты E- и F2-слоя, EISCAT и на трассе Мурманск-Туманный
02.02.2022 - 05.02.2022



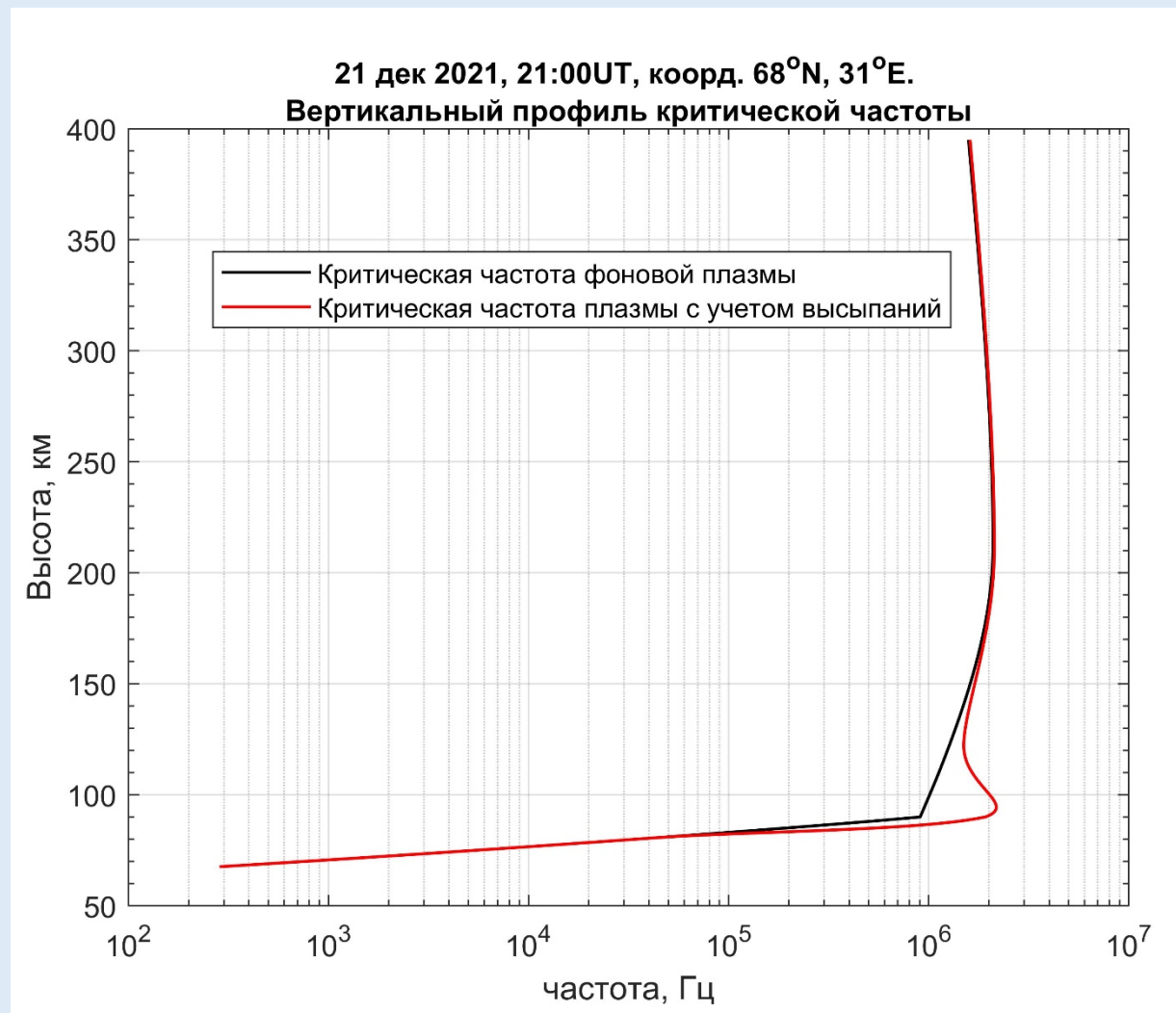
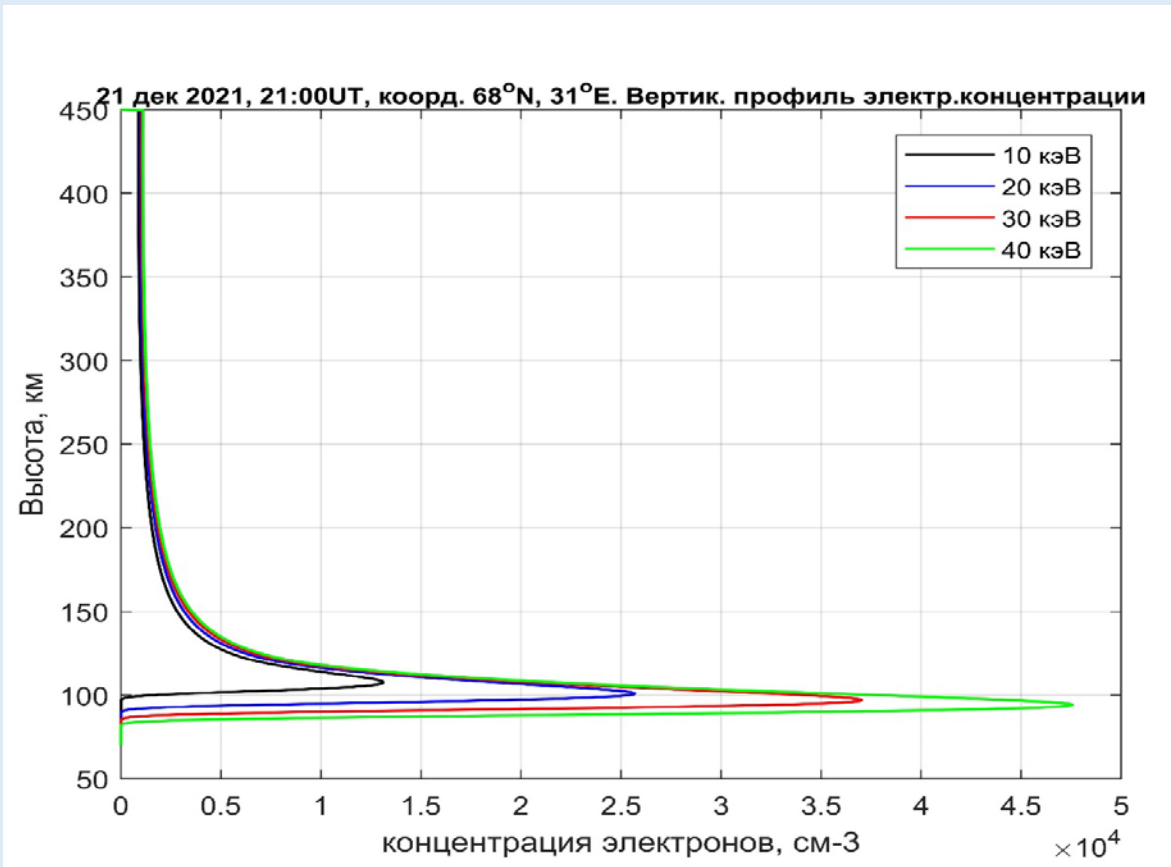
Критические частоты ионосферной плазмы на высотах максимумов E и F-слоев по данным НЗ на радиотрассе Мурманск-Туманный и радара EISCAT в период с 1 по 5 февраля 2022 года.

По данным, приведенным на рисунке, видно, что в E-слое ионосферы достаточно часто наблюдаются повышения критической частоты ионосферной плазмы E-слоя ионоферы до 7-10 МГц. Длительность таких интервалов повышения критической частоты обычно составляет от 2 до 20 минут. Эти повышения концентрации электронов обусловлены высыпаниями потоков энергичных частиц в полярную ионосферу.

Постановка задачи для моделирования

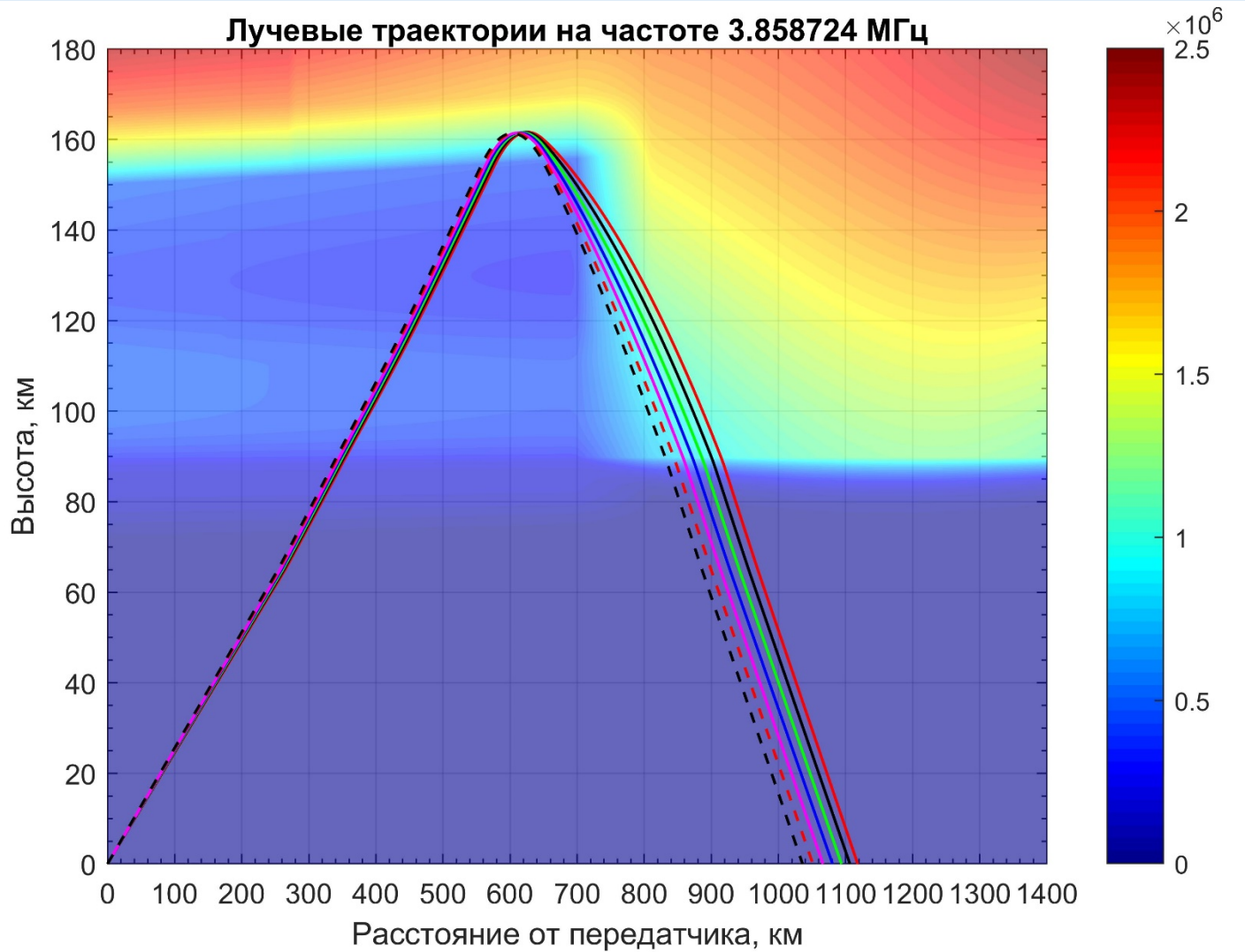
- Рассматривается односкачковая радиотрасса между Санкт-Петербургом и северным побережьем Кольского полуострова.
- Рассматривались два случая. В первом случае на радиотрассе не было неоднородностей, во втором случае на нисходящей части траектории задавалась цилиндрическая ионосферная неоднородность.
- Пространственное распределение параметров ионосферной плазмы задается по модели ГДМИ [Шубин В.Н.].
- Неоднородность задается следующим образом. Центром неоднородности была выбрана точка с координатами 31° в.д., $67,7^\circ$ с.ш. В 20-километровой окрестности этой точки значения фонового профиля электронной концентрации суммировались со значениями дополнительного профиля концентрации, вызванной повышенной ионизацией в результате высыпания моноэнергичных изотропных по углам потоков частиц.

Вертикальный профиль повышенной концентрации электронов, вызванной высыпаниями в полярную ионосферу потоков частиц с энергиями 10, 20, 30, 40 кэВ и плотностью $5 \cdot 10^5$ частиц/(см² с). Видно, что максимум концентрации приходится на высоты 90-110 км.



Вертикальный профиль критической частоты ионосферной плазмы в центре неоднородности. Черным изображен фоновый профиль, красным – с учетом дополнительной ионизации.

Лучевые траектории на частоте 3.858724 МГц



На рисунке изображены проекции лучевых траекторий на плоскость, соединяющую передатчик и приемник, на фоне распределения критической частоты плазмы в этой плоскости, рассчитанного по модели ГДМИ в отсутствие неоднородности.

На удалении 700-800 км от передатчика видна южная граница полярного овала. Точка отражения лучевых траекторий от F-слоя находится примерно на 100 км южнее этой границы.

Разным цветом изображены 7 лучевых траекторий, выпущенных с одинаковым азимутом и с разными углами места от $12,3^\circ$ до $13,2^\circ$ с шагом $0,1^\circ$. Видно, что точки падения траекторий на землю близки между собой.

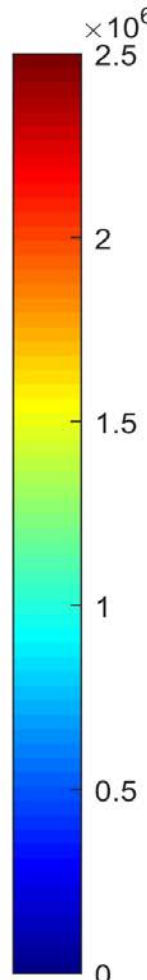
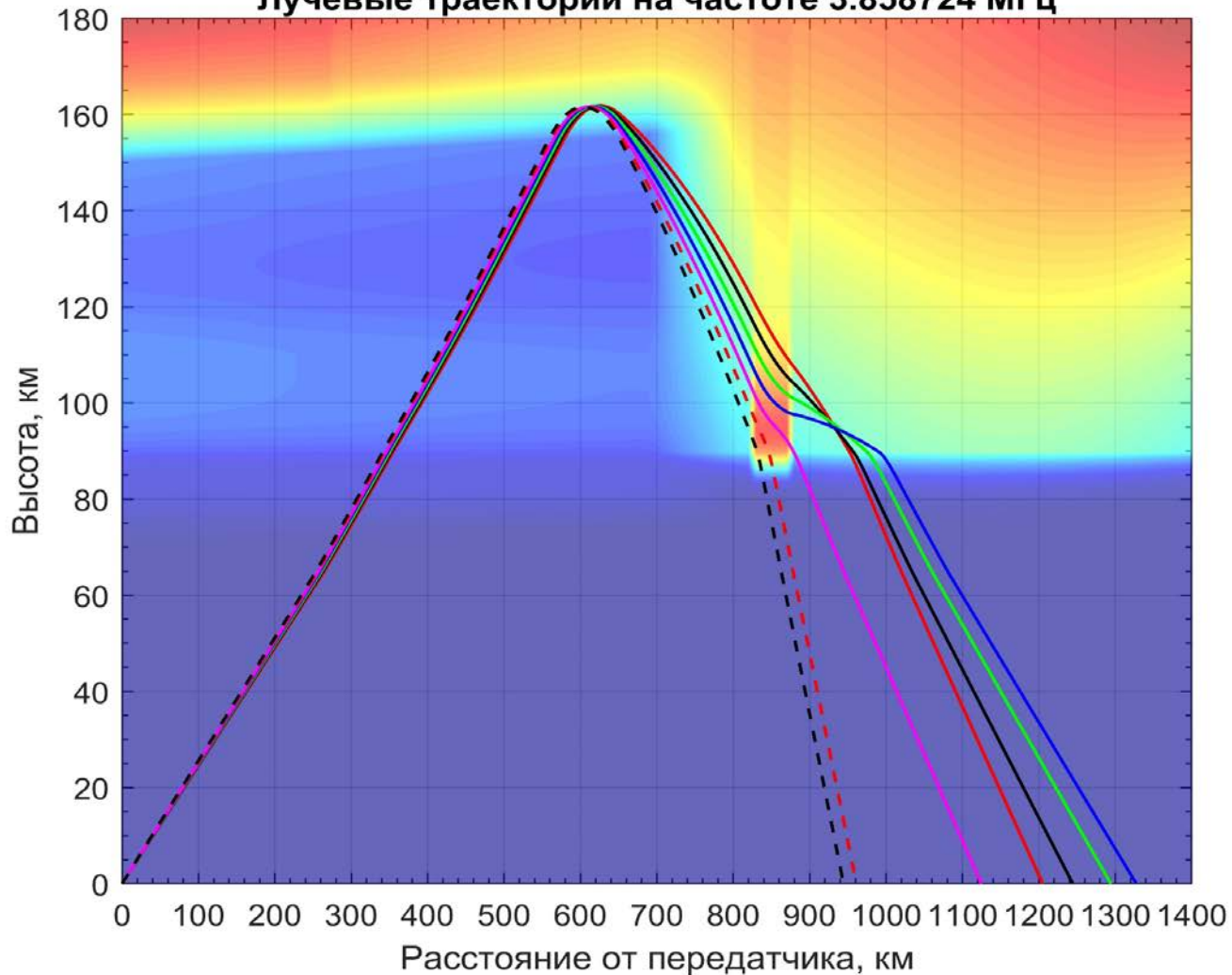
21 декабря 2021 г. UT=21:00.

Координаты передатчика: 30.5° в.д., 60.0° с.ш.

Координаты приемника: 31.5° в.д., 70.0° с.ш.

Частота волны 3,858724 МГц.

Лучевые траектории на частоте 3.858724 МГц



На рисунке изображены проекции лучевых траекторий на плоскость, соединяющую передатчик и приемник, на фоне распределения критической частоты плазмы в этой плоскости, рассчитанного по модели ГДМИ при наличии неоднородности. Неоднородность расположена внутри полярного овала и видна на рисунке. Изображены лучевые траектории, выпущенные с теми же углами, что и на предыдущем слайде.

Видно, что траектории, проходящие сквозь неоднородность, отклоняются по-разному. Траектории, проходящие через нижнюю часть южной границы неоднородности (изображены штрихованной линией), отклоняются влево. Траектории, проходящие через центр неоднородности (розовая, синяя, зеленая, черная линии), отклоняются вправо. Траектории, попавшие на верхнюю границу неоднородности (красная линия), отклоняются вниз. Видно, что точки падения траекторий на землю удалены друг от друга гораздо больше, чем на предыдущем слайде.

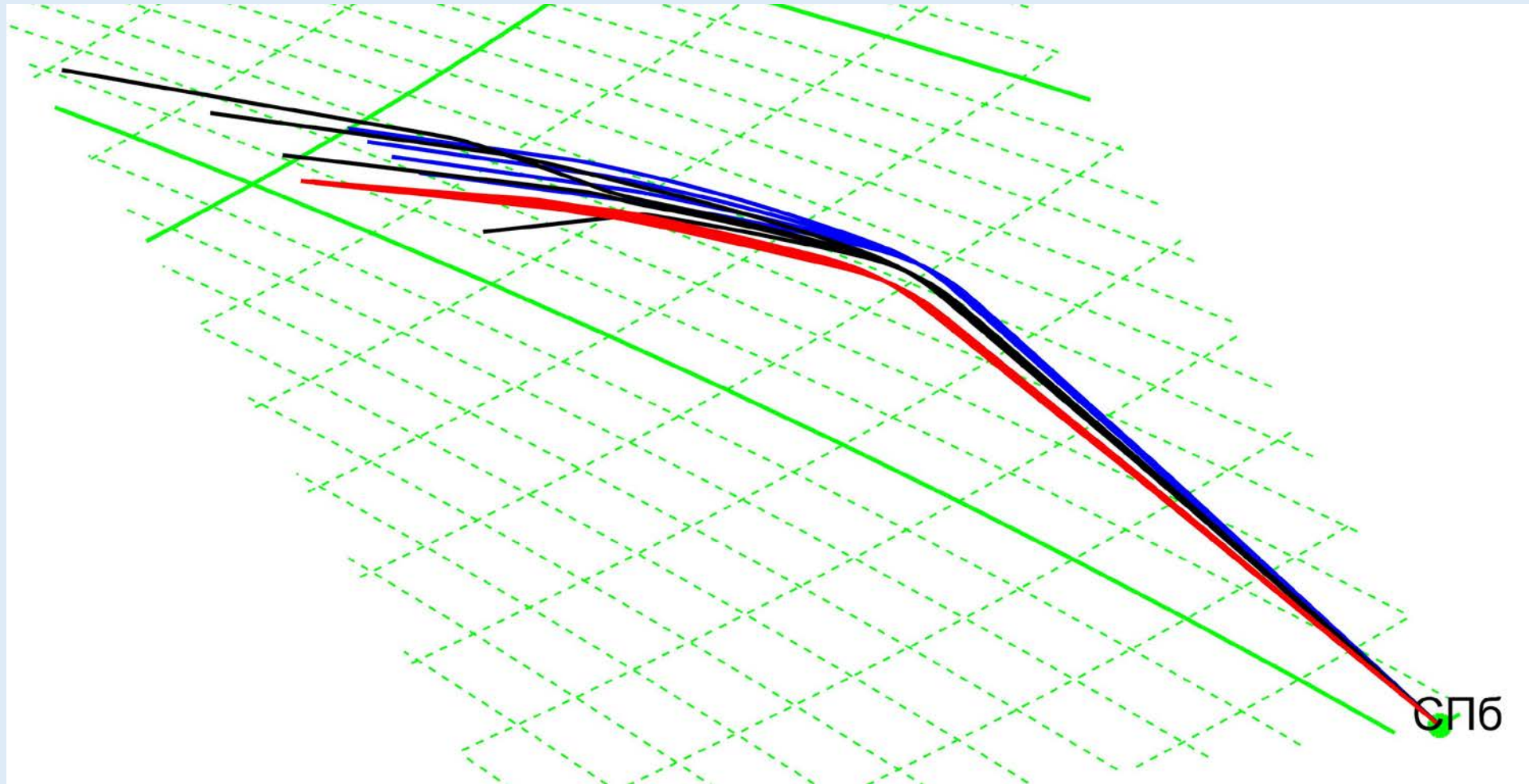
21 декабря 2021 г. UT=21:00.

Координаты передатчика: 30.5° в.д., 60.0° с.ш.

Координаты приемника: 31.5° в.д., 70.0° с.ш.

Частота волны 3,858724 МГц.

Изображены лучевые траектории, выходящие из передатчика с разными углами места и с тремя азимутальными углами (траектории одного цвета соответствуют одному азимутальному углу). Траектории красного цвета проходят левее неоднородности, синие – правее ее. Черные траектории проходят сквозь неоднородность. Видно, что траектории черного цвета расходятся гораздо сильнее, чем синие и красные. Таким образом, неоднородность увеличивает геометрическое расхождение траекторий.



Выводы

- Результаты численного моделирования показали, что появление в E-слое полярной ионосферы неоднородности с существенным увеличением электронной концентрации вызывает увеличение геометрического расхождения пучка лучевых траекторий, проходящих через эту неоднородность. Это может ухудшать условия КВ-связи, а также создавать зоны, где связь невозможна.
- Если концентрация электронов в неоднородности сравнима с таковой в F-слое, то лучевые траектории, отразившись от F-слоя, отражаются и от неоднородности.
- Дальнейшее увеличение пространственных размеров неоднородности увеличивает зоны, где связь с передатчиком невозможна.