

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
ИОНОГРАММ ЗОНДИРОВАНИЯ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО ЛЧМ-ИОНОЗОНДА**

**С.Н. Пономарчук, В.П. Грозов, А.М. Киселев, Г.В. Котович, С.Я. Михайлов
ИСЗФ СО РАН, 664033, Иркутск, а/я 291, Россия**

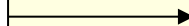
Постановка задачи

Оперативность поступления данных о текущей диагностической информации имеет принципиальное значение, поскольку *это существенно облегчает организацию геофизических и радиофизических* экспериментов по исследованию ионосферы. Осуществление диагностики ионосферного канала предполагает обработку текущих данных, получаемых в виде ионограмм вертикального (ВЗ) и наклонного зондирования (НЗ). Получаемый при этом большой объём данных и характер решаемых задач выдвигает вопросы автоматизации обработки и анализа ионограмм.

Задачи вторичной обработки

1. Предобработка ионограмм для удаления шума из изображения.
2. Сжатие данных, позволяющее провести сокращение их объема без существенной потери полезной информации, и выделение моментов прихода сигнала.
3. Интерпретация ионограмм.

**Предобработка:
Фильтрация**



**Сжатие данных:
Клеточный
автомат**

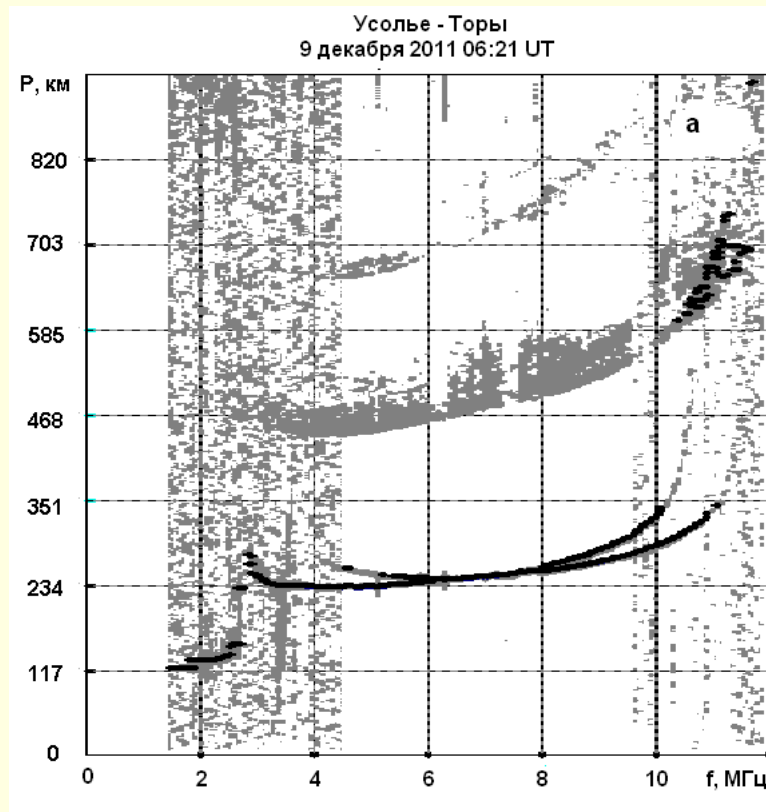
Обработка данных

Предобработка ионограмм заключается в ее очистке от шумовых составляющих с целью выделения полезного сигнала на фоне фонового шума и помех, а также удаления одиночных выбросов, которые имеют интенсивность, сравнимую с полезным сигналом, и могут приводить к сбоям в работе алгоритмов определения параметров ионосферы. *Используется медианный фильтр.*

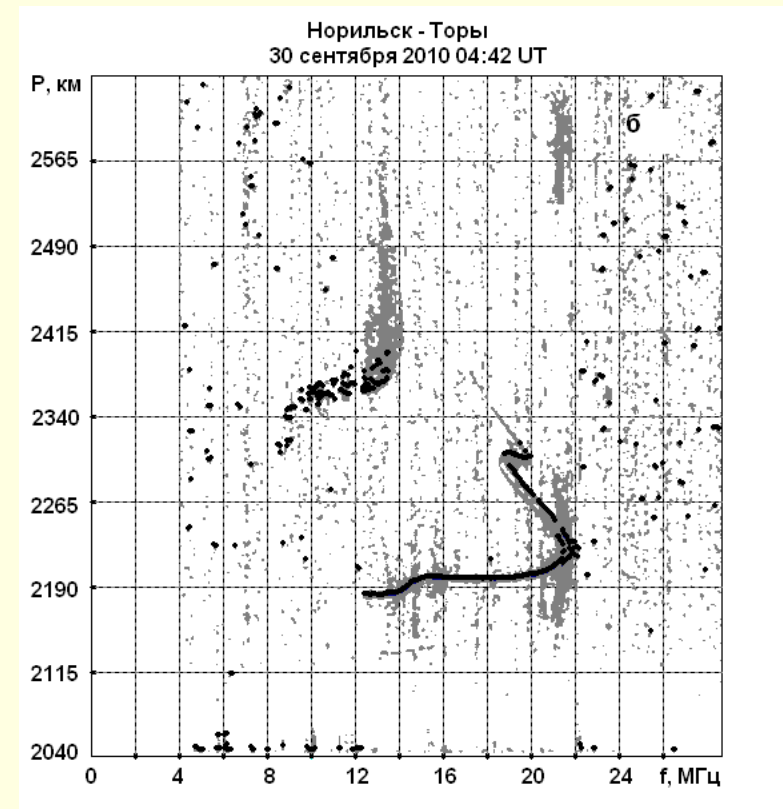
Сжатие данных позволяет выделить максимальные амплитуды, соответствующие физически значимым величинам (моментам прихода сигнала). *Реализован вариант клеточного автомата.*

Клеточные автоматы - это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяются локальными взаимными связями элементов этих систем.

Результаты выделения точек со значимой амплитудой



Ионограмма ВЗ



Ионограмма НЗ

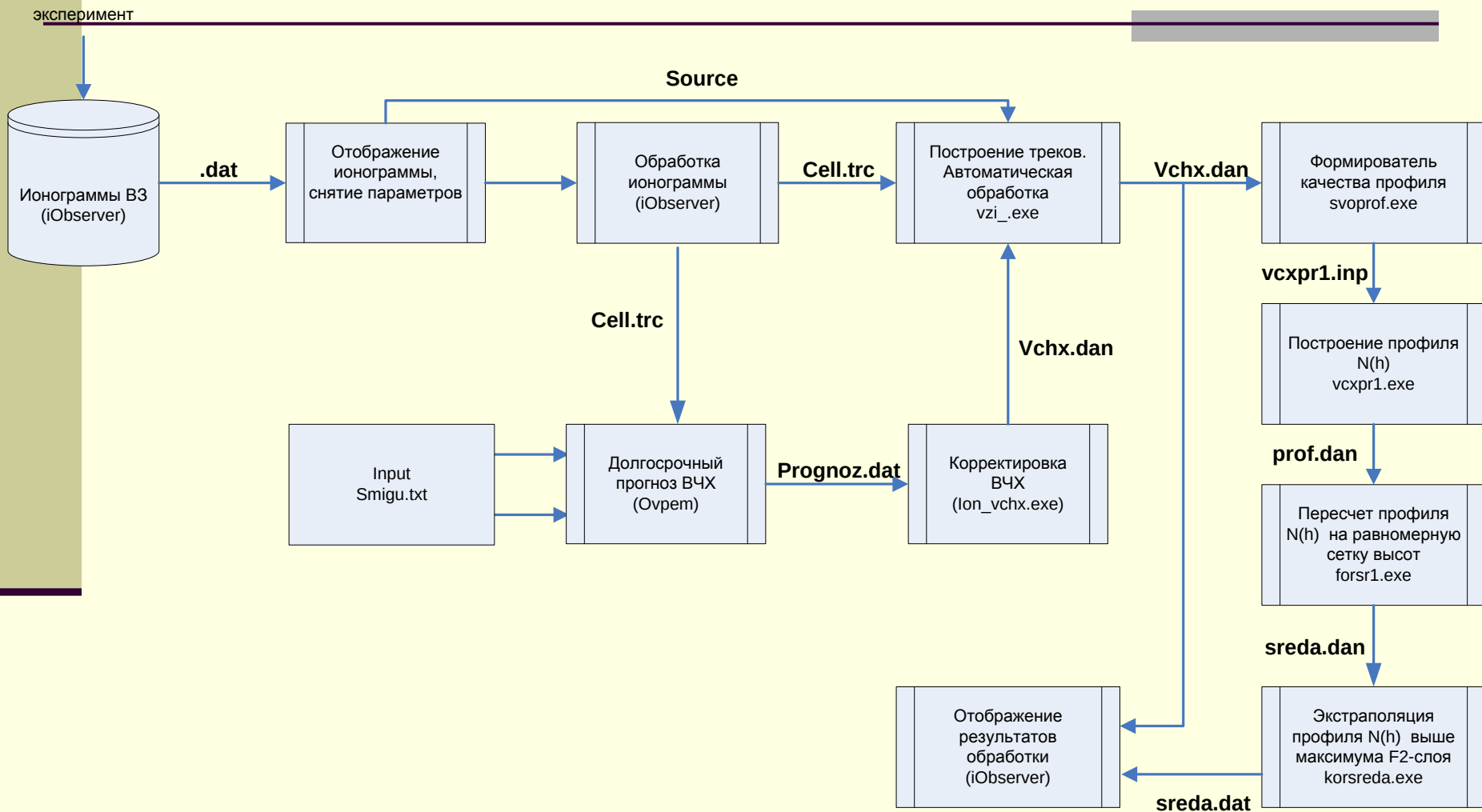
Алгоритм интерпретации ионограмм ВЗ

Методика интерпретации ионограмм ВЗ основана на использовании результатов моделирования высотно-частотной характеристики (ВЧХ) и результатов обработки экспериментальных ионограмм по амплитудному рельефу.

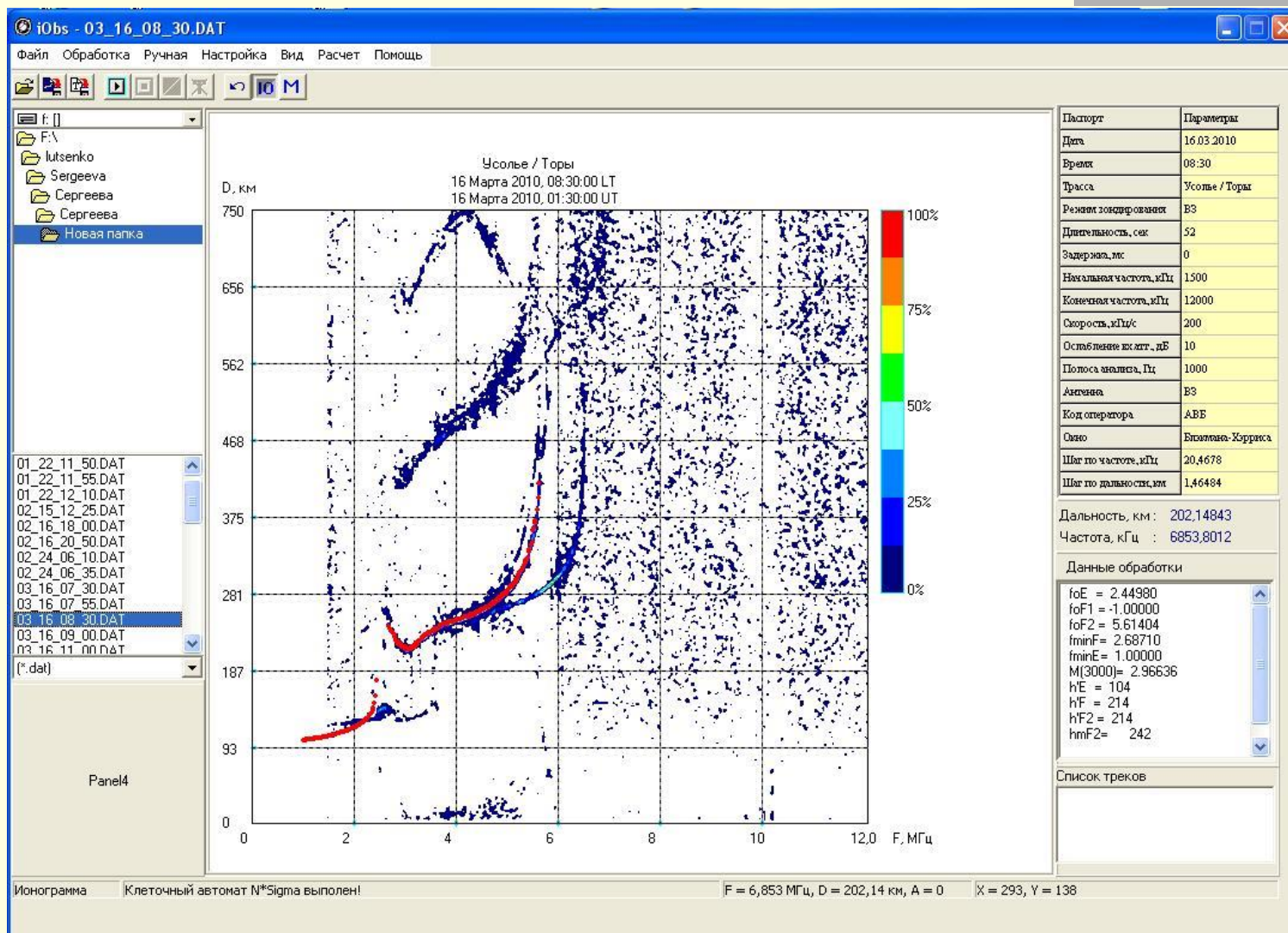
ВЧХ, представляющая собой зависимость действующей высоты отражения от частоты вертикального зондирования ионосферы, может быть рассчитана из модельного $N(h)$ профиля путем решения прямой задачи.

Рассчитанная ВЧХ накладывается на экспериментальную ионограмму в качестве модельной маски. Путем сканирования модельной маски по ионограмме, строится гистограмма совпадений модельных и реальных треков по точкам со значимой амплитудой сигналов, по которой проводится идентификация сигналов, отраженных от F и E – слоев ионосферы. В результате интерпретации ионограммы ВЗ формируется в виде треков высотно-частотная характеристика, по которой рассчитывается профиль электронной концентрации.

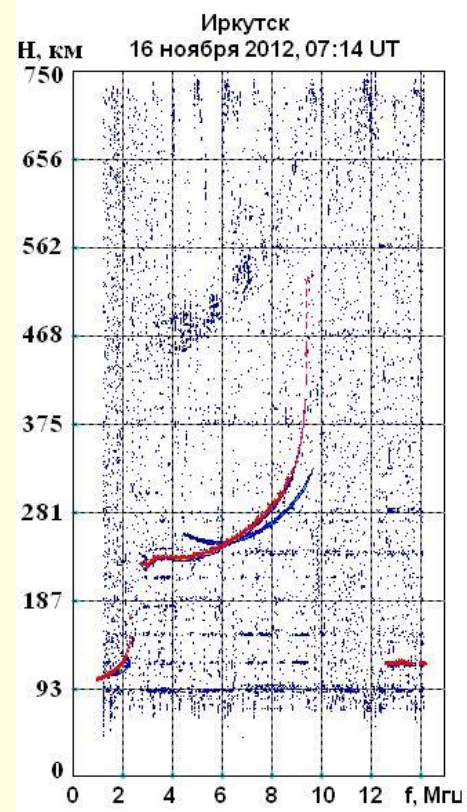
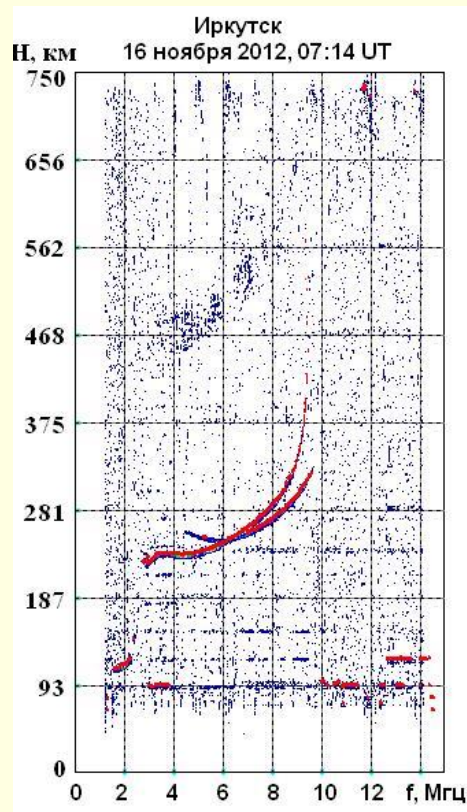
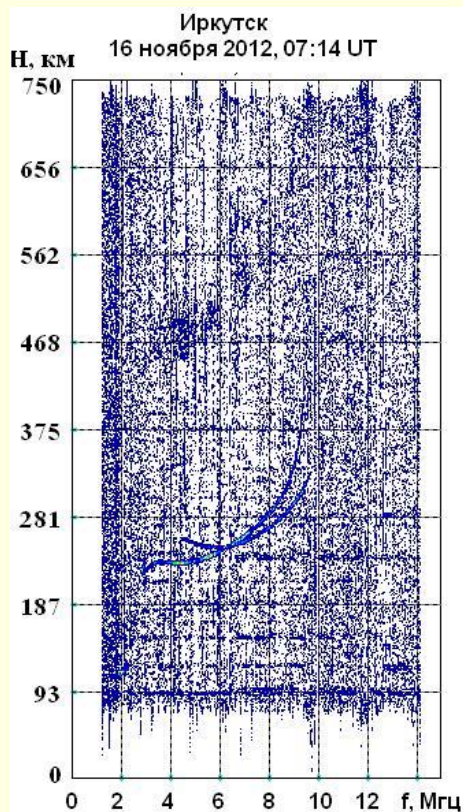
Функциональная блок-схема комплекса обработки и интерпретации ионограмм ВЗ



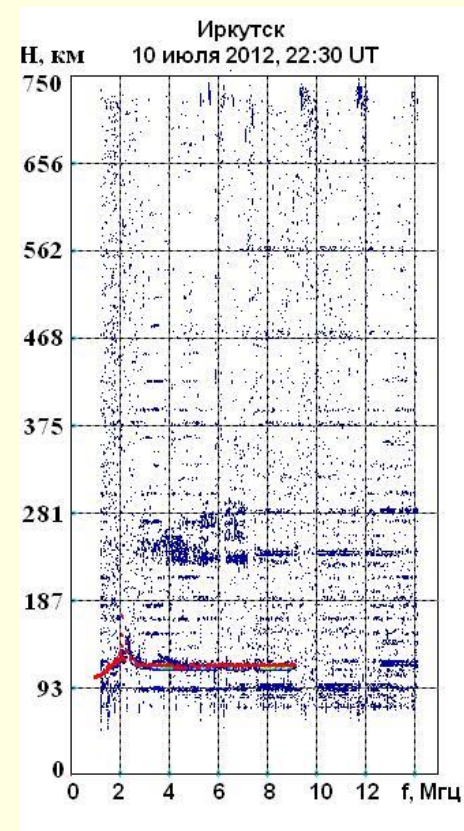
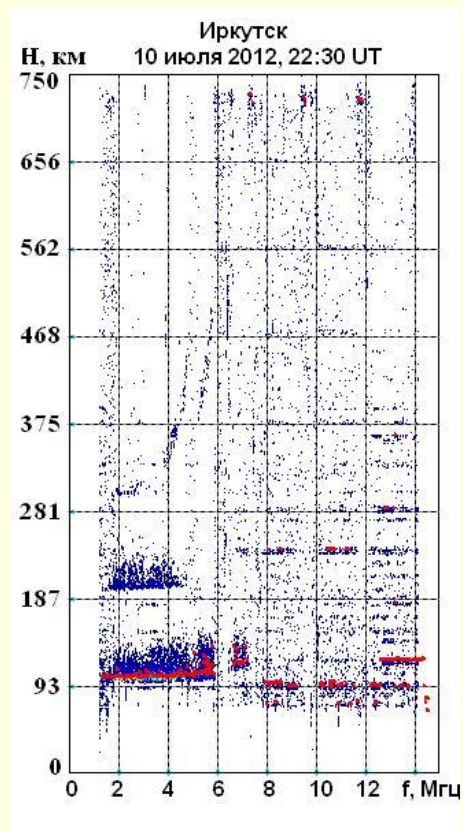
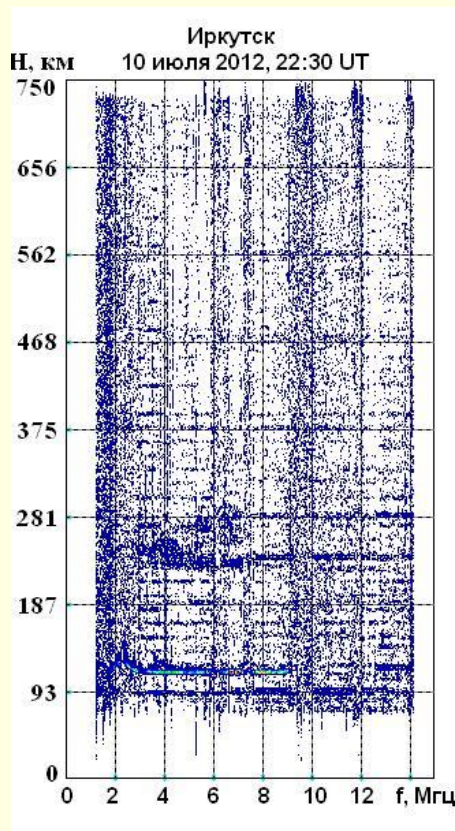
Интерфейс программного комплекса обработки и интерпретации ионограмм ВЗ и НЗ



Результаты интерпретации ионограмм ВЗ



Результаты интерпретации ионограмм ВЗ

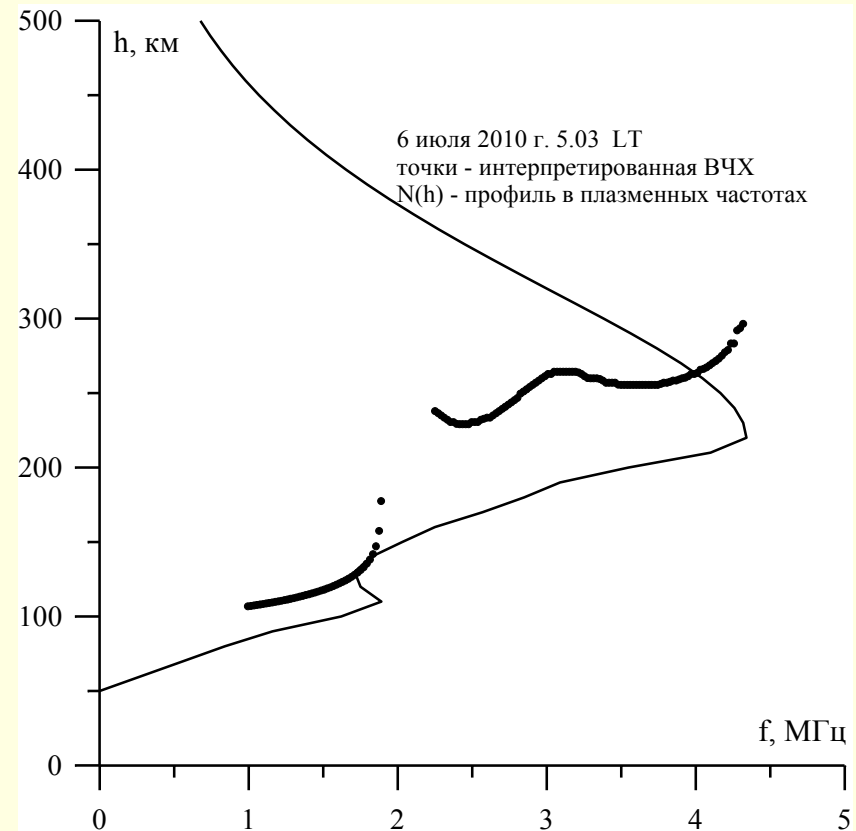
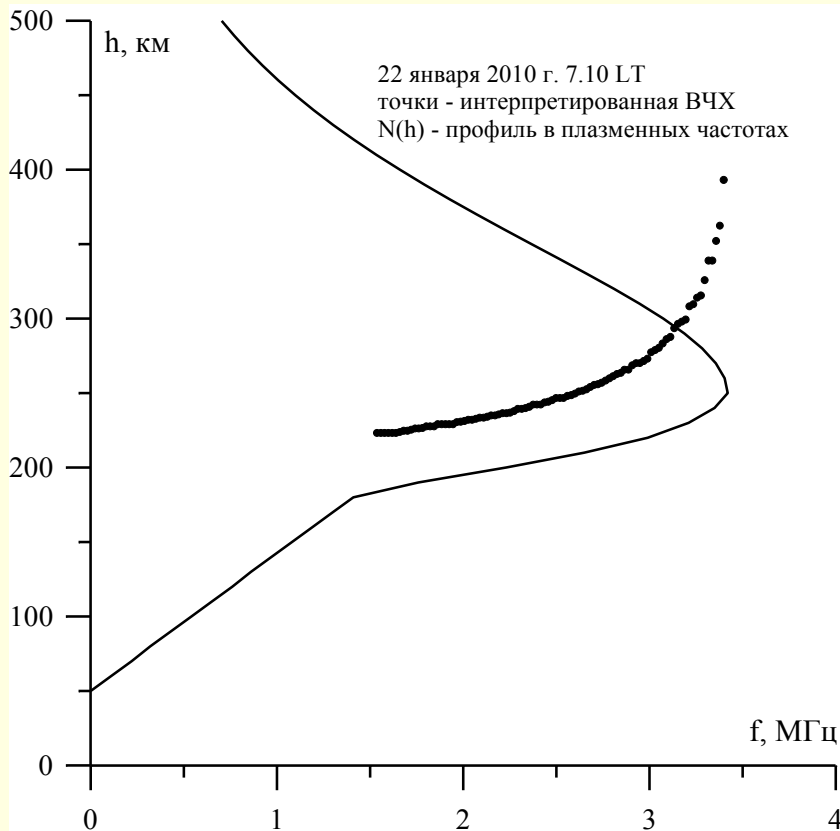


Расчет профиля электронной концентрации

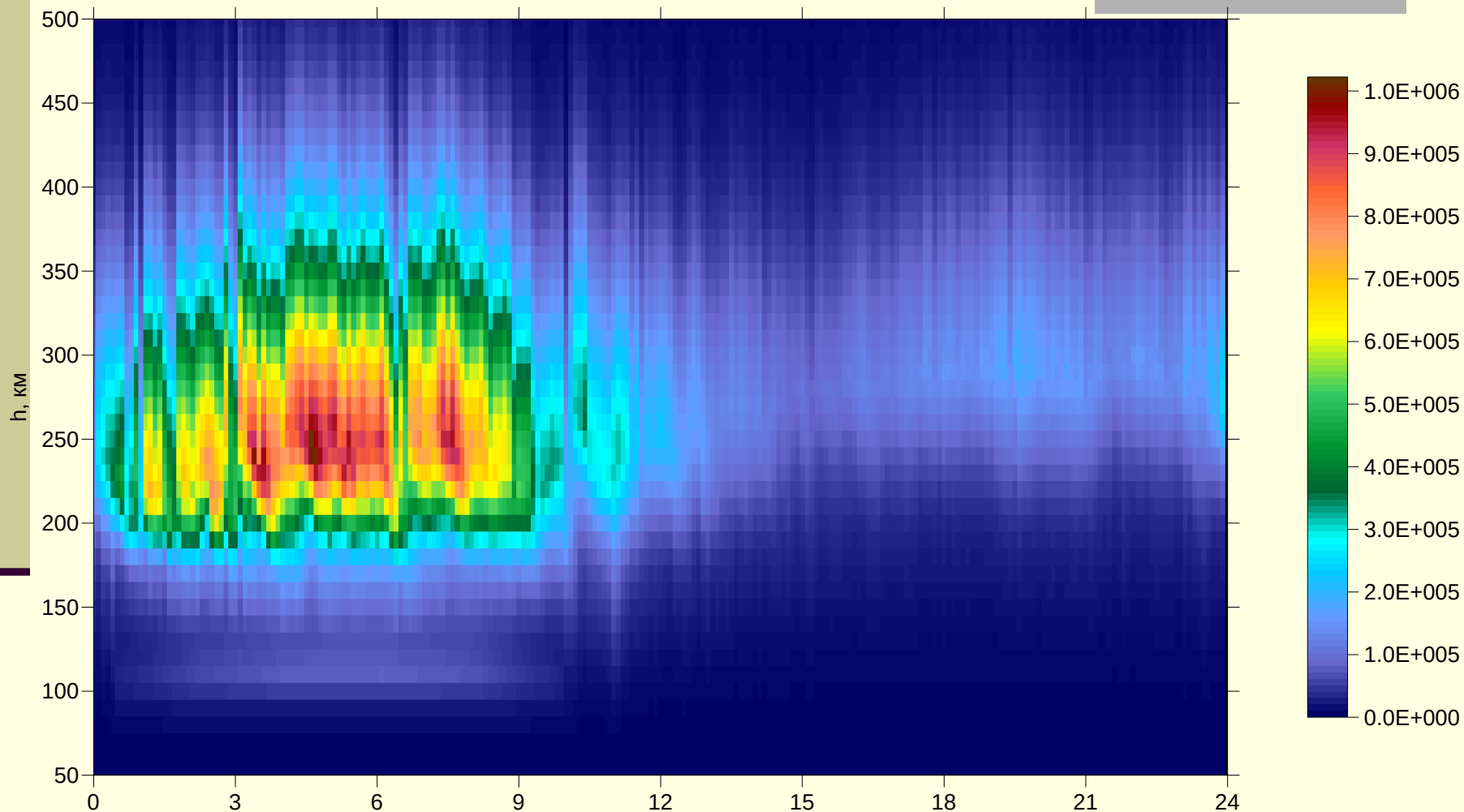
Для реконструкции высотного распределения плазменной частоты $f_e(h)$ развивается метод численного решения интегральных уравнений посредством модификации метода Джексона ($f_e^2(h)$ - непрерывная функция) с повышением точности в областях максимумов слоёв (прикритических частот) и долин, где $f_e^2(h)$ принадлежит классу функций, непрерывных вместе со своей первой производной.

С учетом волновых поправок к групповому пути на критических частотах слоев (в области их полупрозрачности) решение интегральных уравнений сводится к решению трансцендентных уравнений, которые решаются дифференциально-параметрическим методом. В результате определяются асимметричность долин и все семейство немонотонных профилей плазменной частоты с пересчитывающим параметром – глубина долины. Выбор однозначного решения осуществляется либо заданием глубины долины из моделей, либо заданием реперной точки через которую проходит профиль плазменной частоты после выхода из долины.

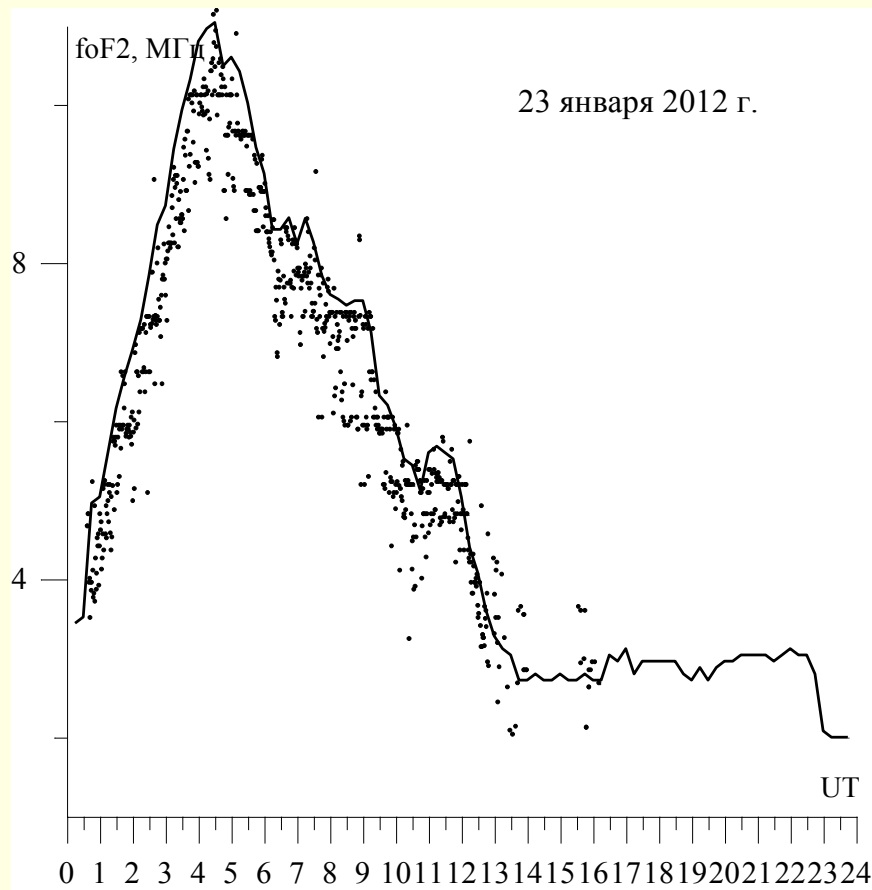
Результаты реконструкции профиля электронной концентрации



Суточные вариации высотного профиля электронной концентрации, 12 ноября 2012 г.

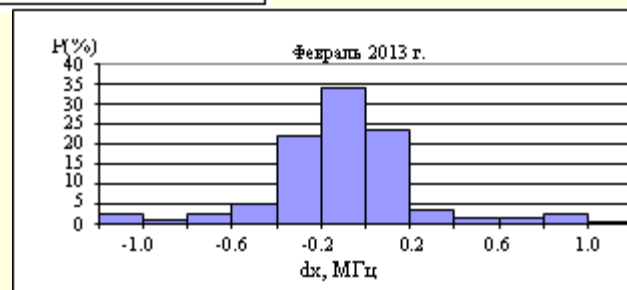
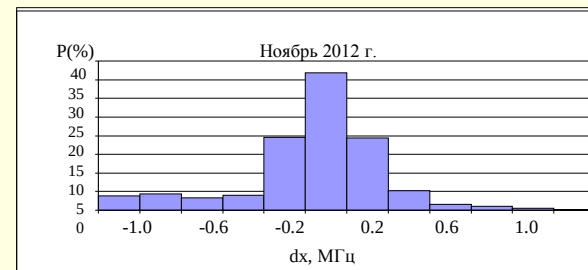
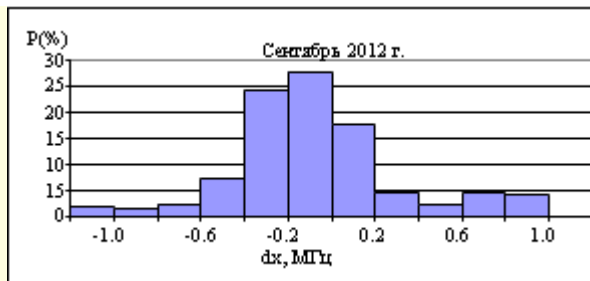
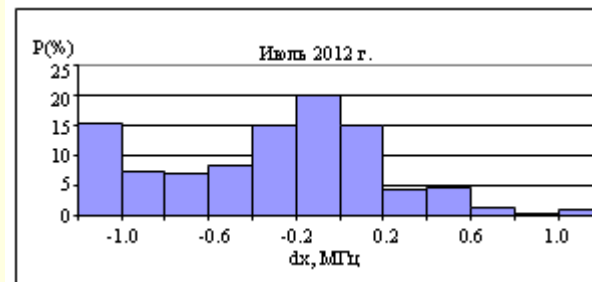
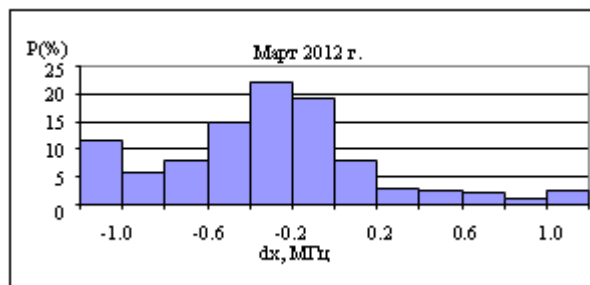


Тестирование алгоритмов интерпретации ионограмм ВЗ



*Вариации критических частот слоя F2 в Иркутске за 23 января 2012 г.:
сплошная линия – эксперимент, точки – результаты интерпретации*

Тестирование алгоритмов интерпретации ионограмм ВЗ



*Распределение ошибок определения foF2 при автоматической
обработке ионограмм*

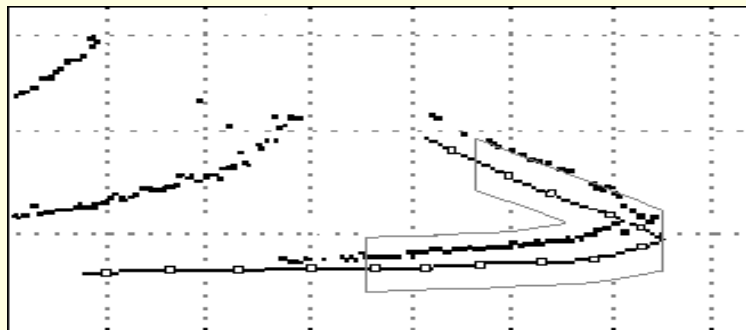
Методика интерпретации ионограмм НЗ

Методика интерпретации ионограмм НЗ основана на использовании результатов моделирования ДЧХ на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических соотношений и результатах обработки экспериментальных ионограмм.

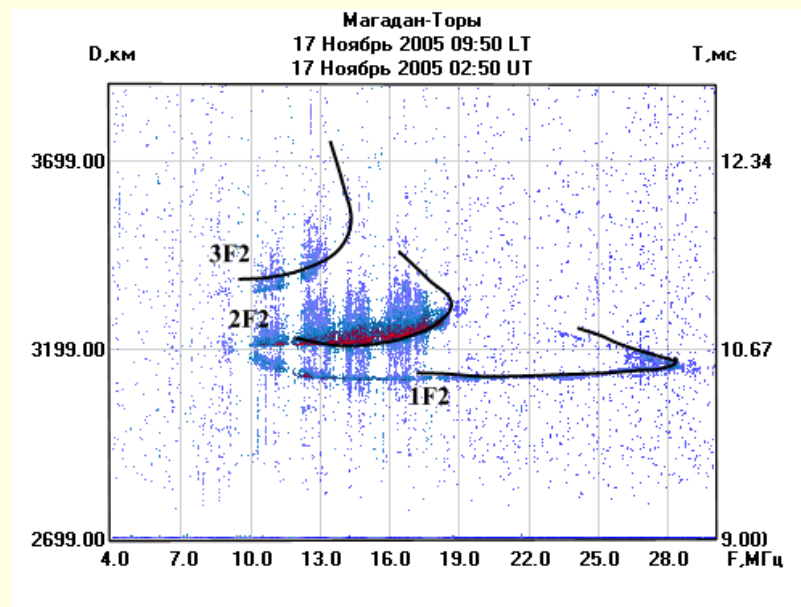
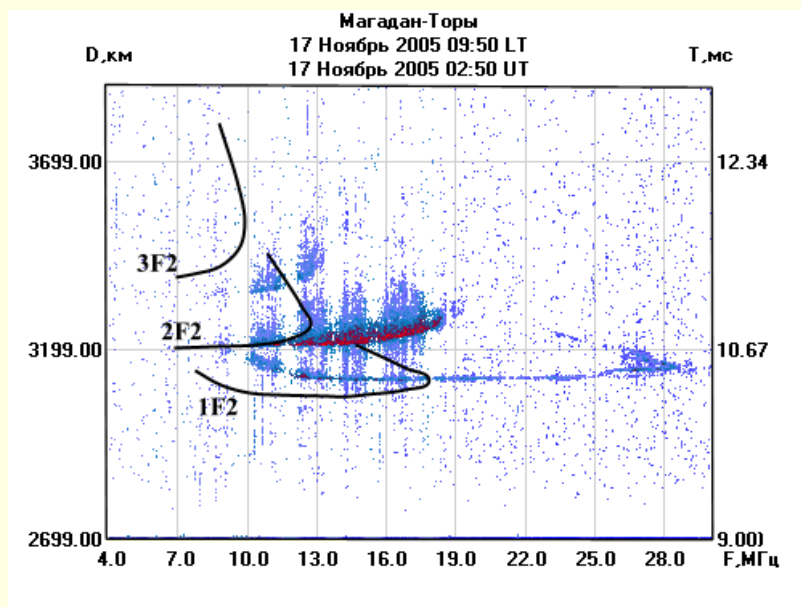
Адиабатические соотношения:

- отношение группового пути в точке смыкания нижнего и верхнего лучей какого-либо мода к длине трассы;
- отношение МПЧ модов различных кратностей, распространяющихся в одном из волноводных каналов (нижней стенкой их является поверхность Земли, а верхней слой E, F1 или F2);
- ДЧХ одного мода, кратности l , на относительной сетке частот $\beta = f / f_{m,l}$, где $f_{m,l}$ - МПЧ мода для рассматриваемой дальности.

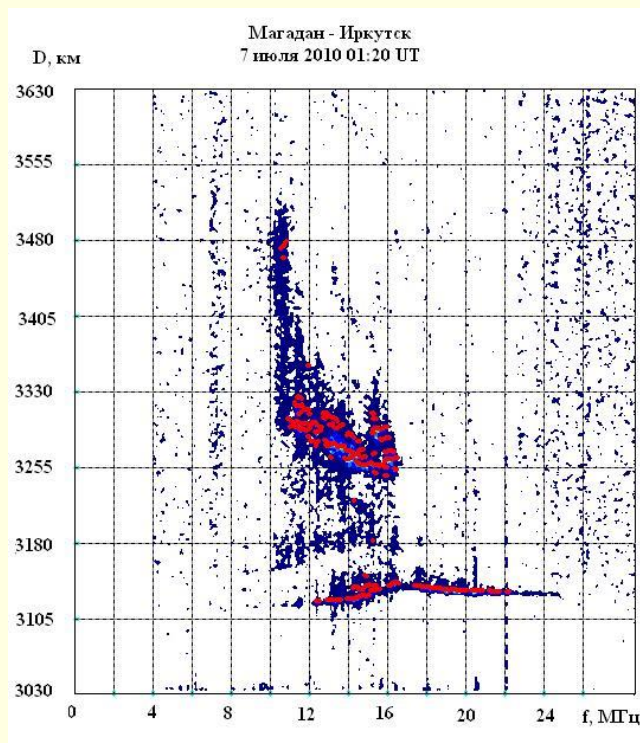
Алгоритм интерпретации ионограмм НЗ



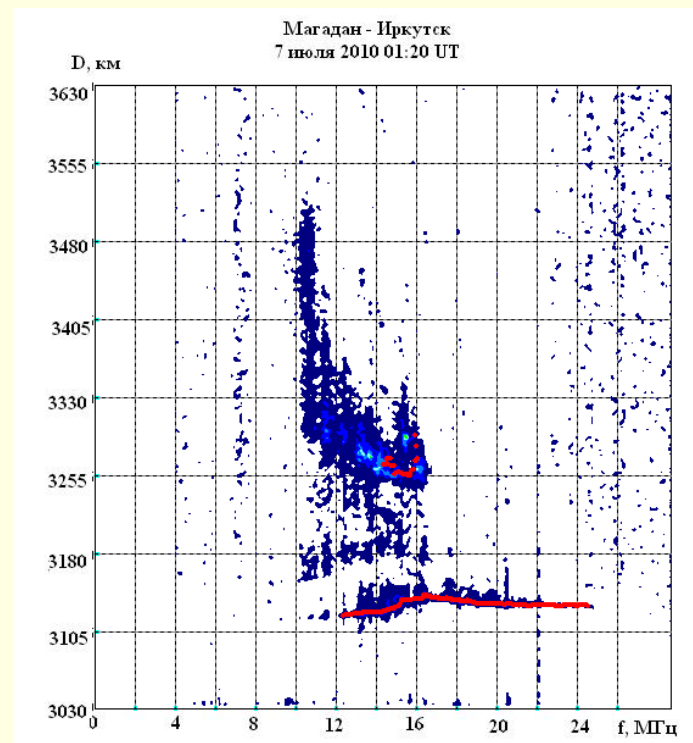
Модельная маска на относительной сетке частот



Примеры интерпретации ионограмм НЗ

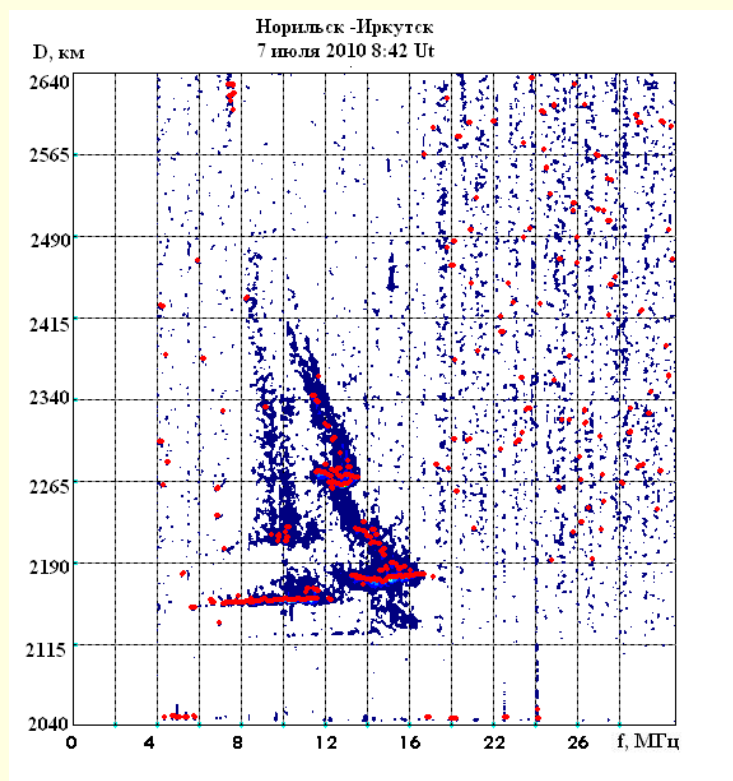


Обработка ионограммы

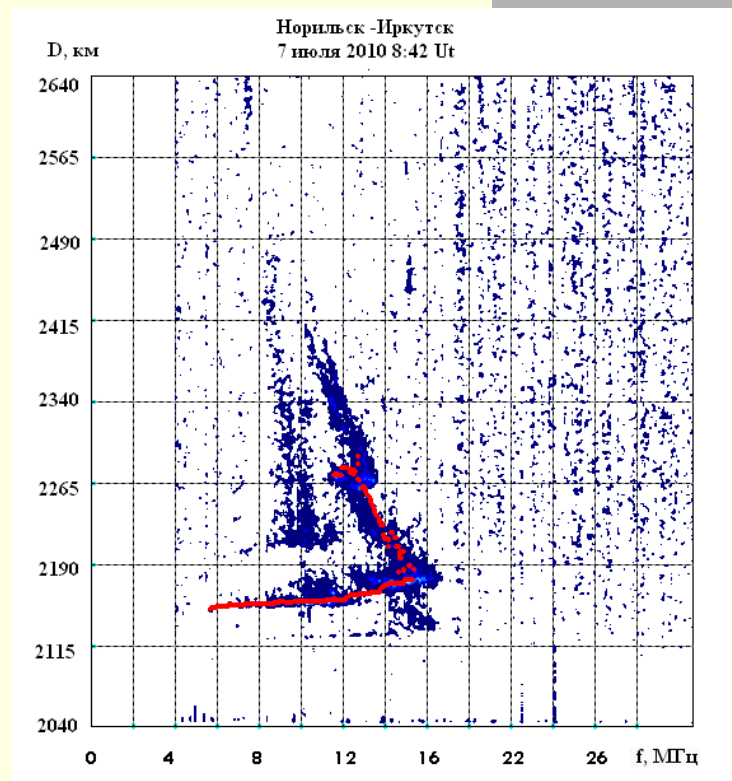


Результаты интерпретации

Примеры интерпретации ионограмм НЗ

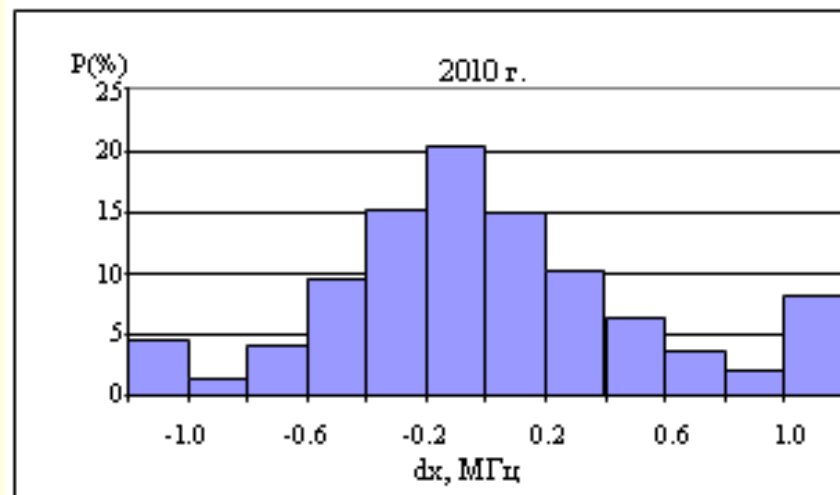
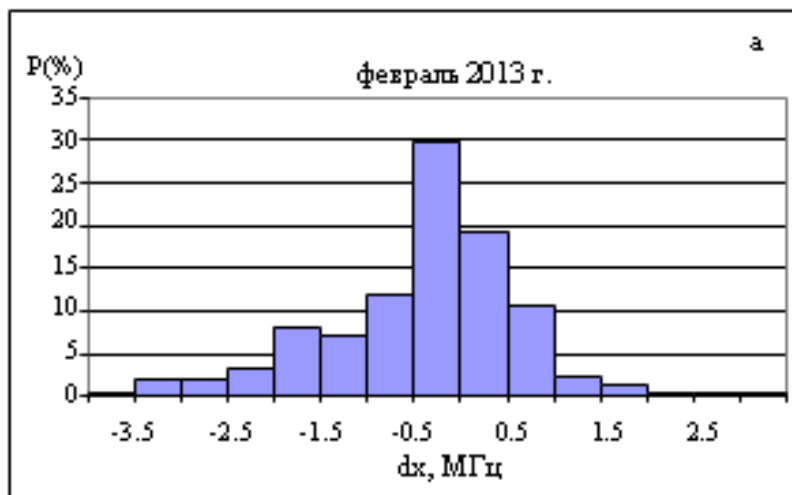


Обработка ионограммы



Результаты интерпретации

Тестирование алгоритмов интерпретации ионограмм НЗ



Распределение ошибок определения максимальной наблюдаемой частоты при автоматической обработке ионограмм на наклонной трассе: а) - Магадан – Омск, б) – Магадан – Иркутск

Выводы

1. Разработаны методы и алгоритмы автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВЗ и НЗ.
2. Реализован программный комплекс анализа ионограмм ВЗ и НЗ.
3. Для вертикального зондирования по трекам производится отсчет ионосферных параметров и по ВЧХ рассчитывается профиль электронной концентрации $N(h)$.
4. Для наклонного зондирования разработанные методы анализа ионограмм позволяют проводить оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода, строить ДЧХ сигнала и проводить идентификацию модов распространения.
5. Апробация программного комплекса на большом массиве экспериментальных данных показала, что он способен работать в автоматическом режиме. При этом количественные характеристики качества его работы не уступают лучшим мировым образцам подобных программ.

Благодарю за внимание!

