

Наблюдения быстротекущих и мелкомасштабных неоднородностей на одномоментных ионограммах ионозонда Циклон

**Акчурин А.Д.,
Юсупов К.М.,
Шерстюков О.Н.,
Ильдирияков В.Р.**

Основные задачи ионосферного зондирования

- Коррекция формы (параметров) регулярной (фоновой) ионосферы
- Выделение и регистрация неоднородных структур (неоднородностей) различного масштаба:
 - Крупного (>1000 км , > 1 ч)
 - Среднего (50 до 300 км , 20-60 минут)
 - Промежуточного (1-30 км , 1-10 минут)
 - Малого (0.1 до 1 км, 1-10 минут)
- Определение их перемещений и (наклонов)
- Все ли ?

Что дальше?

- Поиск причин возникновения неоднородностей с установлением их сигнатур на ионограммах (для этого необходимо выбрать соответствующий режим работы и сопоставлять результаты зондирования с другими методами (ГЛОНАСС-GPS, HP-радары) и вариациями гео- и гелиособытиями)
- Если для крупномасштабных и, частично, для среднемасштабных уже много сделано и делается, то для мелкомасштабных (промежуточномасштабных) необходимо работать

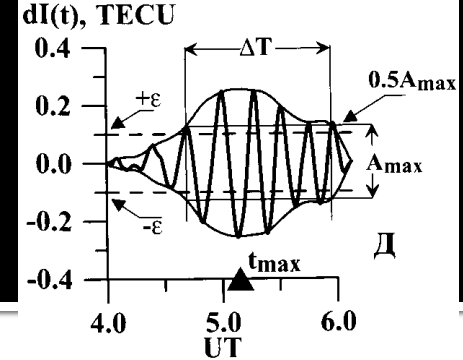
Что нужно сделать для регистрации ПМ и ММ неоднородностей?

- Антенную решетку – *реализуемо ли?*
- 1-минутный режим зондирования – *как обрабатывать суточные, месячные и годовые ряды?*
- Наладить работу нескольких близко разнесенных приборов – *реализуемо ли?*
- Разобраться с нестыковкой в классификации неоднородностей

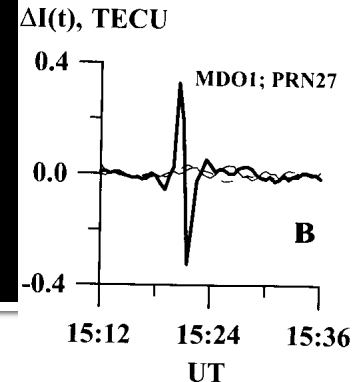
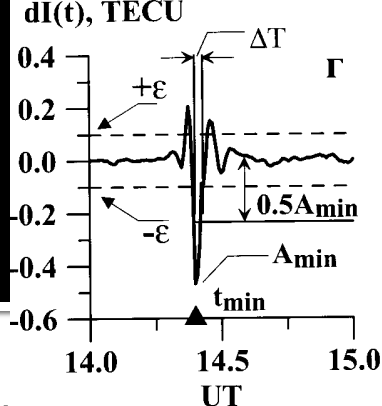
Нестыковки в классификации неоднородностей

- Как их называть: ПИВ или неоднородность?
- Они волны или всплески: ПВВ (перемещающиеся волновые пакеты) и ИИН (изолированных ионосферных неоднородностей)?
- Es-слои – это CM или MM неоднородности?
- Фокусировки на ионосферных следах – что это?

ПВП

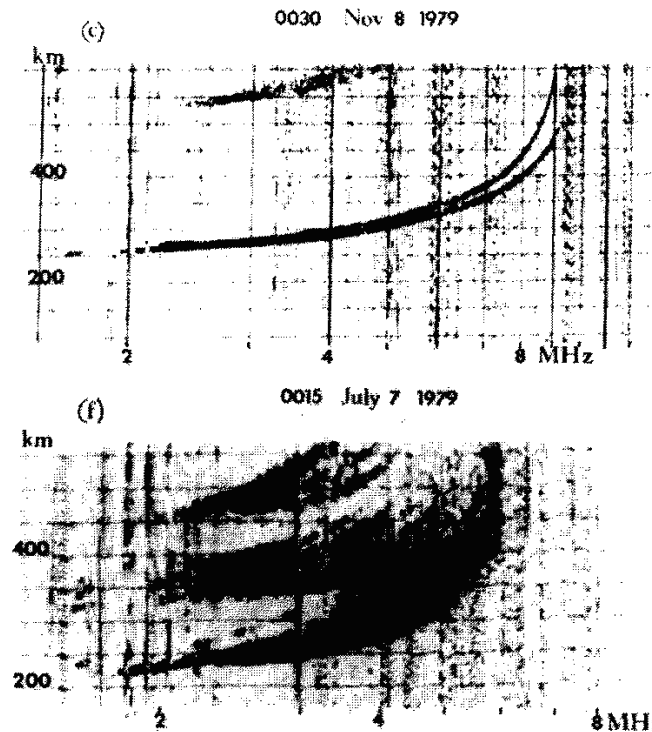
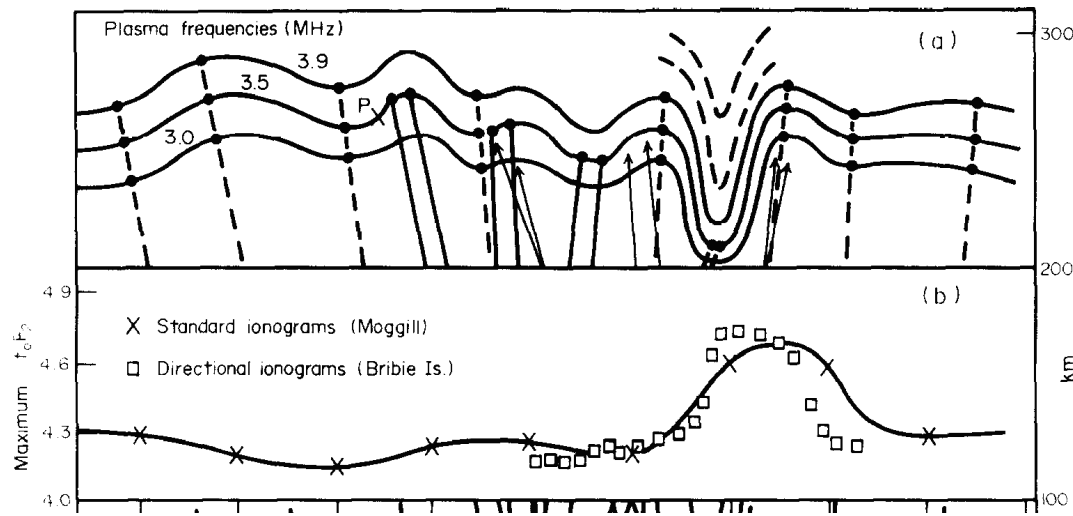


- ПВП – квазипериодические (монохроматические) колебания ПЭС длительностью около 1 ч с периодом колебаний в диапазоне 10-20 мин и амплитудой, превышающей амплитуду «фоновых» вариаций ПЭС как минимум в 4-5 раз. ПВП представляют собой довольно редкое событие (наблюдаются не более чем на 0.1% рядов ПЭС длительностью порядка 1 ч). Среднее значение амплитуды вариаций ПЭС в диапазоне периодов 5-20 мин для спокойных геомагнитных условий составляет 0.001-0.005 TECU. Во время геомагнитных возмущений амплитуда вариаций ПЭС может возрасти на порядок до 0.1 TECU.
- характерный размер всего волнового пакета в направлении распространения составляет 300-500 км, а вдоль фронта волны – до 1000 км



- ИИН – еще один интересный, достаточно редкий класс среднemasштабных ионосферных возмущений неволнового типа (наблюдаются на 1-2% рядов ПЭС). ИИН проявляются в форме одиночных апериодических отрицательных возмущений ПЭС длительностью 5-10 мин. Появление S-типа («spikes-type scintillation» (мерцания S-типа) колебаний связывают с дифракцией или интерференцией на ионосферных неоднородностях — «пузырях» и «глобулах» размером порядка 10 - 100 км, расположенных чаще всего в области F, а иногда в E-слое ионосферы.
- Наблюдается сильная анизотропия изучаемых ионосферных неоднородностей (значительная вытянутость ИИН по долготе) Отношение длины к ширине ИИН колеблется от 6 до 10, например, горизонтальное сечение ИИН представляет собой эллипс с размерами малой и большой осей 108 и 864 км соответственно
- Э.Л. Афраимович, И.П. Перевалова GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск 2006

"Языки ионизации" (tongues of ionization) (Bowman, 1981)

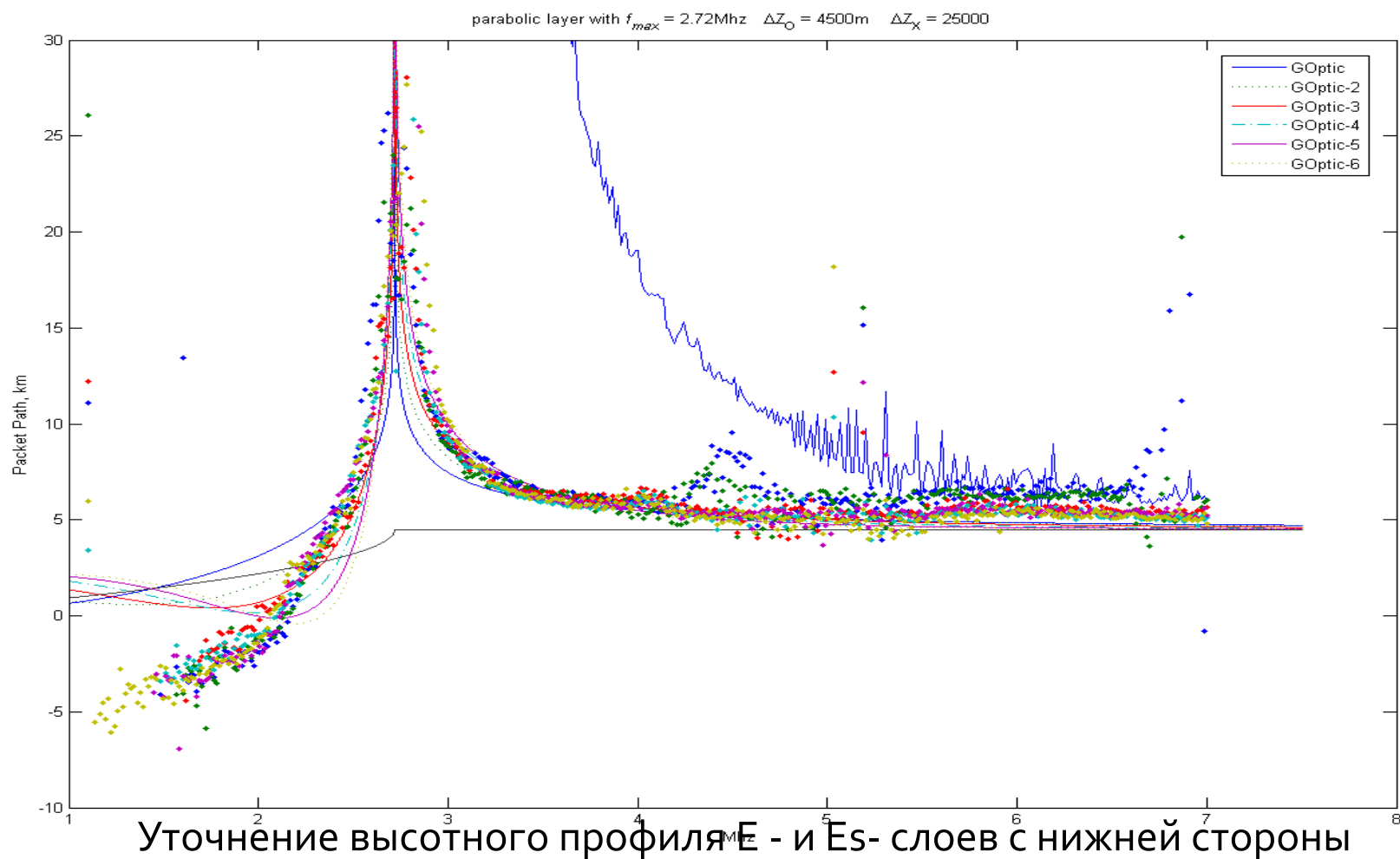


При исследовании предшественника F-рассеянию Боумен наблюдал сопутствующий след. Может быть ИИН Афраймовича и Языки Боумена родственные явления?

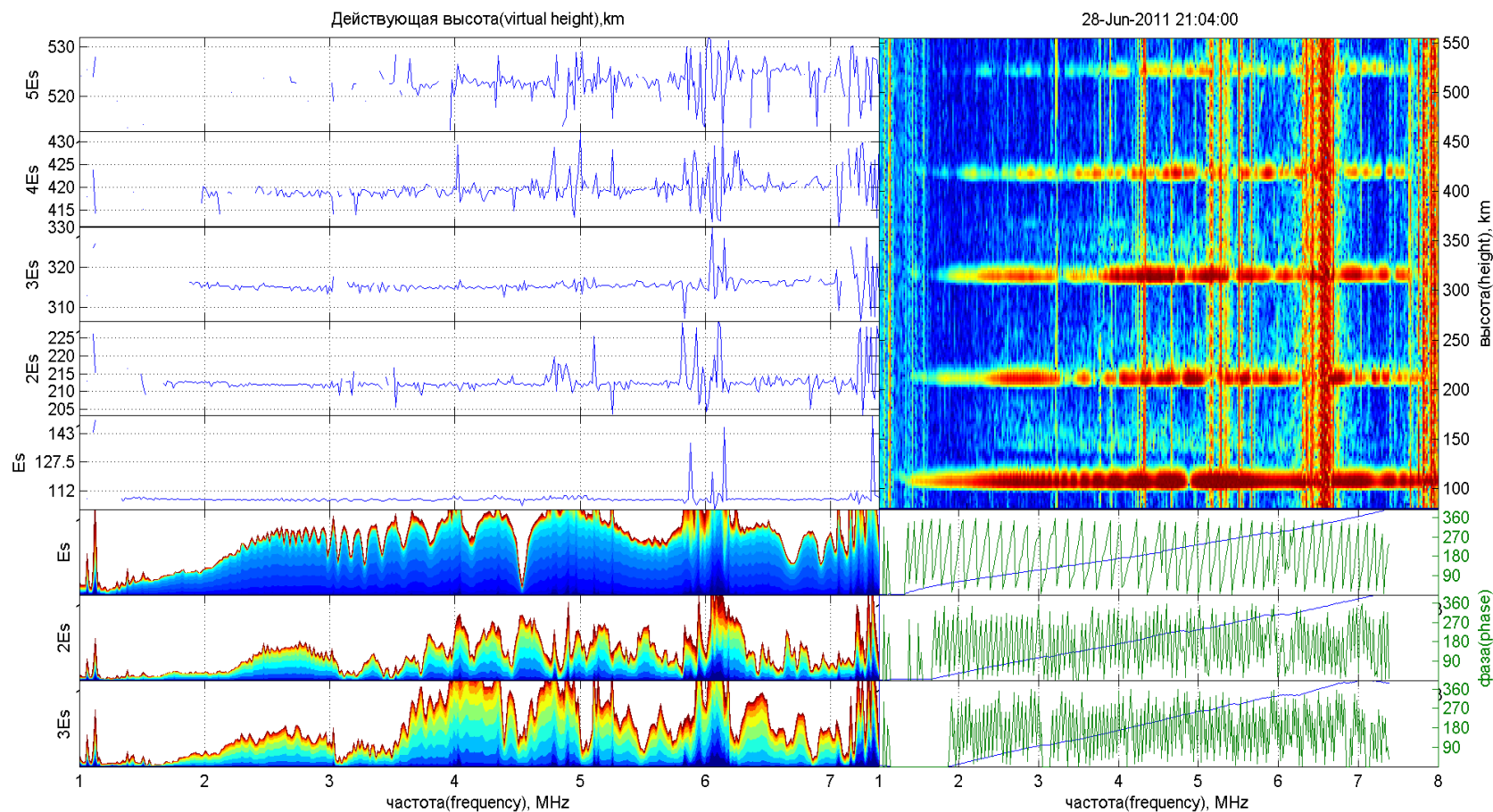
Одноминутная запись ионограмм

- Одноминутная запись подразумевает огромное число ионограмм, которое неразумно сводить к просто построению f - и h -графиков. Необходимо сохранять амплитуду отраженного сигнала, чтобы как-то можно было наблюдать информацию об активности ПИВ в течение суток.
- В предварительной обработке ионограмм было решено отказаться от точной идентификации следов, только выделение максимумов в заданном высотном интервале на каждой частоте. Затем найденные максимумы собираются в один вектор и такие векторы со всех ионограмм за все сутки образуют А-карту

Высотные вариации слоев на основе ММП в СО с высокой точностью (~300 м) и моделиро

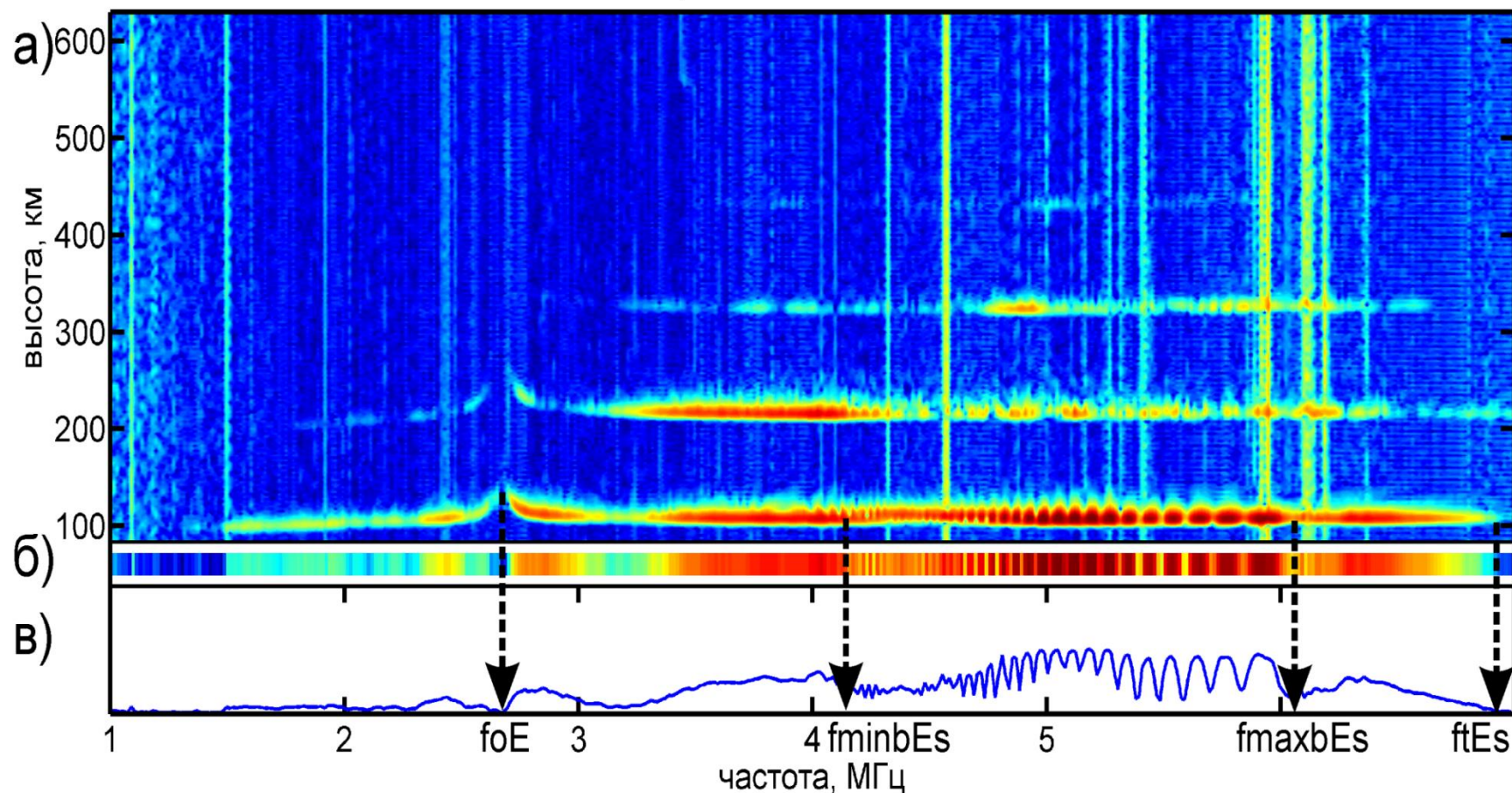


Слайд, объединяющий как автоматическую обработку, так и биения на следах Es

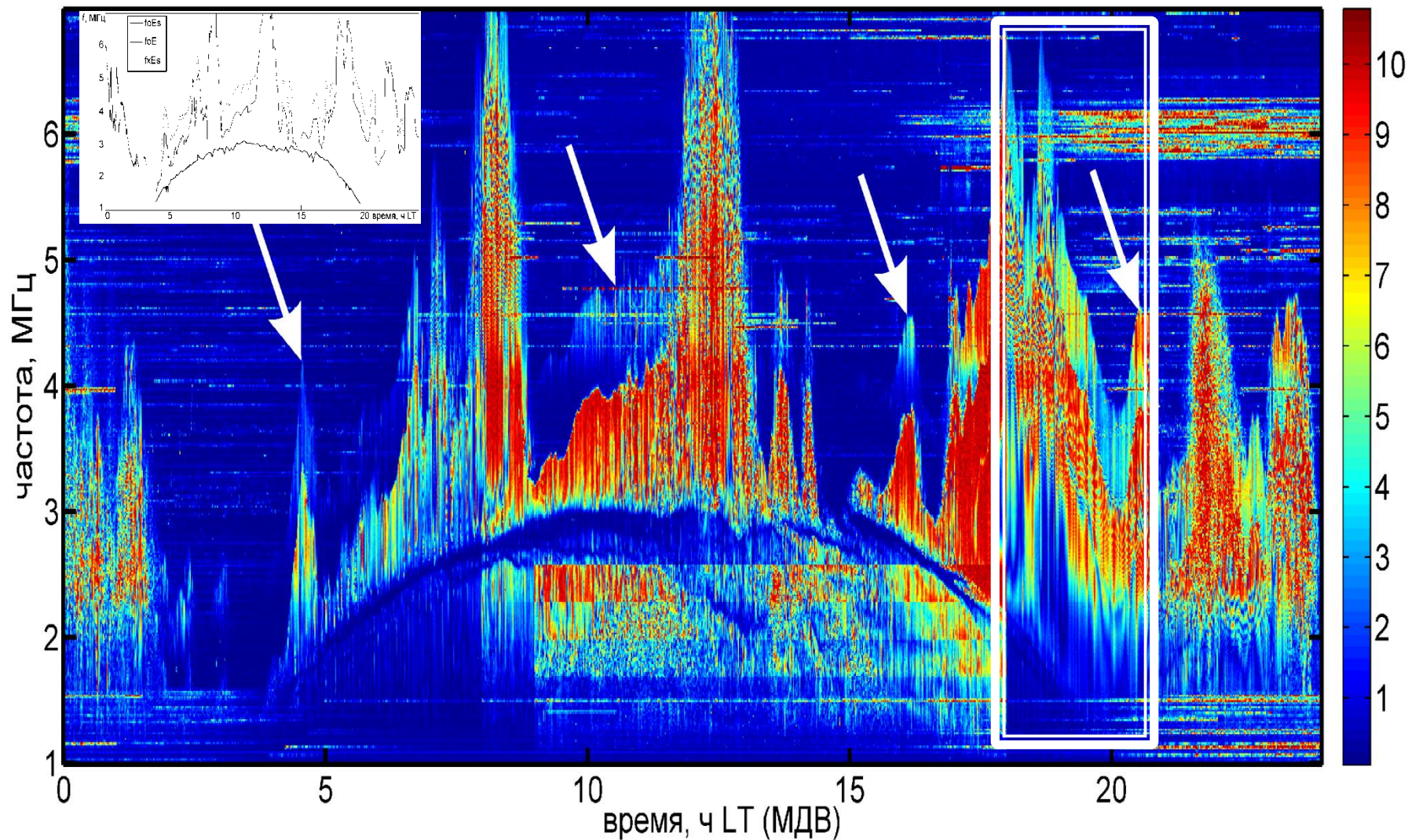


Пример ионограммы с биениями АЧХ слоя Es

ионограмма 18-мая-2010 07:30:00

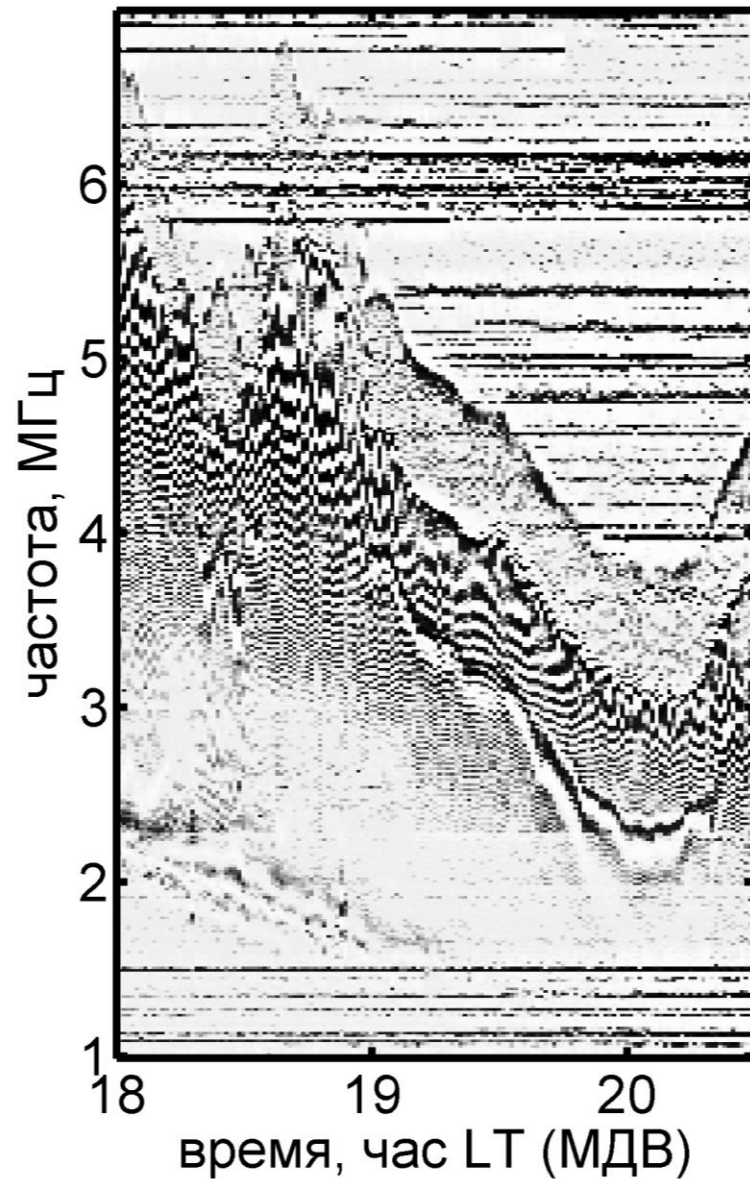
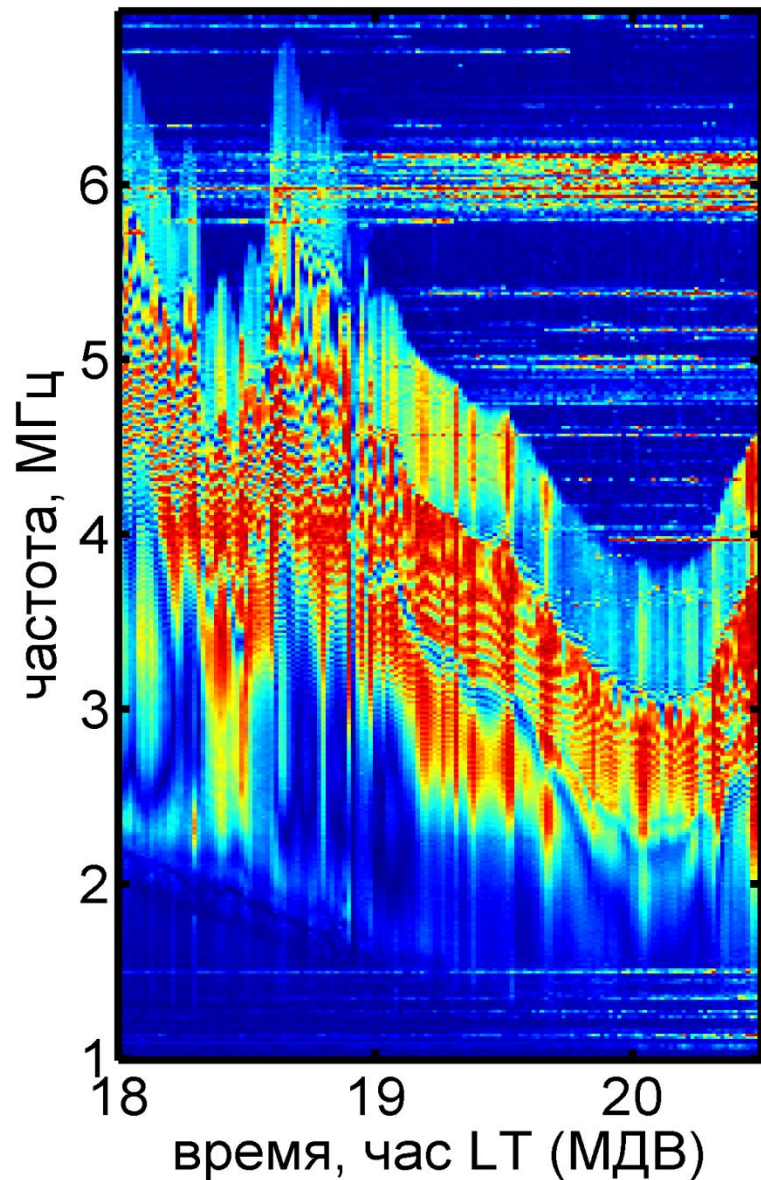


3D представление последовательности АЧХ

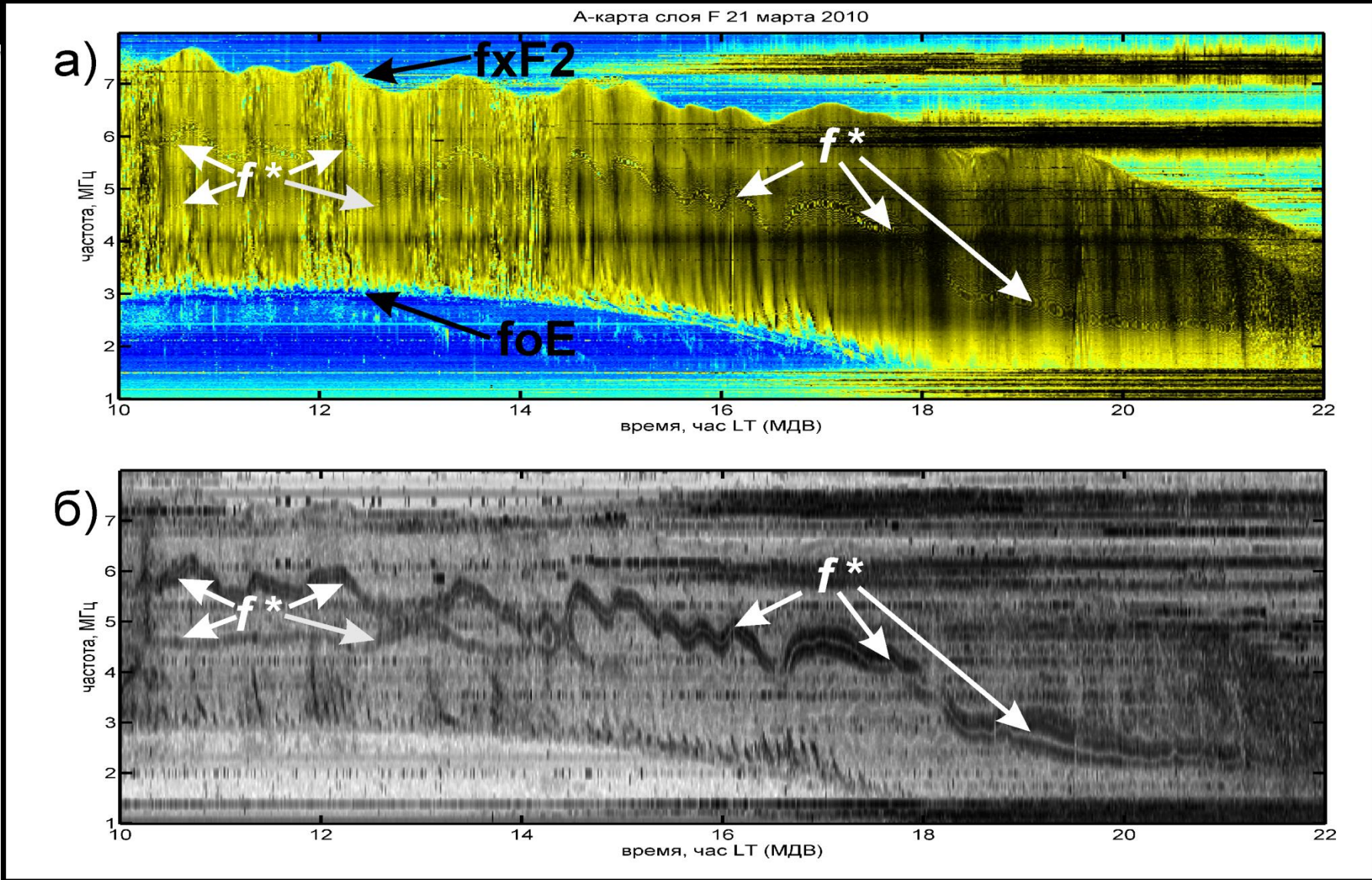


X-отражения отмечены стрелками

Фильтрация А-карты

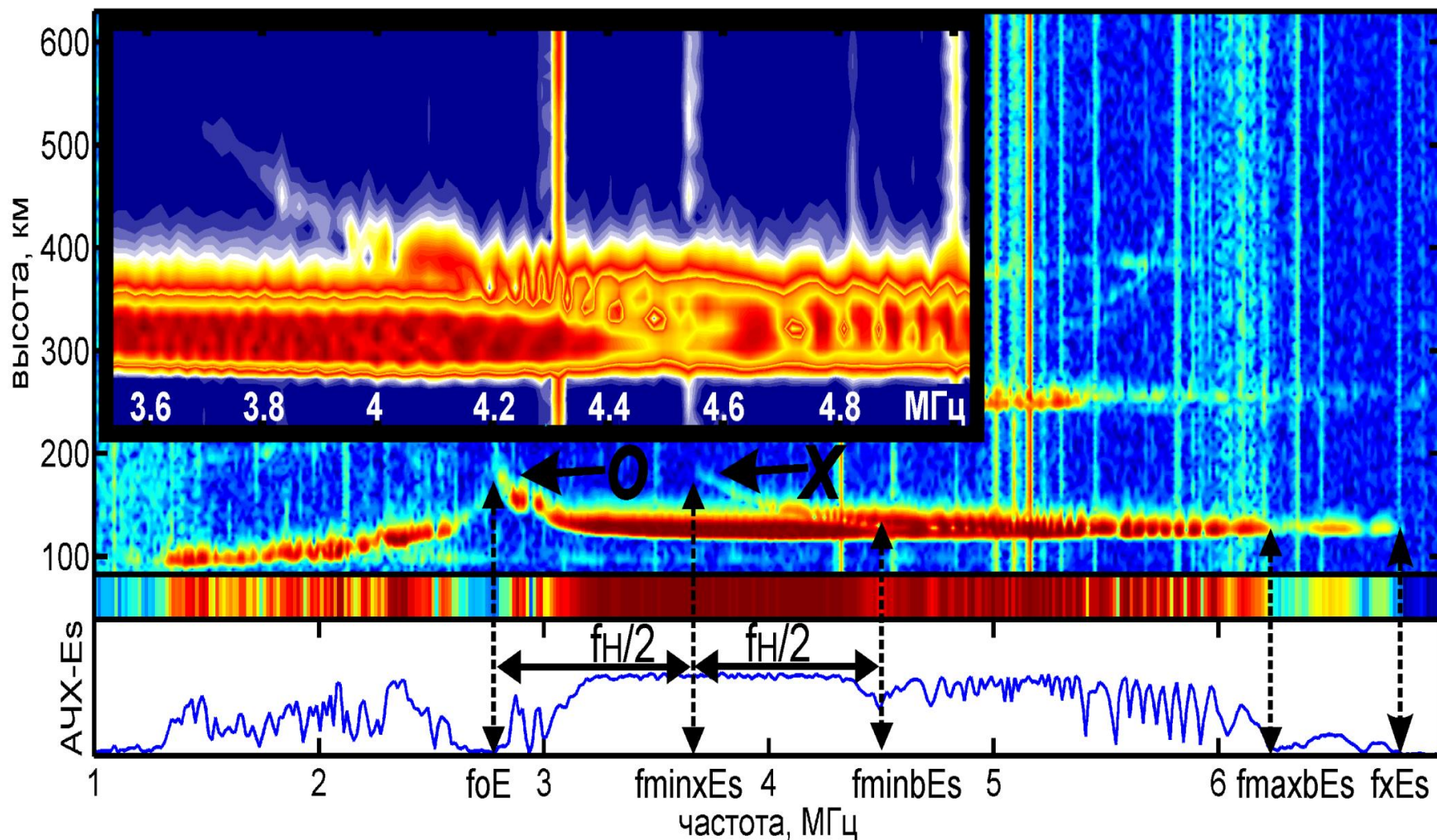


Пример A-карты слоя F и выделения вариаций точки нулевых биений



Пример ионограммы, содержащей как биения АЧХ, так и рожек х-следа слоя Es типа с.

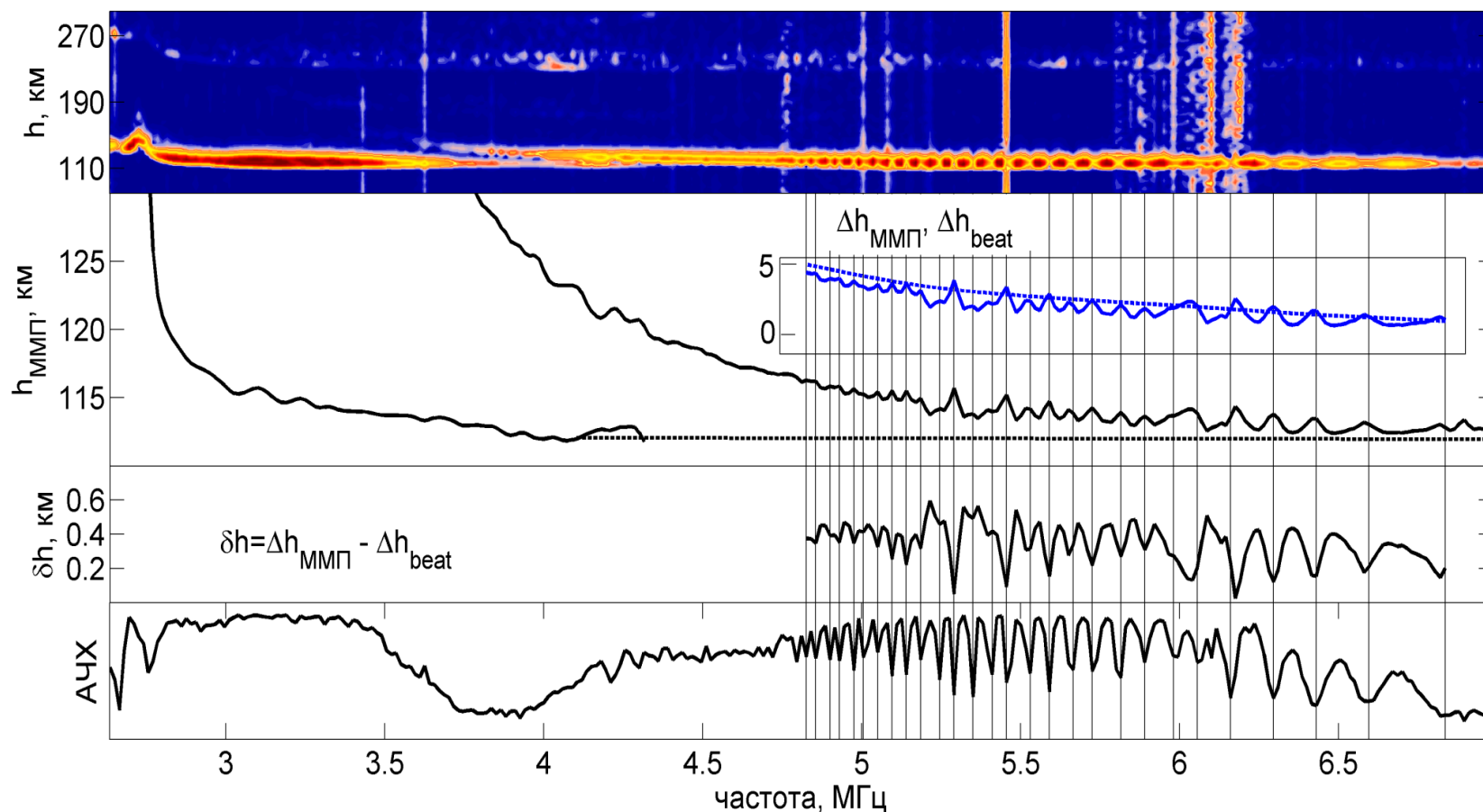
ionogram 08-Jun-2010 16:12:00



Исследование действующей высоты отражения следов Es с биениями

$$\Delta h_{beat} = \frac{c}{2 \cdot \Delta(f)}$$

Ионограмма 8 June 2010 17:00

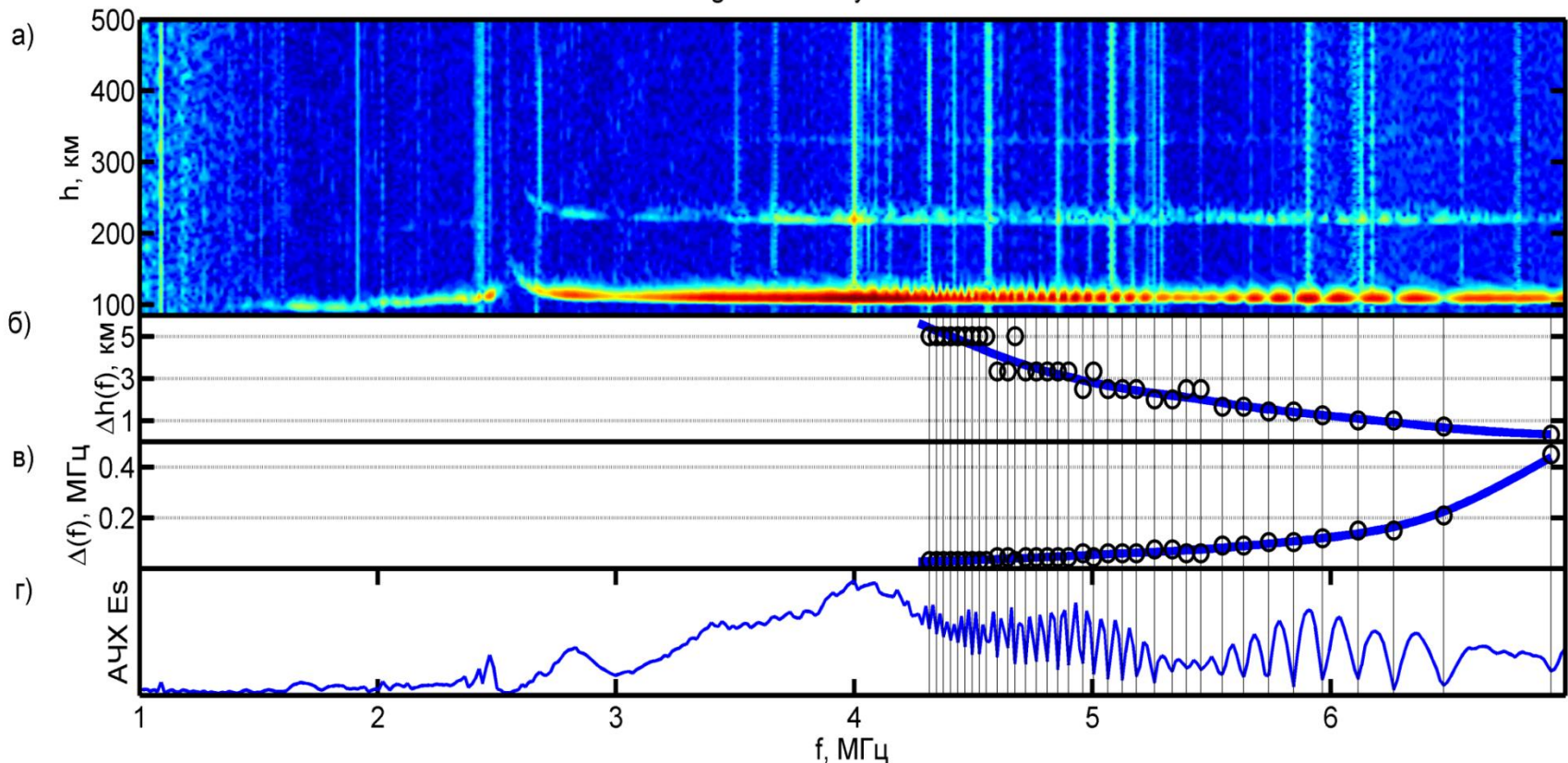


Определение параметров профиля электронной концентрации ниже максимума E слоя в присутствии слоя Es

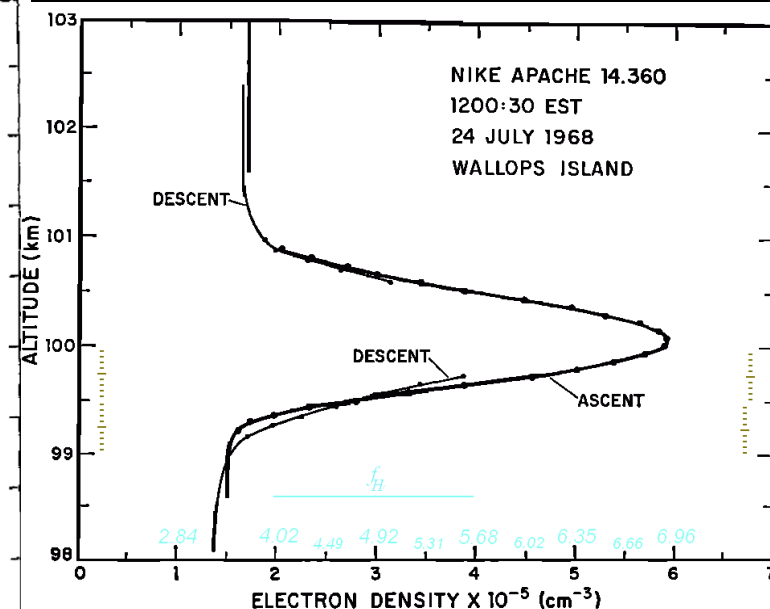
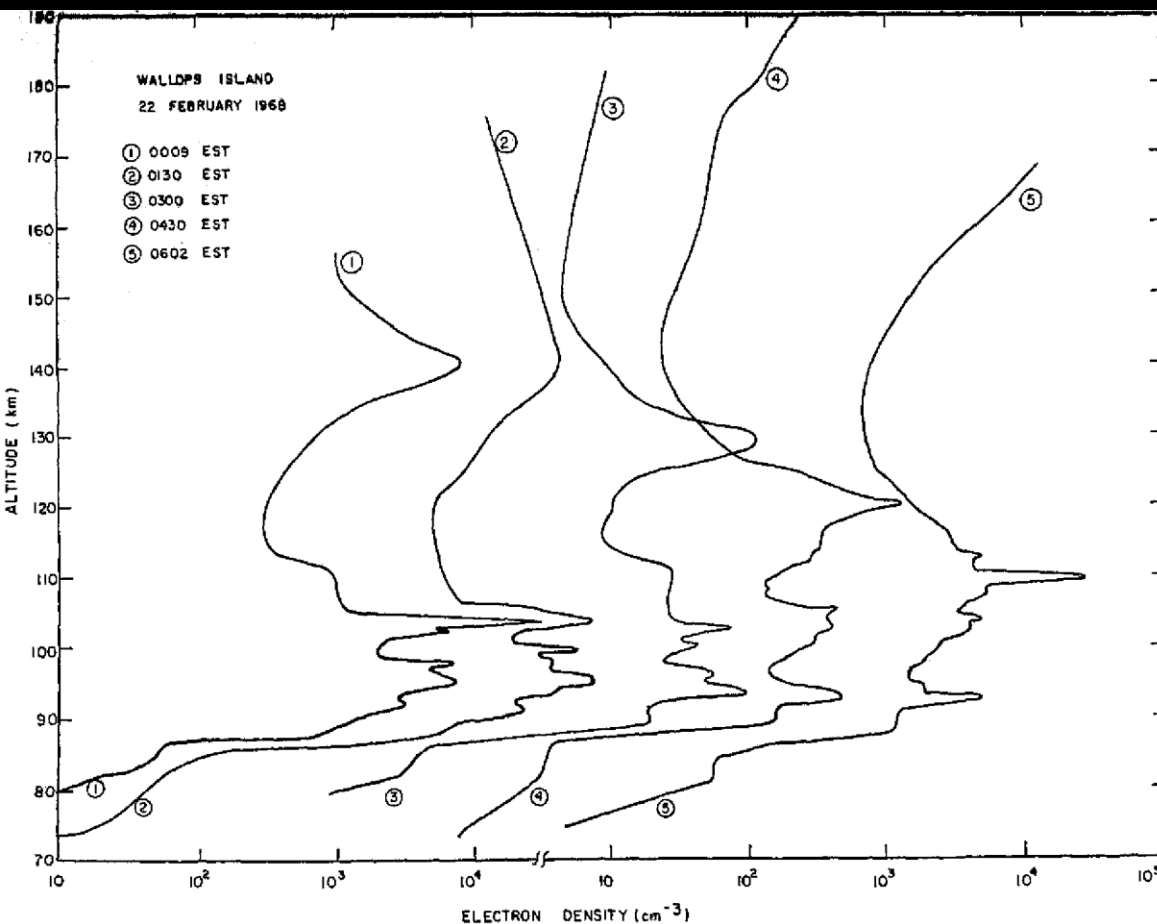
$$N_e(h) = N_{emE} \cdot e^{-D_1 \cdot (h_{mE} - h)^K}, \quad [\text{IRI} - 90]$$

$$N_{emE} = 1,24 \cdot 10^{10} \cdot f_o E^2, \quad K = \frac{-DN \cdot (h_{mE} - h_{DX})}{N_{DX} \cdot \ln\left(\frac{N_{DX}}{N_{emE}}\right)}, \quad D_1 = \frac{DN}{N_{DX} \cdot K \cdot (h_{mE} - h_{DX})^{K-1}}.$$

ionogram 31-May-2010 07:09:00



Профили, содержащие Es-слои



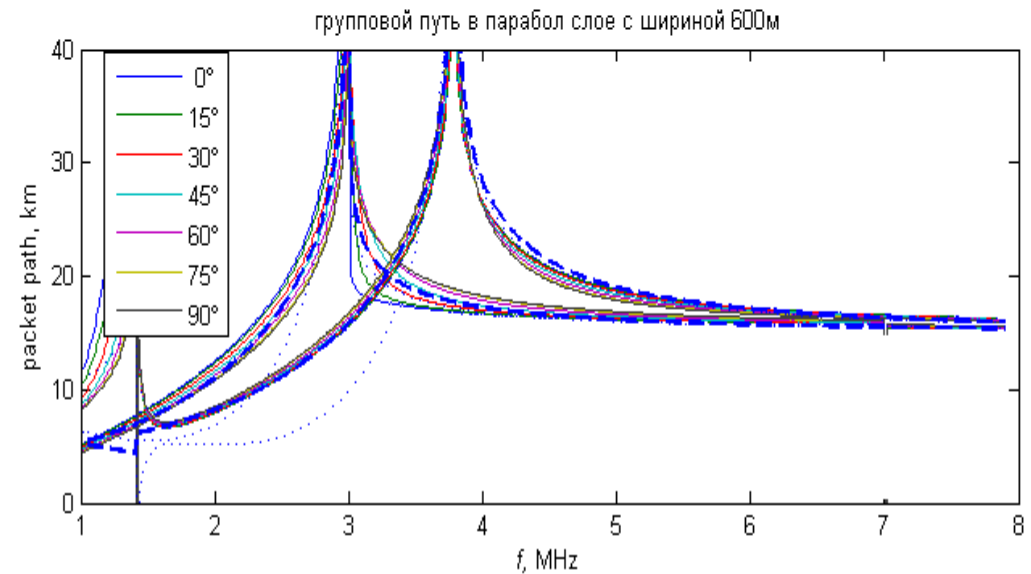
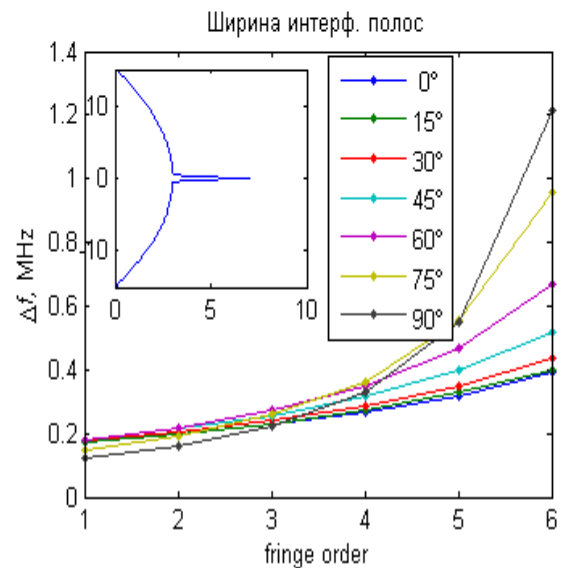
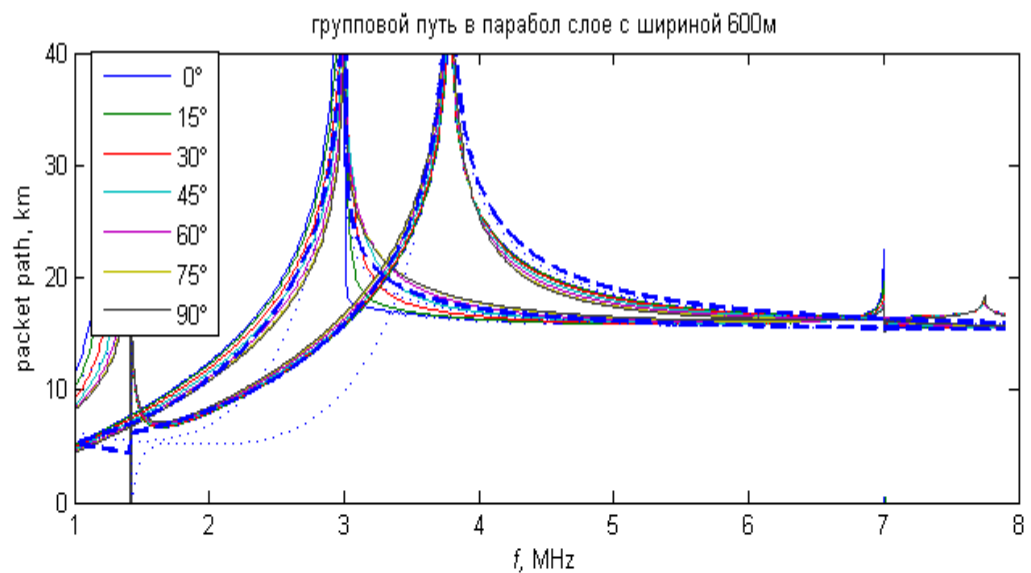
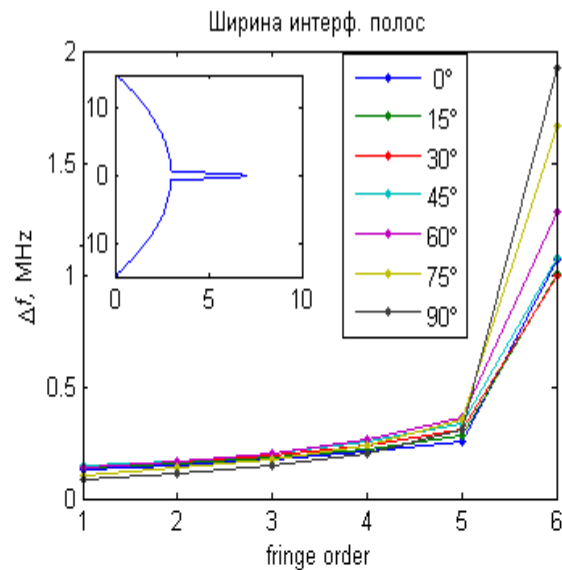
градиент

$$5 \times 10^5 / 0.5 = 10 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}/\text{km}$$

$$= 3 / 0.5 = 6 \text{ МГц/км} = 3.6 f_H/\text{km}$$

Smith L. G. A sequence of rocket observations of night-time sporadic-E // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1970, Vol. 32, pp. 1247-1257

Моделирование профиля электронной концентрации слоя Es



Фазовый и групповой пути в параболическом слое (без геомагнитного поля – верхние формулы)

$$\phi_o = \omega \frac{z_m}{c} \left(1 - \frac{\omega_{Nm}^2 - \omega^2}{2\omega_{Nm}\omega} \ln \left(\frac{\omega + \omega_{Nm}}{\omega - \omega_{Nm}} \right) \right) = \frac{z_m}{c} \left(\omega - \frac{\omega_{Nm}^2 - \omega^2}{2\omega_{Nm}} \ln \left(\frac{\omega + \omega_{Nm}}{\omega - \omega_{Nm}} \right) \right)$$

$$\frac{d\phi_{goptics}}{dk} = L_{goptics} = z_m \frac{\omega}{\omega_{Nm}} \ln \left(\frac{\omega_{Nm} + \omega}{\omega_{Nm} - \omega} \right)$$

- Rydbeck O. On the propagation of radio waves. Trans. Chalmers Univ. Sweden. 1944. N 34. 170p.,
- Budden K.G. Radio Waves in the Ionosphere, 1961, (1985)
- Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 684с.

$$\phi_{goptics}^{zx} = \frac{z_m}{c} \omega \left(1 + \frac{1}{2} \left(\xi - \frac{1}{\xi} \right) \ln \left| \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right| \right)$$

$$\xi = \frac{\sqrt{\omega(\omega \pm \omega_H)}}{\omega_{Nm}} = \sqrt{\frac{\omega(\omega \pm \omega_H)}{\omega_{Nm}^2}}$$

$$\frac{d\phi_{goptics}^{zx}}{dk} = L_{goptics}^{zx} = z_m \left(\xi \mp \frac{Y}{4(1 \pm Y)} \left(\xi + \frac{1}{\xi} \right) \right) \ln \left| \frac{1 + \xi}{1 - \xi} \right| \pm \frac{z_m Y}{2(1 \pm Y)}$$

Без поля $\omega_H = 0$

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_{Nm}}$$

Для подгонки экспериментальных данных к результатам
моделирования «классические» формулы модифицировались,
«играя порядками»

Фазовый путь

$$\phi_{goptics} = \omega \frac{z_m}{c} \left(1 - \frac{\omega_{Nm}^2 - \omega^2}{2\omega_{Nm}\omega} \ln \left(\frac{\omega_{Nm} + \omega}{\omega_{Nm} - \omega} \right) \right) = \frac{z_m}{c} \left(\omega - \frac{\omega_{Nm}^2 - \omega^2}{2\omega_{Nm}} \ln \left(\frac{\omega_{Nm} + \omega}{\omega_{Nm} - \omega} \right) \right)$$

$$\phi_{goptics2} = \omega \frac{z_m}{c} \left(1 - \frac{\omega_{Nm}^3 - \omega^3}{2\omega_{Nm}^2\omega} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^2 + \omega^2}{\omega_{Nm}^2 - \omega^2} \right) \right) = \frac{z_m}{c} \left(\omega - \frac{\omega_{Nm}^3 - \omega^3}{2\omega_{Nm}^2} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^2 + \omega^2}{\omega_{Nm}^2 - \omega^2} \right) \right)$$

$$\phi_{goptics3} = \omega \frac{z_m}{c} \left(1 - \frac{\omega_{Nm}^4 - \omega^4}{2\omega_{Nm}^3\omega} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^3 + \omega^3}{\omega_{Nm}^3 - \omega^3} \right) \right) = \frac{z_m}{c} \left(\omega - \frac{\omega_{Nm}^4 - \omega^4}{2\omega_{Nm}^3} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^3 + \omega^3}{\omega_{Nm}^3 - \omega^3} \right) \right)$$

Для подгонки экспериментальных данных к результатам моделирования «классические» формулы модифицировались, «играя порядками».

Групповая высота

$$\frac{d\phi_{goptics2}}{dk} = L_{goptics2} = z_m \left(\frac{3}{2} \frac{\omega^2}{\omega_{Nm}^2} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^2 + \omega^2}{\omega_{Nm}^2 - \omega^2} \right) - 2\omega \frac{\omega_{Nm}^3 - \omega^3}{\omega_{Nm}^4 - \omega^4} + 1 \right)$$

$$\frac{d\phi_{goptics3}}{dk} = L_{goptics3} = z_m \left(\frac{4}{2} \frac{\omega^3}{\omega_{Nm}^3} \ln \left(\frac{\omega_{Nm}^3 + \omega^3}{\omega_{Nm}^3 - \omega^3} \right) - 3\omega^2 \frac{\omega_{Nm}^4 - \omega^4}{\omega_{Nm}^6 - \omega^6} + 1 \right)$$

$$\frac{d\phi_{goptics4}}{dk} = L_{goptics4} = z_m \left(\frac{5}{2} \frac{\omega^4}{\omega_{Nm}^4} \ln \left(\frac{\omega_c^4 + \omega^4}{\omega_{Nm}^4 - \omega^4} \right) - 4\omega^3 \frac{\omega_{Nm}^5 - \omega^5}{\omega_{Nm}^8 - \omega^8} + 1 \right)$$

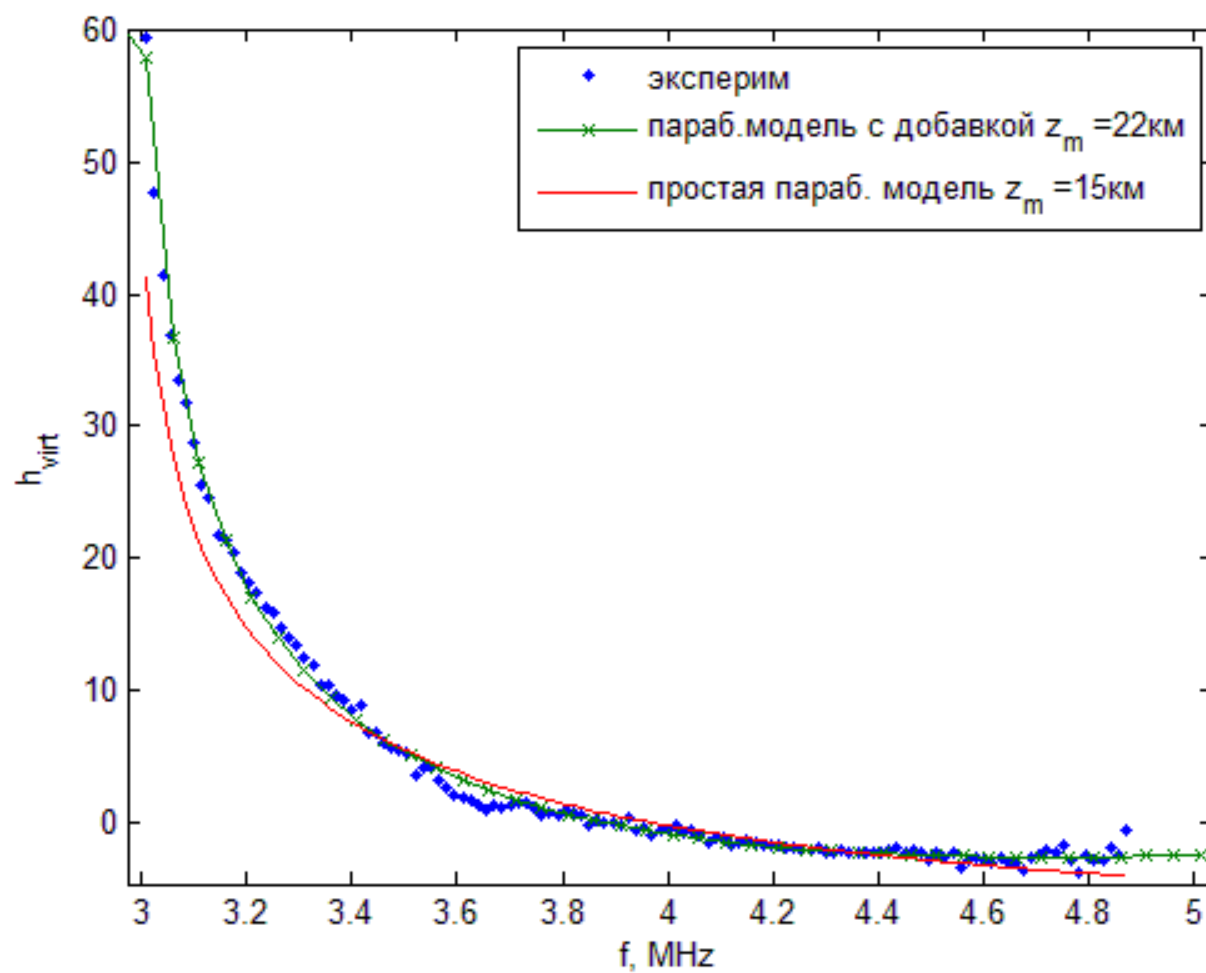
$$\frac{d\phi_{goptics}}{dk} = L_{goptics} = z_m \frac{\omega}{\omega_{Nm}} \ln \left(\frac{\omega_{Nm} + \omega}{\omega_{Nm} - \omega} \right) - \alpha |\omega_{Nm} - \omega|$$

CKO=0.65 км

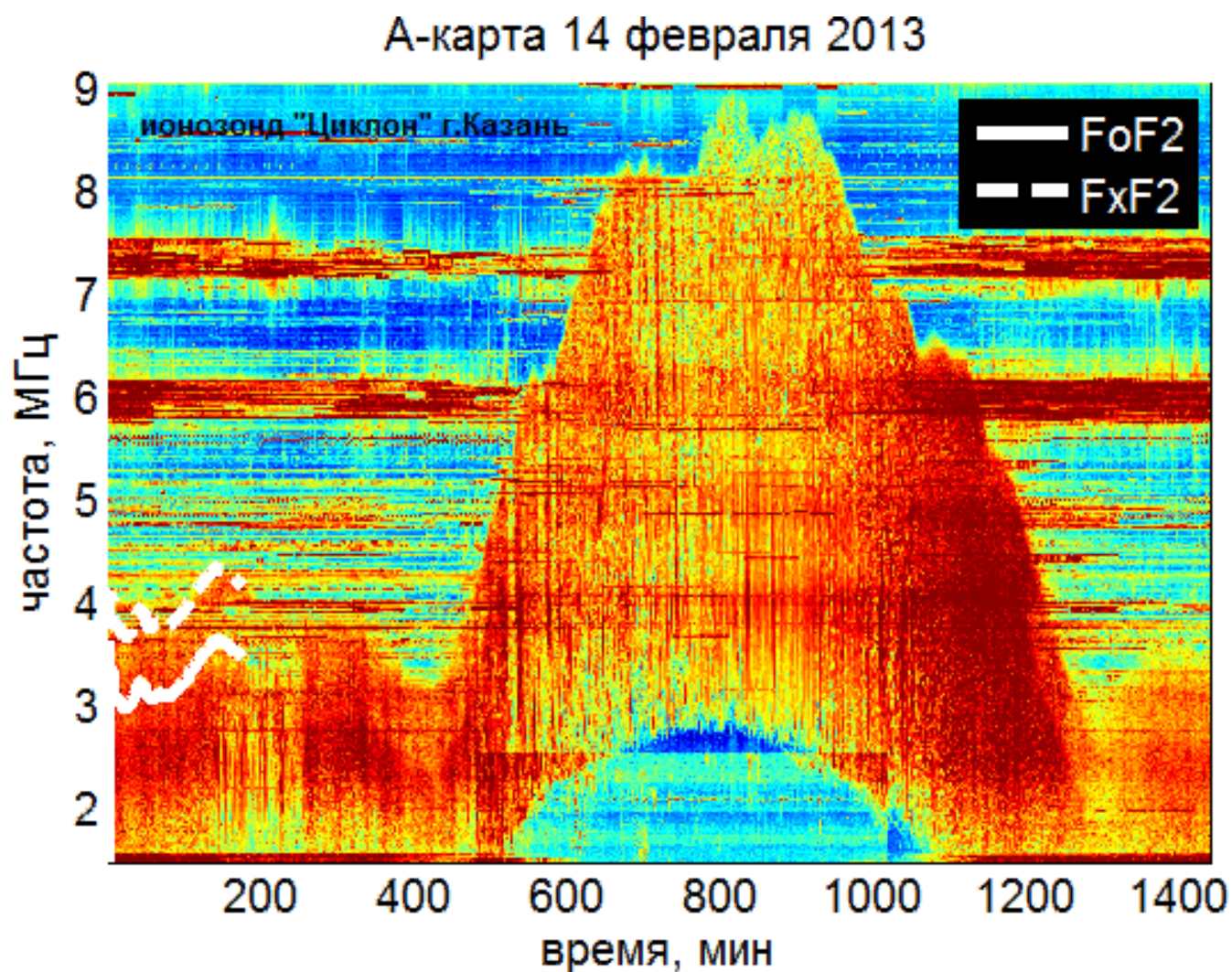
$z_m = 22.2 \pm 0.9$ км

$\alpha = 4.6 \pm 0.5$ км/(Гц рад)

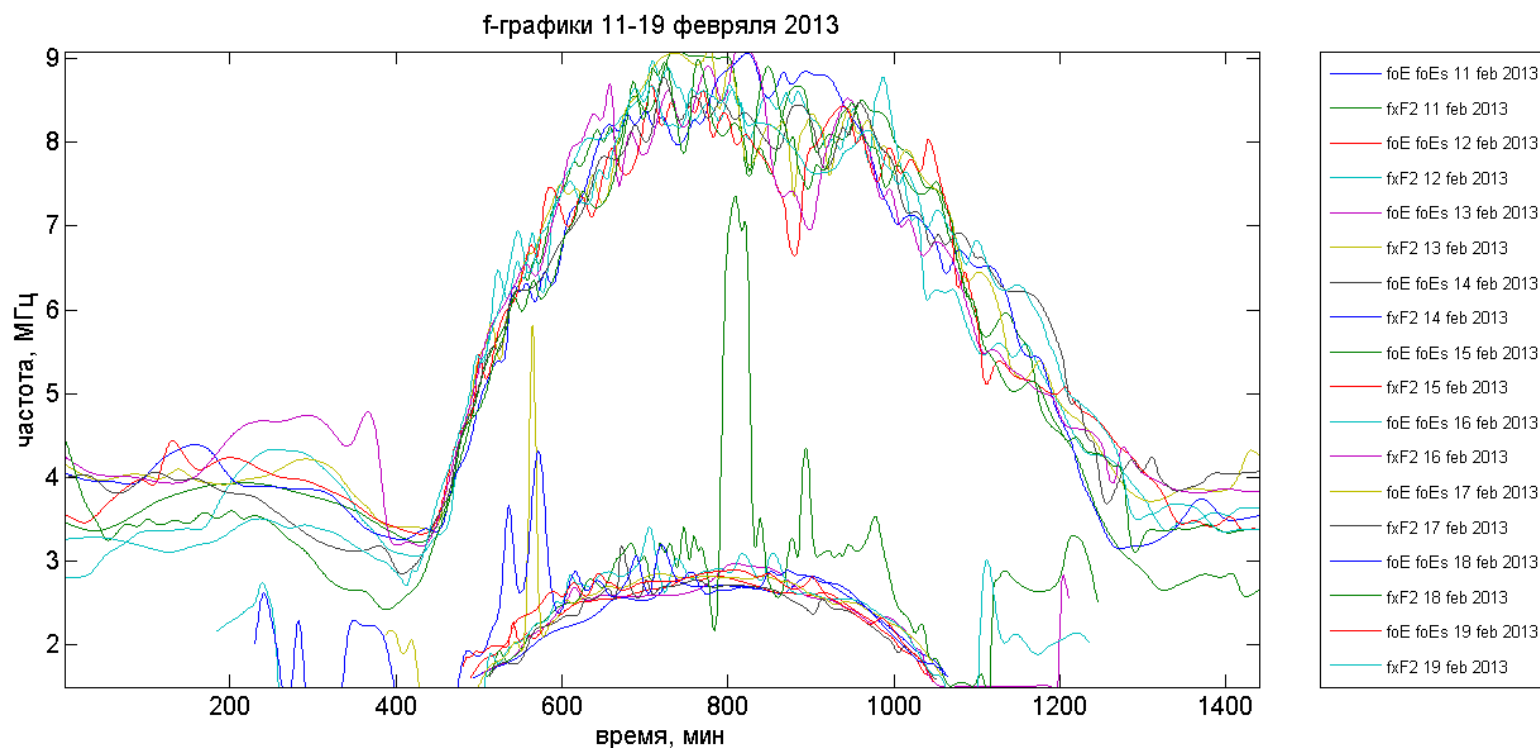
Групповой путь



А-карта и автоматическое определение по ней критической частоты слоя F

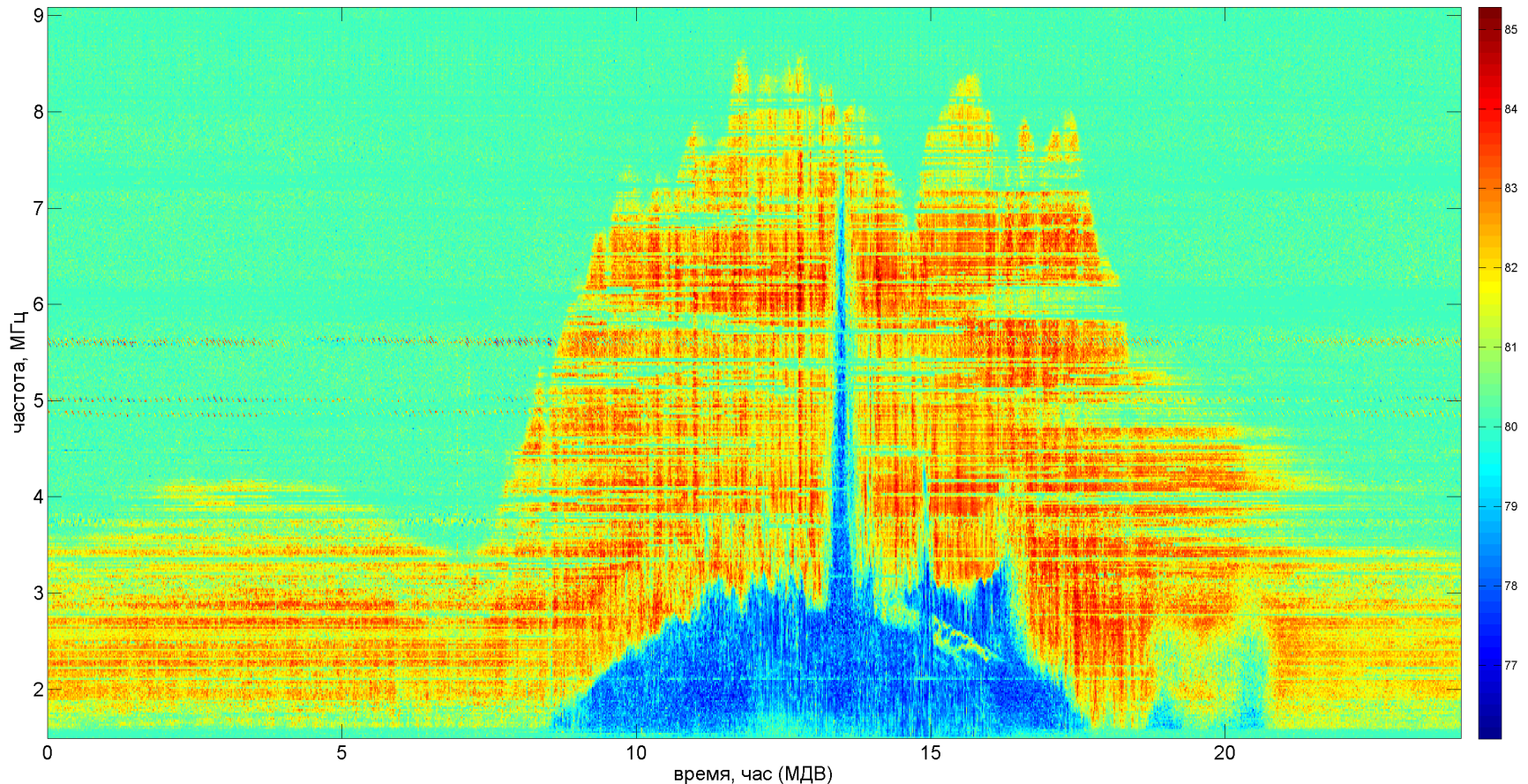


Сводка f-графиков слоев ионосферы за 9 дней февраля 2013г.



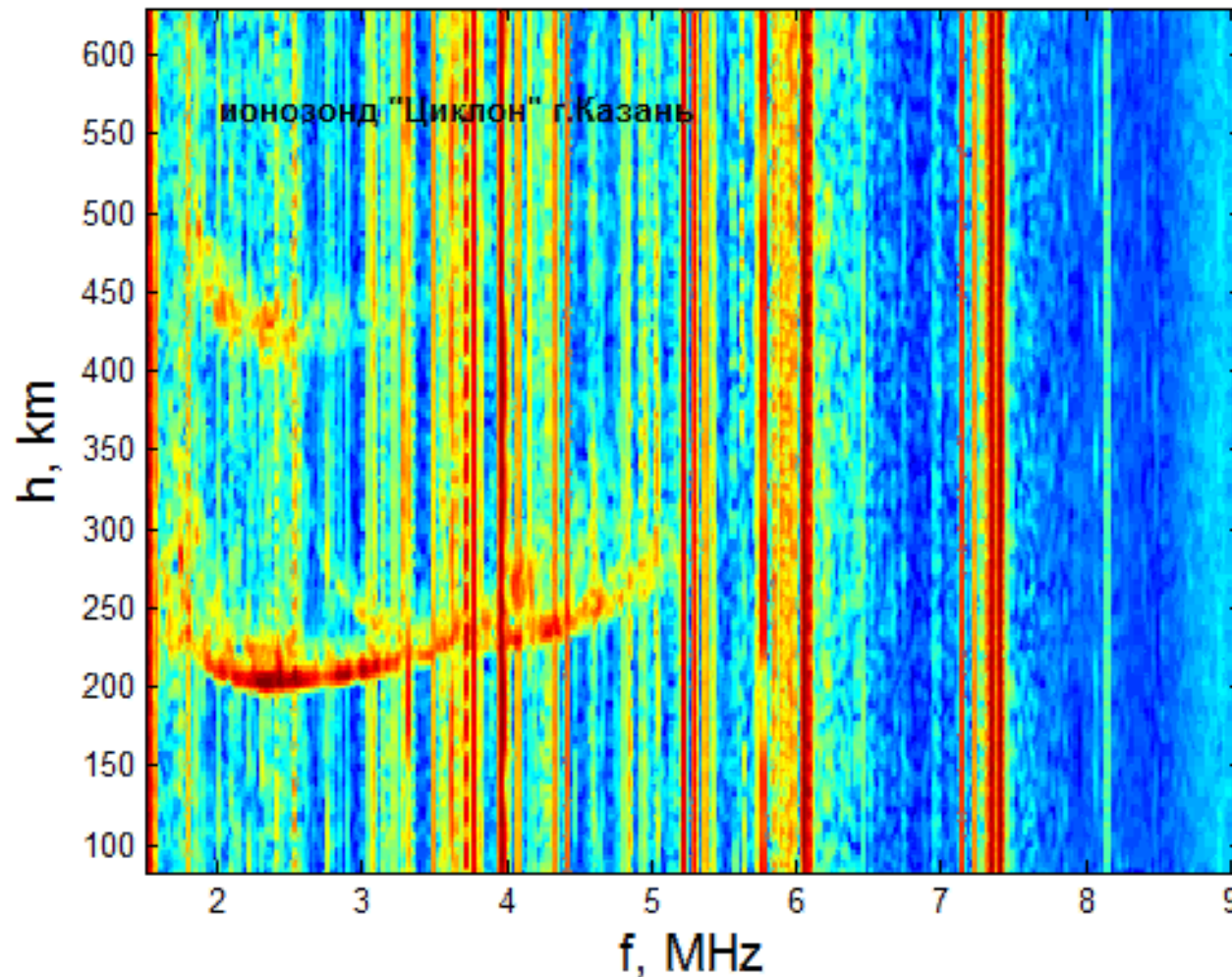
Пример представления A-карт F и E-Es слоев на одном рисунке путем наложения с разным цветом на примере дня вторжения Челябинского метеорита

A-карта-F - A-карта-Es 15-Feb-2013

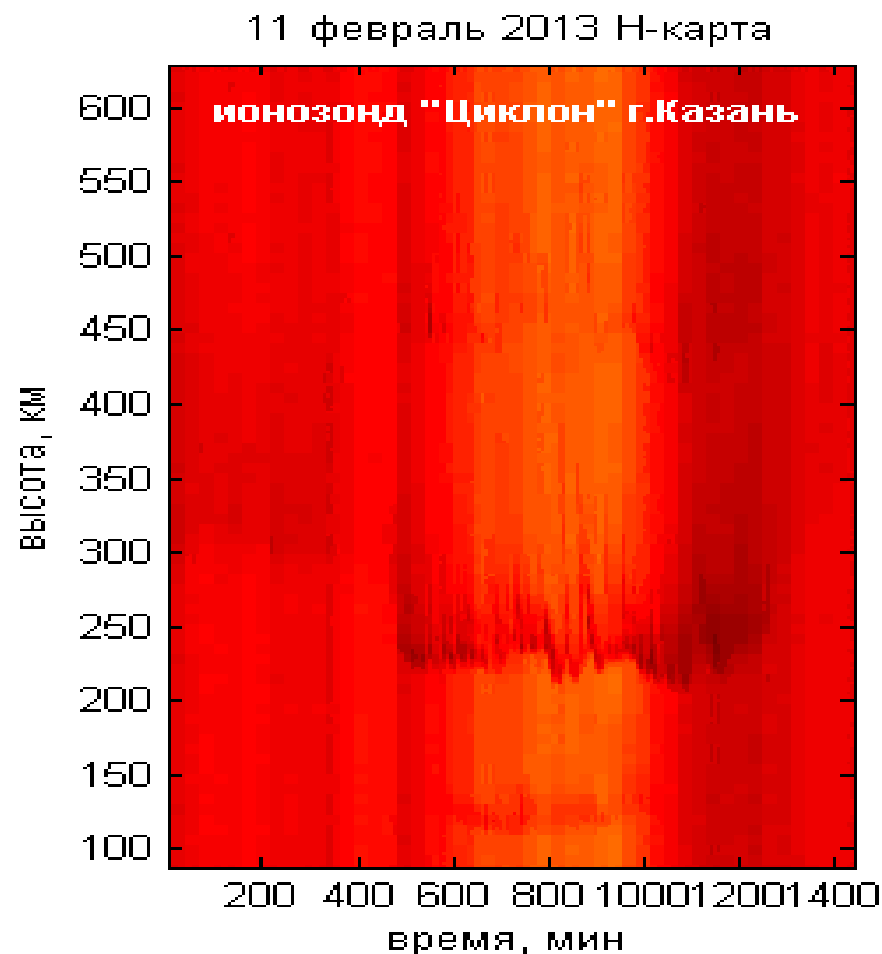
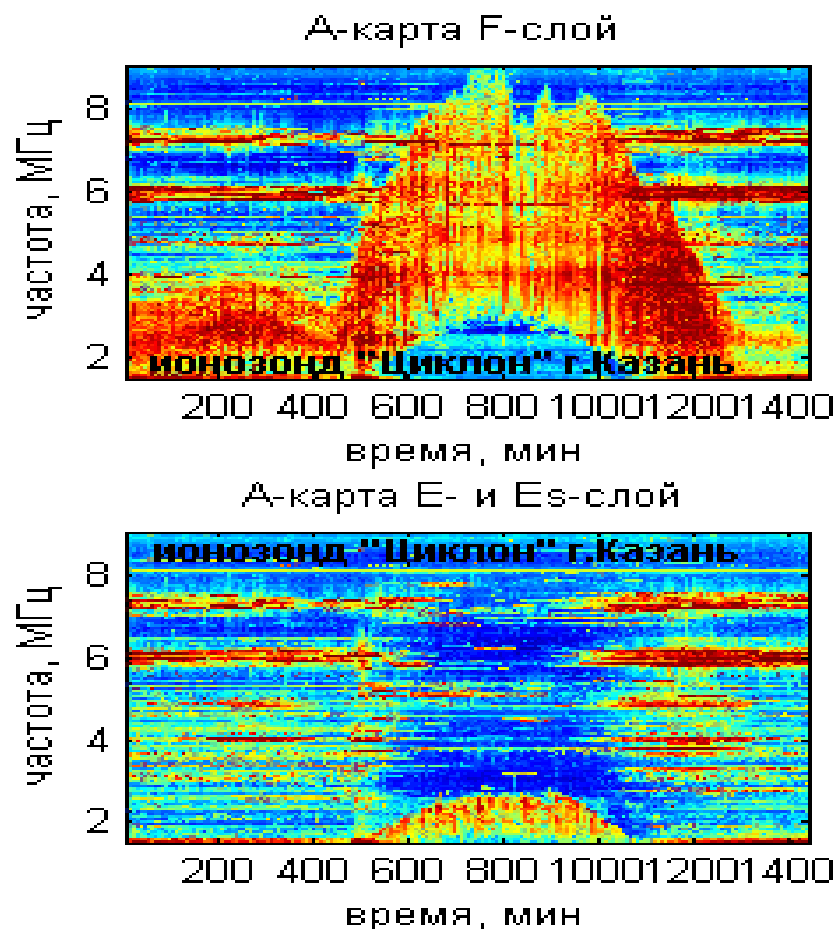


Появление ПИВ во время вторжения Челябинского метеорита

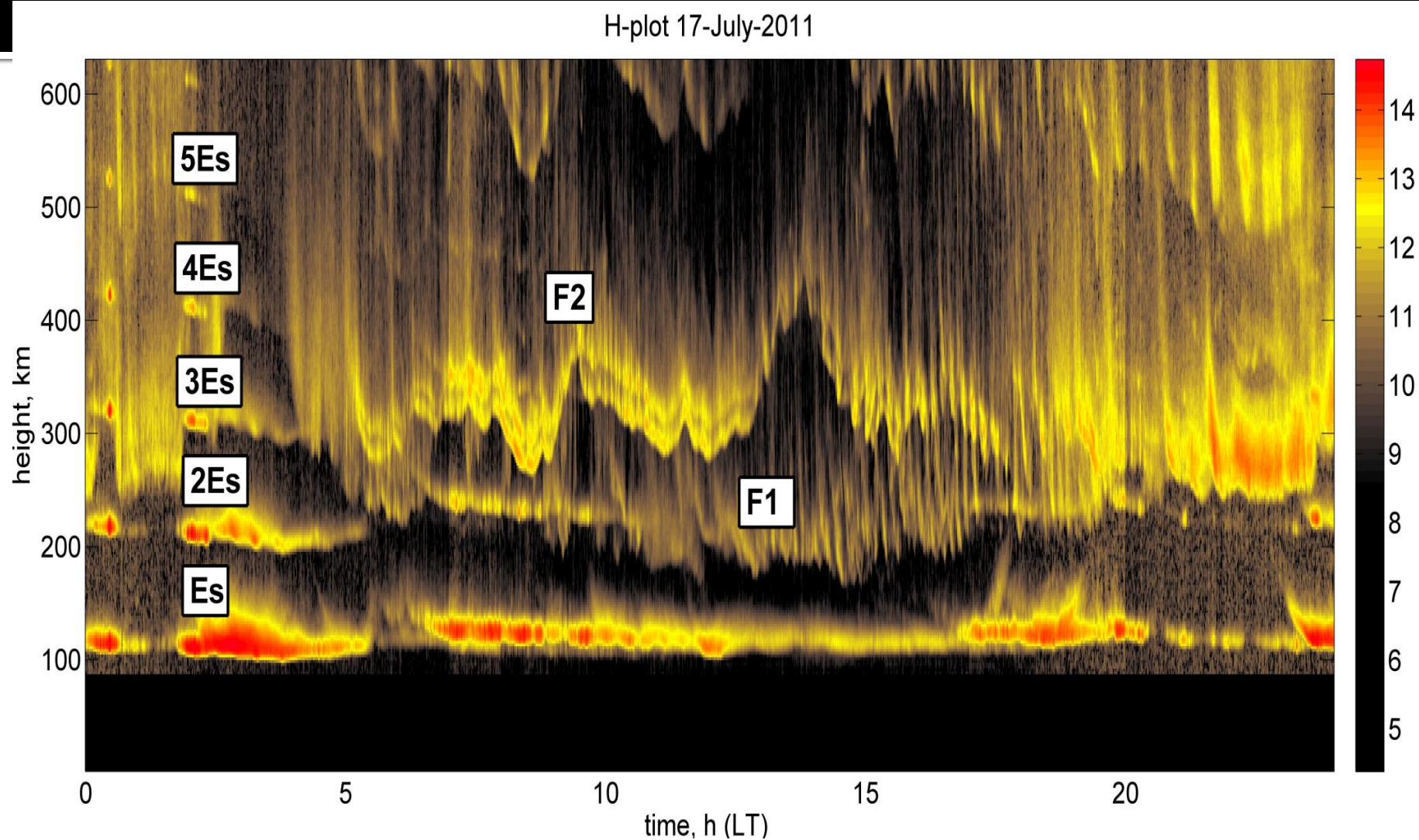
ionogram 15-Feb-2013 08:27:00

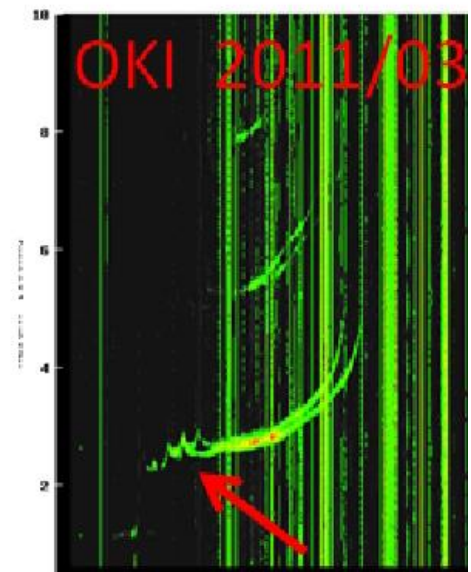
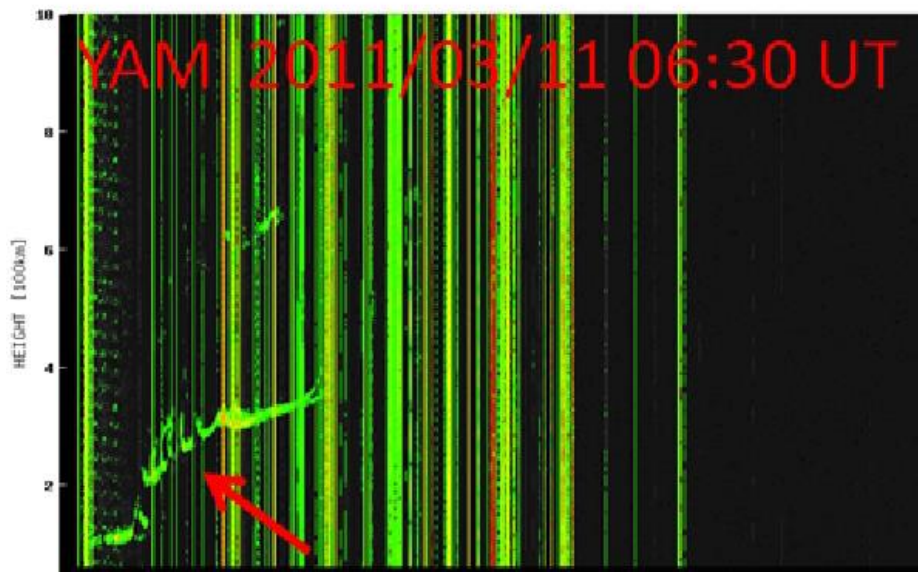
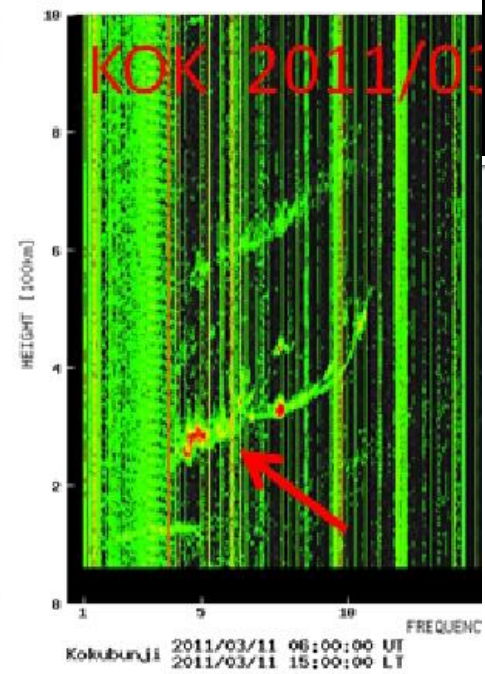
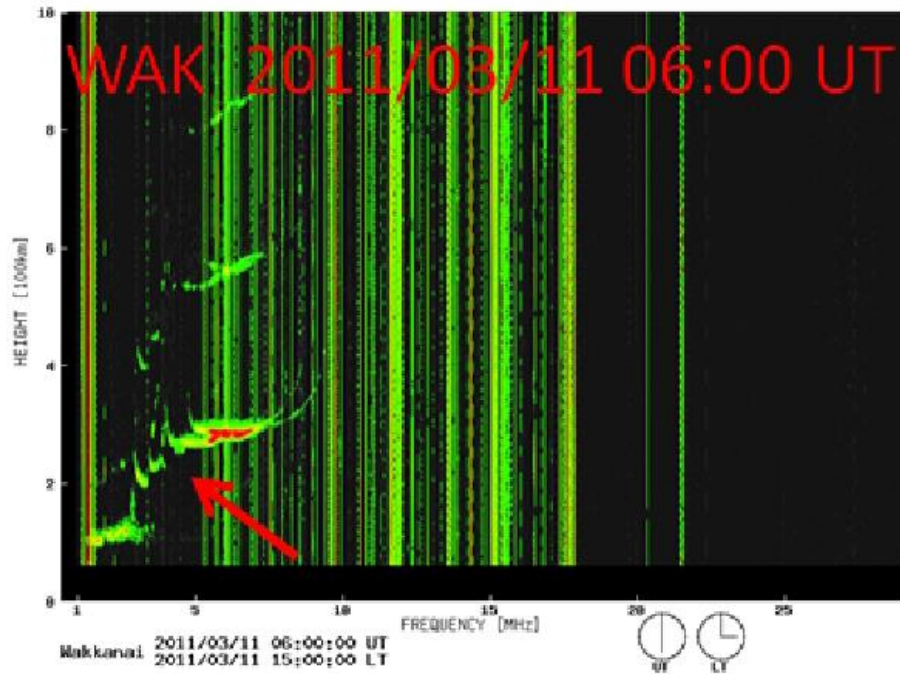


Пример потоковой постобработки суточного массива ионограмм с 1 минутным шагом регистрации



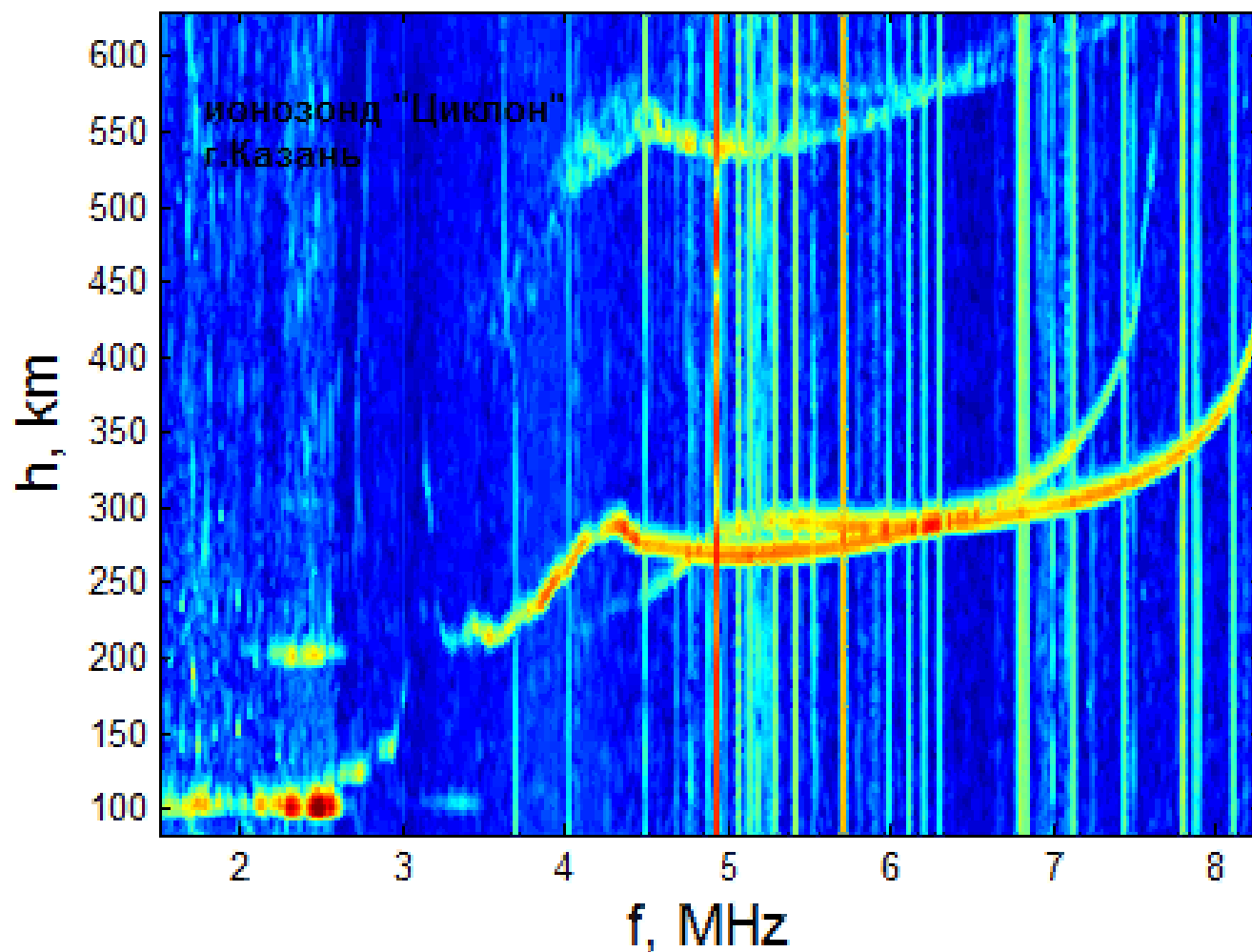
Пример H карты «богатого на события» дня





Отклик ионосферы на землетрясение в Суматре

ionogram 11-Apr-2012 15:21:00



Ежеминутная регистрация ионограмм позволяет выполнять следующие задачи

- Высотные вариации слоев на основе ММП в СО с высокой точностью
- Биения на следах слоев ионосферы (в первую очередь Es) для уточнения Ne(h)-профиля (в первую очередь для Es)
- Изучение АЧХ следов на участках следов критической частоты около максимума слоя
- Панорамный обзор суточных вариаций интенсивности отражений ионосферных слоев на основе массовой потоковой постобработки ионограмм без тщательной идентификации слоев
- Отклики ионосферы на сильные акустические и ударные волны (землетрясения, вторжение метеоритов)
- Исследование появляемости Z-компоненты
- Исследование минимальной частоты необыкновенной компоненты
- Искусственные неоднородности во время мощного КВ-нагрева
- Перемещение неоднородностей в виде «классических» ПИВ (в виде клювиков и серпиков) и амплитудных фокусировок следов
- Разнесенный прием (для изучения пространственных перемещений)
- Связь с гелиогеопараметрами минутных масштабов

Аппаратура

- ❑ Спроектирована и изготовлена новая системы управления ионозонда «Циклон».
- ❑ В феврале 2010 г. система вступила в работу в круглосуточном режиме со скоростью регистрации 1 ионограмма в минуту (1440 ионограмм в сутки).

Структурная схема ионозонда «Циклон»

