



Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова
(ФГБУ «ИПГ»)



Регистрация градиентов концентрации электронов методом
трансионосферного зондирования с КА «Ионосфера-М»

Романов И.В., Григорьев Д.В.

2026г.



Целью исследования является экспериментальная отработка методов радиозондирования ионосферы для мониторинга состояния ионосферы.

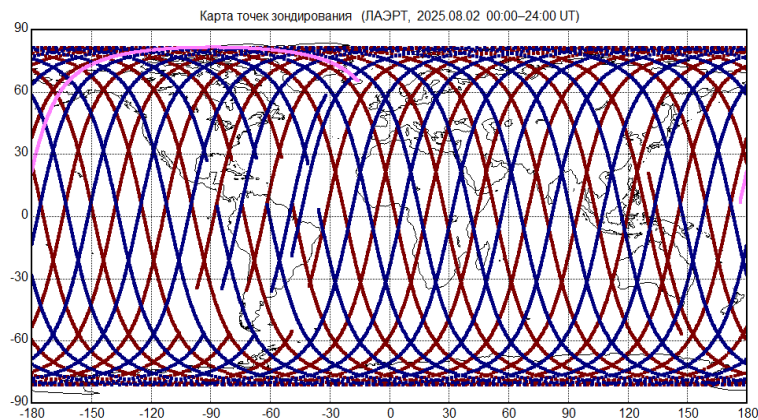
Представлены результаты эксперимента по измерению горизонтального градиента концентрации электронов максимума ионосферы на основе совместного использования методов внешнего и трансionoсферного радиозондирования ионосферы с использованием космических аппаратов «Ионосфера-М». и ионосферных пунктов наблюдательной сети ионозондов Росгидромета.

Экспериментальные сеансы ТИЗ на наземных ионосферных пунктах проводились сотрудниками ФГБУ «ИПГ» и КФ ИЗМИРАН:

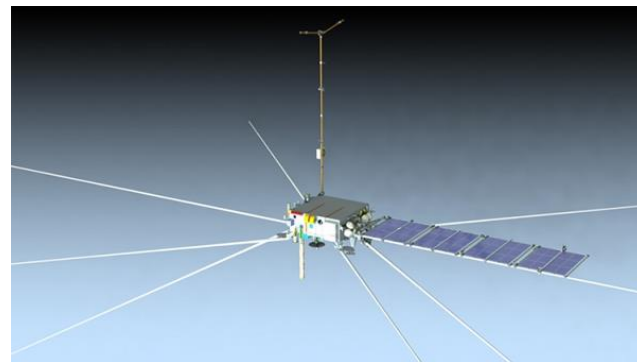
- 21 декабря 2025 г. (ст. Электроугли, ст. Калининград - Ионосфера-М №3)

В ноябре 2024 года осуществлён запуск КА «Ионосфера-М» № 1 и № 2 с ионозондами ЛАЭРТ на борту. В июле 2025 г. запущены КА «Ионосфера-М» № 3 и № 4

КА находятся на солнечно-синхронных орбитах близких к 800 км и предназначены для радиозондирования внешней ионосферы. При этом они определяют два основных параметра ионосферы – критическую частоту слоя F2 и высоту расположения максимума концентрации..



Траектории КА «Ионосфера-М» за сутки



Внешний вид КА «Ионосфера-М»

В эксперименте ТИЗ участвовали наземные ионозонды «Парус-А» ионосферной сети Росгидромета размещённые на среднеширотных ионосферных пунктах «Электроугли» и «Калининград».



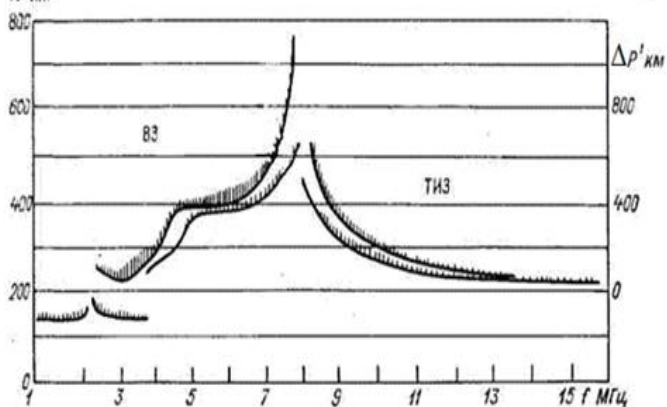
Внешний вид АФК
ионозонда ВЗ «Парус-А»



Внешний вид аппаратуры
Ионозонда ВЗ «Парус-А»



Метод внешнего зондирования (ВнЗ) направлен на изучение внешней ионосферы (выше главного максимума). Позволяет измерять вертикальный профиль концентрации электронов. Для реализации необходимо использование ионозонда размещённого на орбите. Для задач мониторинга ионосферы оптимальна группировка КА на солнечно-синхронной на орбите.



Метод ТнЗ направлен на изучение внутренней структуры ионосферы. Для его осуществления необходима синхронизация работы имеющихся бортового и наземного ионозондов одного типа в фиксированном диапазоне частот, заведомо перекрывающем возможные изменения частоты отсечки.

Радиозондирование проводится на границе диапазона радиопрозрачности ионосферы в диапазоне работы ионозонда ВЗ. После наклонного прохождения зондирующих импульсов всей ионосферы приёмником регистрируется и частотная зависимость времени прохождения зондирующих сигналов (пересчитанная в действующие расстояния) в виде трансionoграммы. Частотные зависимости трансionoферных сигналов обычно помещают на ионограммах ВЗ или ВнЗ



Трансионосферное радиозондирование (ТИЗ) подразделяется на два вида по месту расположение излучающей аппаратуры:

Прямое ТИЗ - излучающий ионозонд располагается на борту ИСЗ, а синхронно с ним работающая в режиме приёма аппаратура – на Земле;

Обратное ТИЗ - излучающий ионозонд располагается на Земле, а синхронно работающая в режиме приёма аппаратура – на борту ИСЗ

Обратное ТИЗ позволяет использовать передатчик повышенной мощности, что улучшает информативность и устойчивости приёма сигналов ТИЗ, увеличивает отношение сигнал/шум в трансионосферном канале.

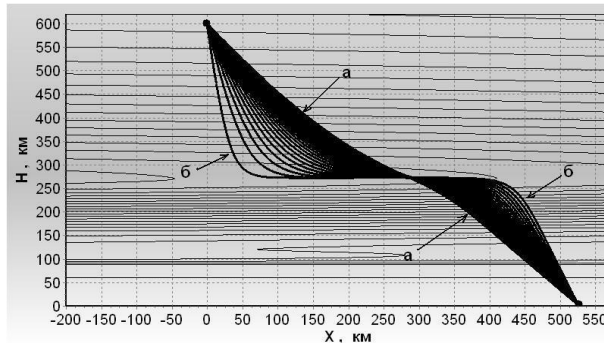
Импульсная мощность передатчика бортового ионозонда — от 200 до 900 Вт

Импульсная мощность передатчика наземного ионозонда — от 300 до 80 000 Вт

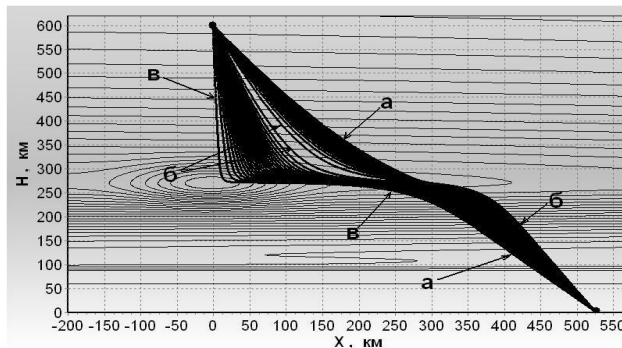


Без
горизонтальных
градиентов
концентрации

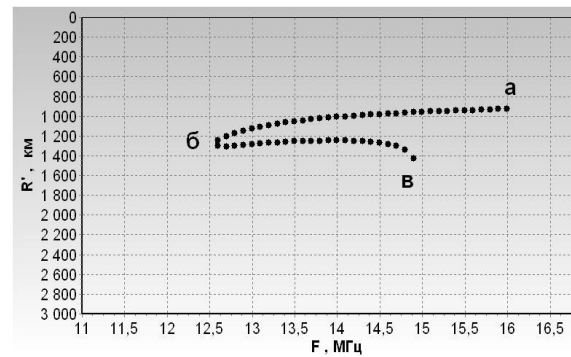
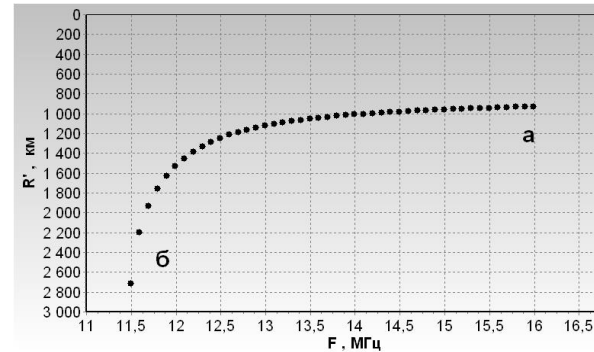
Траектории радиоволн



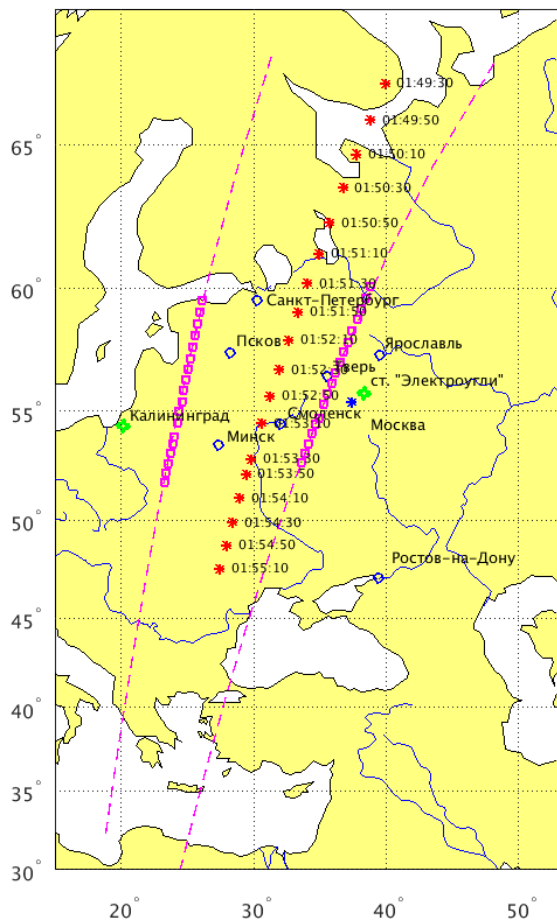
С горизонтальным
градиентом.
Положительное
возмущение под КА



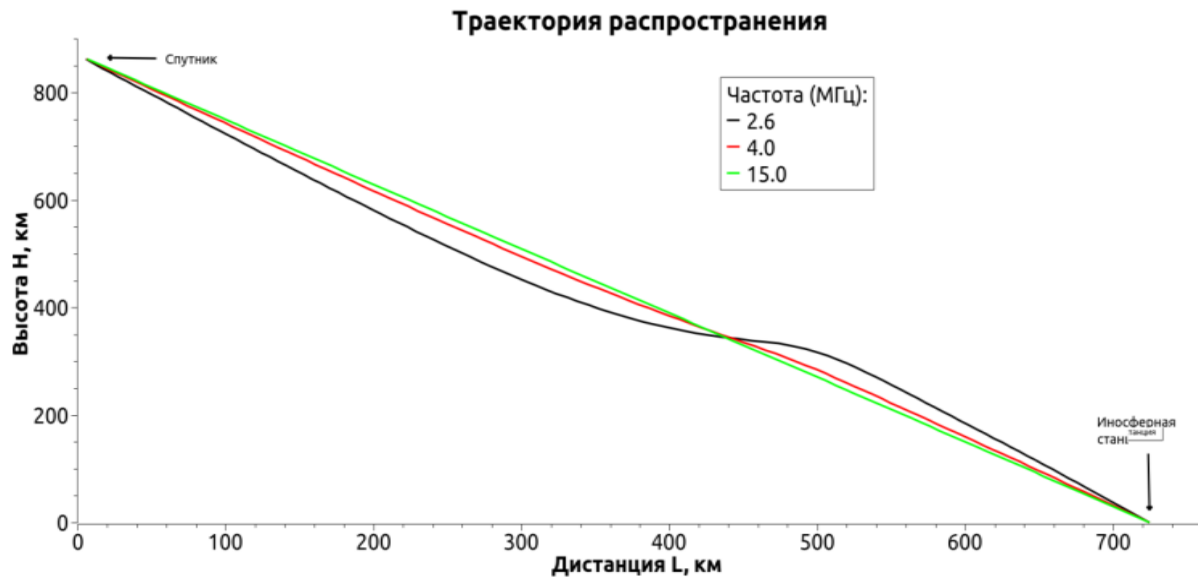
Ионограммы ТИЗ



Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, и др. Трансионосферное радиозондирование с учетом отражения радиоволн от Земли. Геомагнетизм и аэрономия т.54 № 4, стр. 508



Траектория пролета КА «Ионосфера-М»:
- красные точки - сеансы ВнЗ;
- фиолетовые точки – положение пересечения радиолучом foF2
ТИЗ



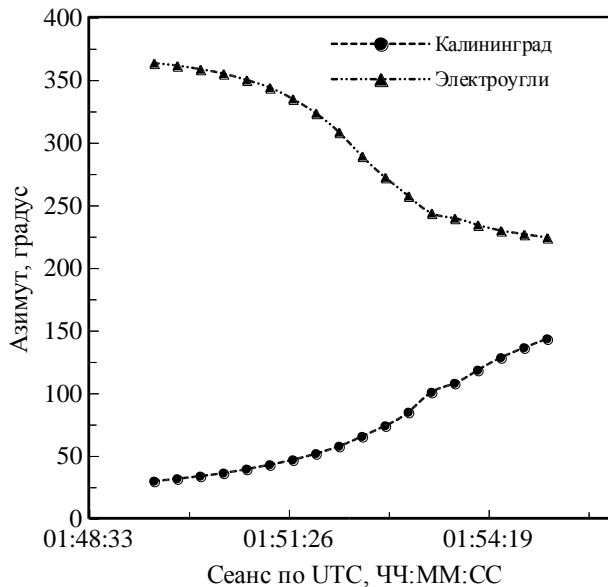


График изменения азимута на КА

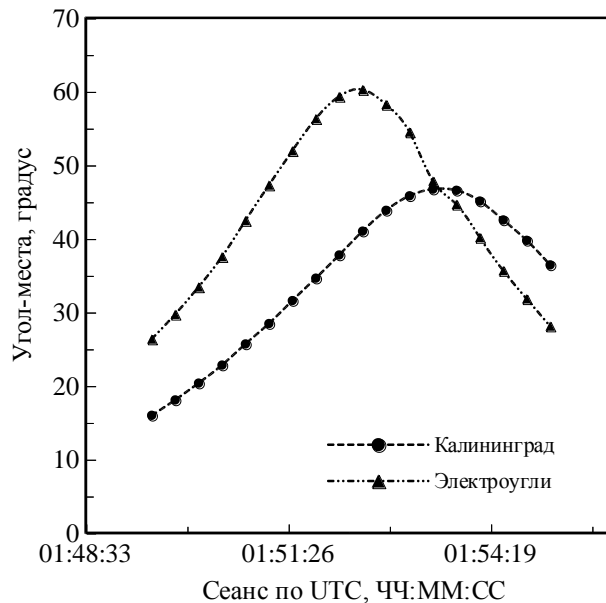


График изменения угла-места на КА

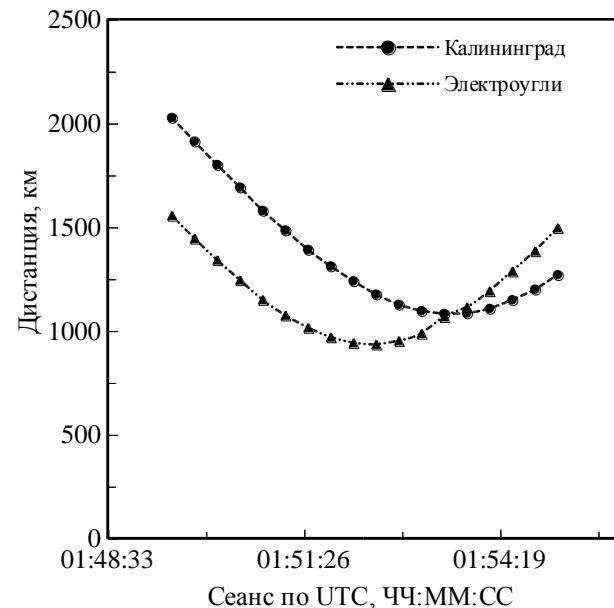
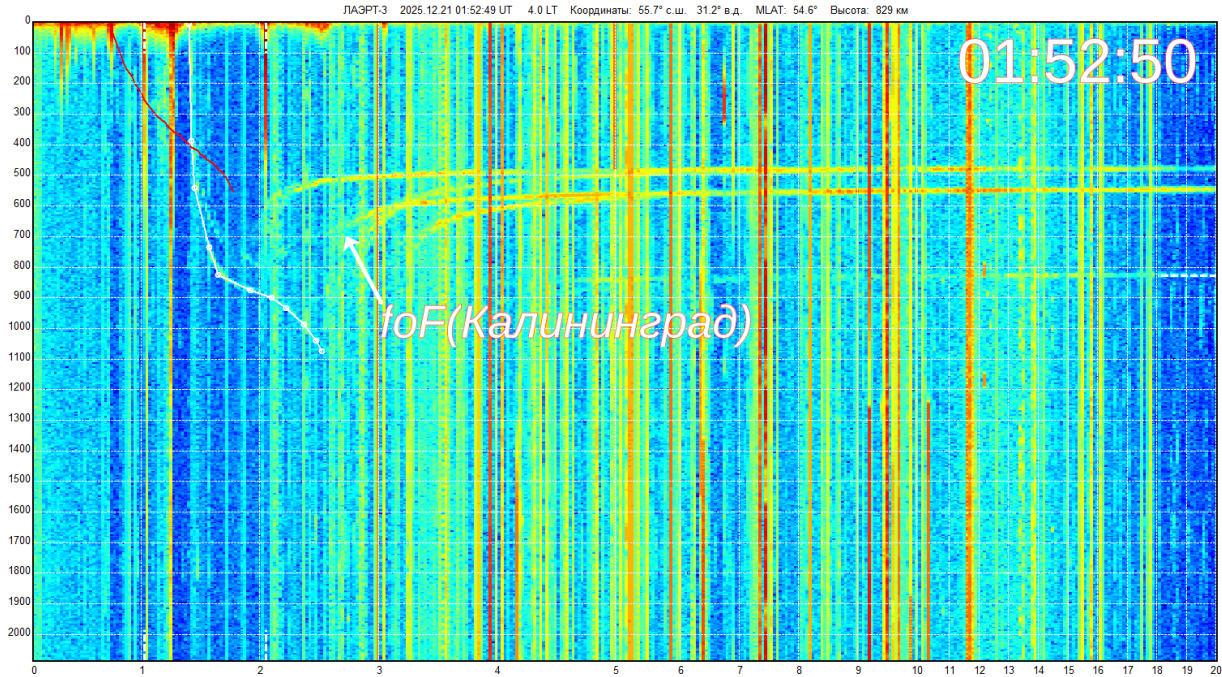
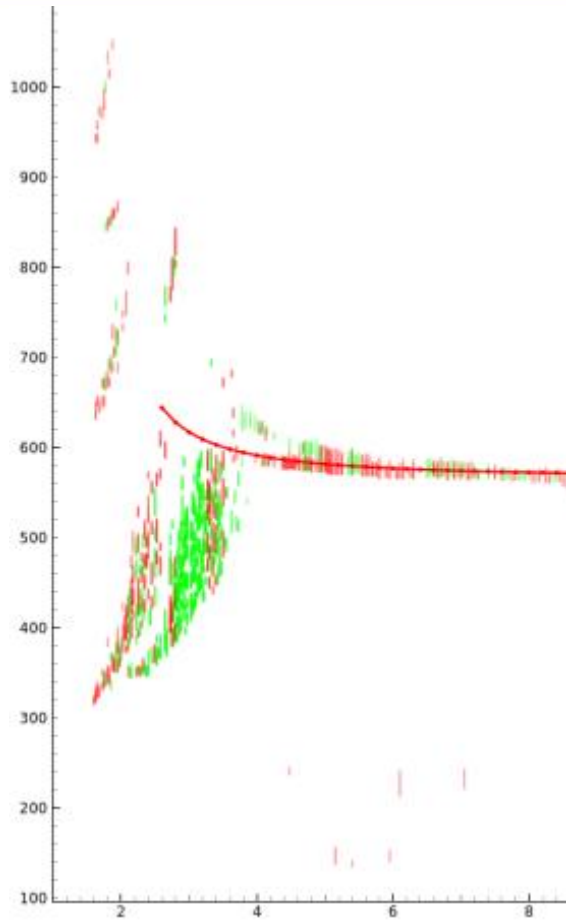


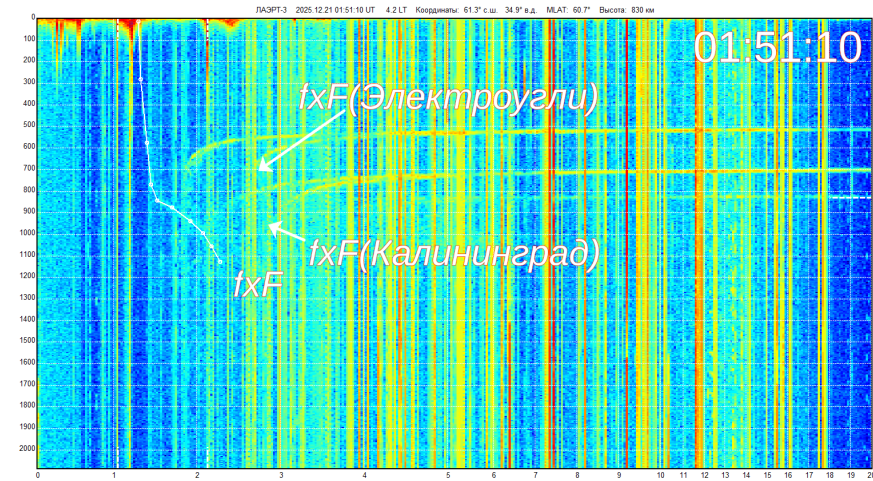
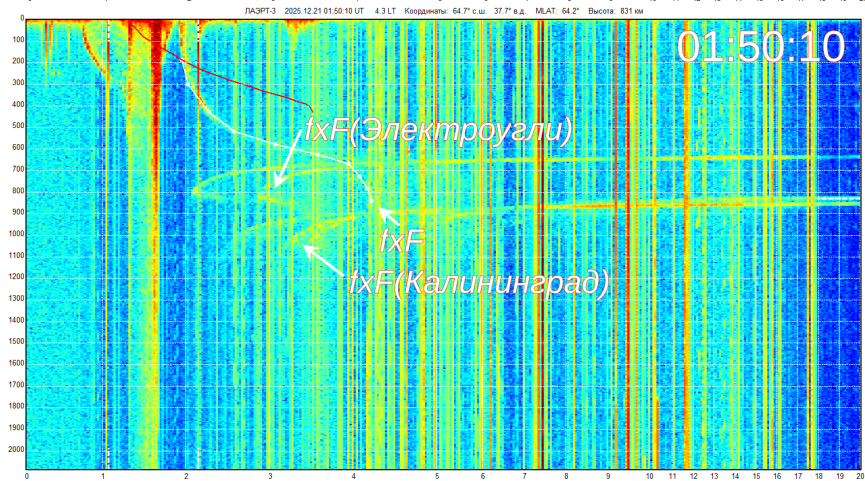
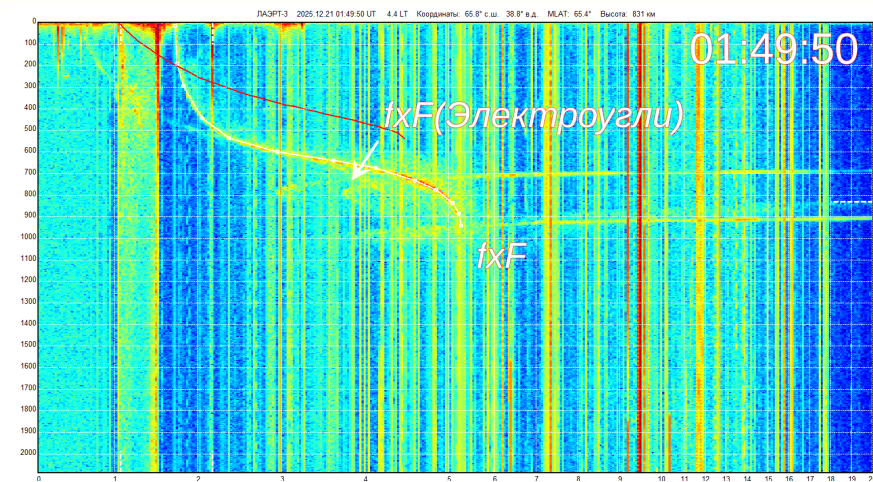
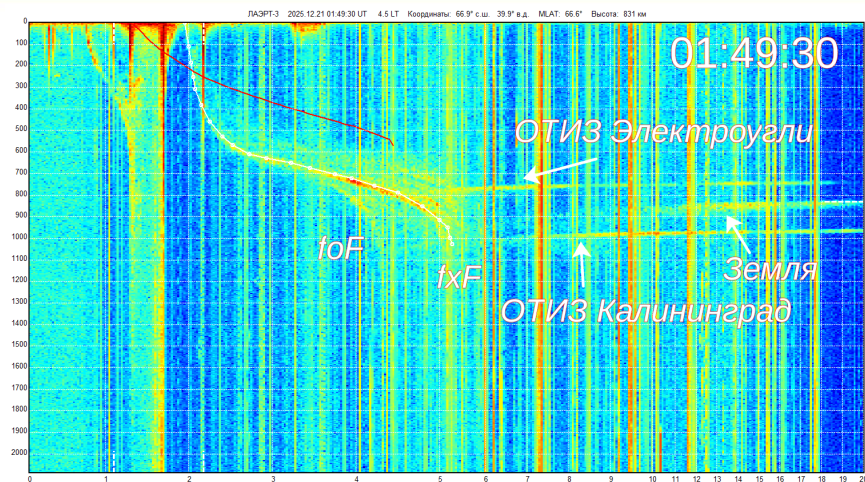
График изменения дистанции между наземными пунктами и КА

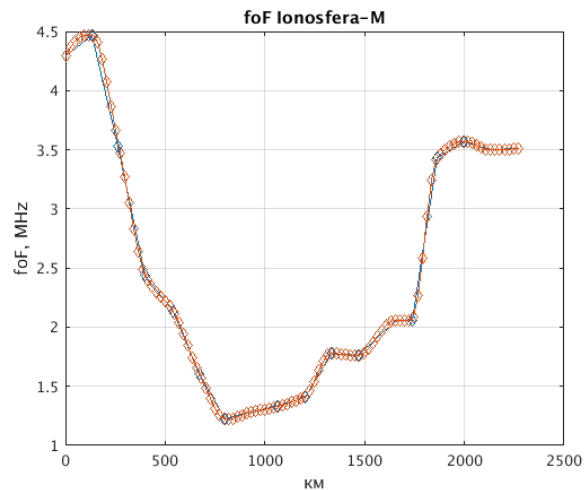


Трансионoграммы ТИЗ и ОТИЗ КА «Ионосфера-М»-ст. Калининград (красная линия результаты траекторного расчета распространения зондирующих сигналов во время сеанса ТИЗ 21.12.2025 г. 01:52:50 UTC).

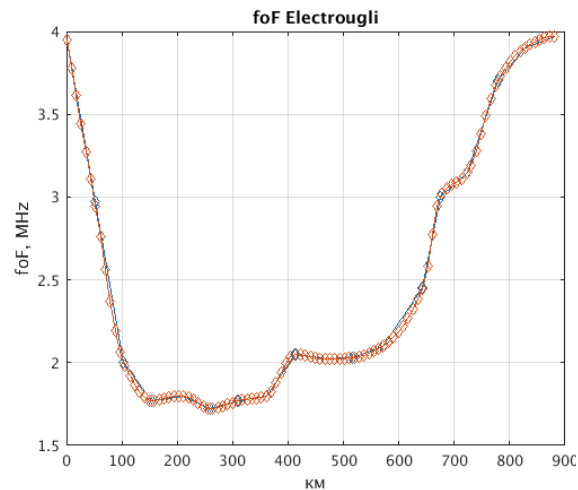


Ионограммы ОТИЗ сеансов (01:49-01:55 UTC) КА «Ионосфера-М» №3

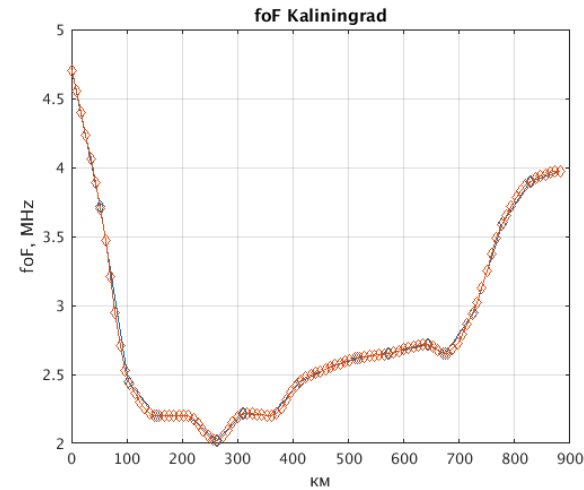




Профиль foF с по данным внешнего радиозондирования



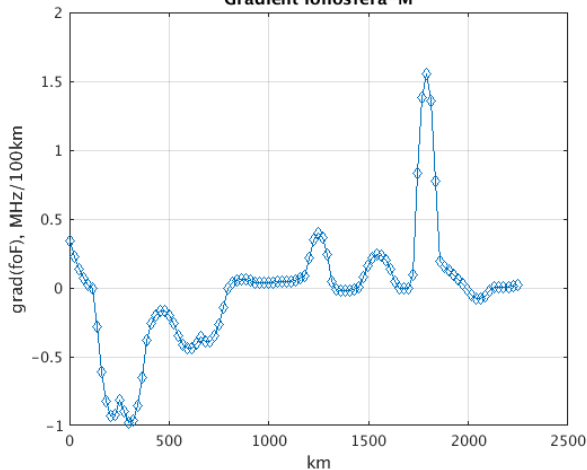
Профиль foF с по данным ТИЗ на трассе ст.«Электроугли» - КА «Ионосфера-М» №3



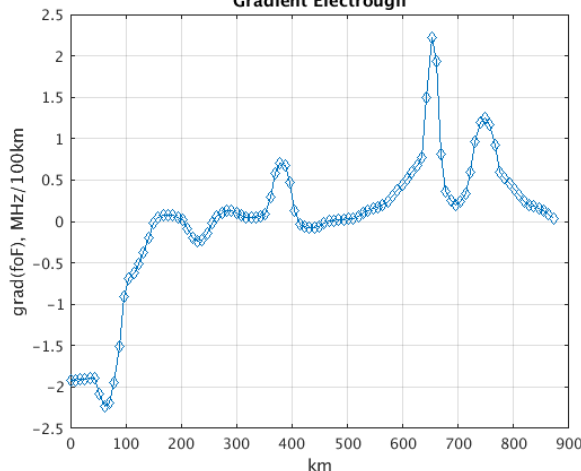
Профиль foF с по данным ТИЗ на трассе ст.«Калининград» - КА «Ионосфера-М» №3



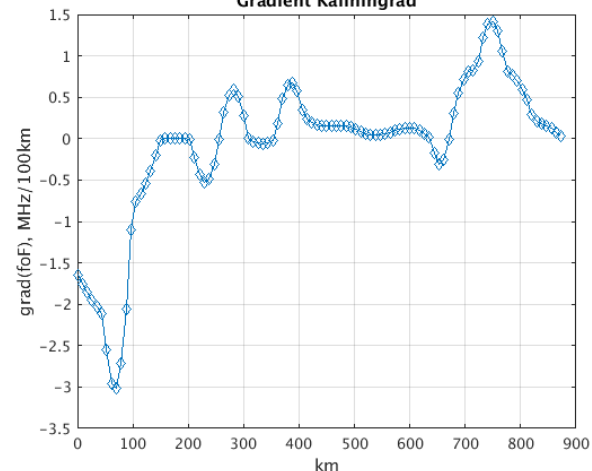
Gradient Ionosfera-M



Gradient Electrougli



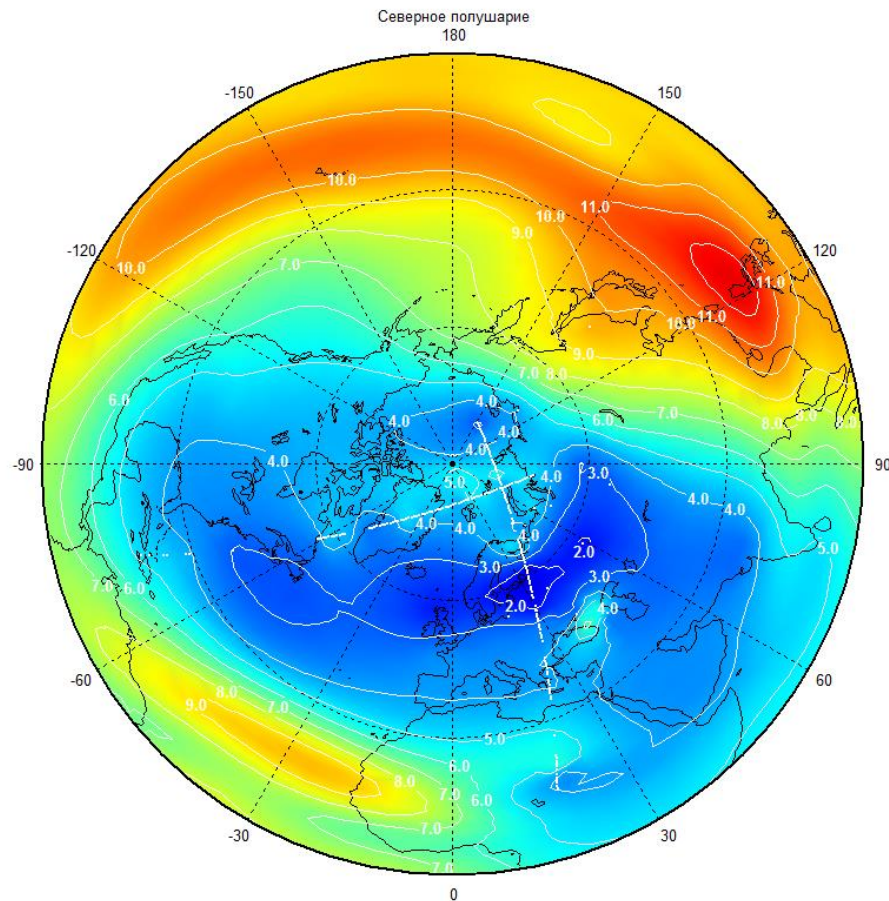
Gradient Kaliningrad



Горизонтальный градиент foF с по данным внешнего радиозондирования

Горизонтальный градиент foF по данным ТИЗ на трассе ст.«Электроугли» - КА «Ионосфера-М» №3

Горизонтальный градиент foF по данным ТИЗ на трассе ст.«Калининград» - КА «Ионосфера-М» №3



Карта глобального распределения foF по данным ионосферной модели SIMP с ассимиляцией данных наземного и космического сегментов системы ионосферных наблюдений на момент проведения сеансов экспериментов ТИЗ: ст.«Электроугли» - «Ионосфера-М» №3 и ст.«Калининград» - «Ионосфера-М» №3. Белые линии - траектории пролета КА - «Ионосфера-М».



- Представлены описание и результаты эксперимента по измерению горизонтального градиента концентрации электронов с на основе совместного использования ионозондов наземного и космического базирования.
- Совместное использование космической и наземной инфраструктуры, и методов исследований ВЗ, ВнЗ, ТИЗ и ОТИЗ предоставляет инструмент для получения дополнительных научных данных о распределении концентрации электронов в ионосфере.
- Полученные данные могут быть полезны в исследованиях связанных мониторингом ионосферы и исследовании ионосферных возмущений.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

**Институт прикладной геофизики имени
академика Е.К. Федорова (ФГБУ "ИПГ")**

129128, г. Москва, ул. Ростокинская, д. 9

тел./факс 7(499)187-81-86

<http://ipg.geospace.ru> <http://space-weather.ru>

<http://meteorf.ru/about/structure/niu/347/>