

УДК 551.510.535

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

В.П. Грозов, А.М. Киселев, Г.В. Котович, С.Я. Михайлов, С.Н. Пономарчук

*ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия*

В докладе рассмотрены методики и алгоритмы вторичной обработки и интерпретации ионограмм, полученные на базе ЛЧМ - ионозонда, работающего в режиме вертикального и наклонного зондирования ионосферы (ВЗ и НЗ). Вторичная обработка экспериментальных ионограмм проводится на основе фильтрации исходных данных с последующим сжатием их методом клеточного автомата. Методика интерпретации ионограмм основана на использовании результатов моделирования частотных зависимостей характеристик распространения в режиме долгосрочного прогноза и результатов обработки экспериментальных данных. Разработан алгоритм восстановления профиля электронной концентрации по выделенным трекам ВЧХ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ИОНОГРАММА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

### ВВЕДЕНИЕ

Чувствительность КВ диапазона к ионосферным эффектам способствовала интенсивному развитию высокоэффективных цифровых диагностических средств, послуживших основой глобальных систем мониторинга ионосферы [1-3]. Одним из эффективных средств исследования диагностических возможностей КВ радиосредств и влияния космической погоды на условия распространения радиоволн является ЛЧМ - ионозонд [4-7]. Высокая помехозащищенность ЛЧМ - ионозонда и его хорошая электромагнитная совместимость, по сравнению с импульсным ионозондом, предопределили широкое применение ЛЧМ - ионозондов в фундаментальных и прикладных исследованиях в области физики ионосферы и распространения радиоволн. Для мониторинга ионосферы в месте расположения диагностического комплекса и исследования процессов, протекающих в ионосфере при естественных и искусственных возмущениях, применяются ионозонды вертикального и слабонаклонного зондирования. Ионозонды наклонного зондирования применяются для исследования ионосферы вдоль трасс распространения радиоволн декаметрового диапазона в различных гелиогеофизических условиях.

Принципиальным при мониторинге ионосферы является автоматизация процесса обработки, которая может быть решена при условии эффективного обнаружения сигнала на фоне помех и выделение его на ионограмме с последующей идентификацией. Решению задач автоматической обработки ионограмм посвящен достаточно большой объем работ (например [8 - 10] и ссылки в этих работах).

В данной работе рассмотрен подход, реализованный в ИСЗФ СО РАН при разработке программного комплекса автоматической интерпретации данных ионосферного зондирования [11].

### МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЗ И НЗ

Основными задачами при обработке ионограмм ВЗ и НЗ являются фильтрация и сжатие исходных данных для формирования массива точек, соответствующих моментам прихода сигналов со значимой амплитудой (отношение сигнал/шум). На ионограмме можно выделить три основных типа объектов: полезный сигнал, фоновый шум (основной фон) и сосредоточенные помехи, одиночные выбросы (локальные всплески яркости размером в 1-2 точки). Задачей автоматической обработки ионограмм является выделение следов на ионограмме с

последующей привязкой к конкретному типу отражения.

Вторичная обработка ионограмм сводится к решению двух задач:

а) проведению предобработки ионограмм для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик;

б) сжатие данных, позволяющих провести существенное сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

Предобработка ионограмм заключается в ее очистке от шумовых составляющих, т.е. необходимо выделить полезный сигнал на фоне шума и станционных помех, а также удалить одиночные выбросы, которые имеют интенсивность, сравнимую с полезным сигналом и могут приводить к сбоям в работе алгоритмов определения параметров ионосферы. Основным подходом к очистке шума является фильтрация изображения, цель которой - подавить шум при сохранении структуры изображения. Для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала на этапе предобработки используются методики в виде локальных фильтров, построенных на порядковых и аддитивных статистиках. В предлагаемой конфигурации алгоритма используется медианный фильтр. Статистические свойства данного фильтра хорошо изучены, предложены быстрые вычислительные алгоритмы. Для их реализации не нужна априорная информация, типа предопределяемых пороговых значений. Их достоинствами являются достаточно высокое быстродействие и свобода в выборе формы анализируемой окрестности. Медианный фильтр хорошо сглаживает помехи и уменьшает размытие границ треков для восстановления точек в разрывах.

Отсевание сосредоточенных помех («вертикальные полосы» на ионограмме) проводится в предположении, что, они имеют распределение, близкое к равномерному типу. При первичной обработке сосредоточенная (узкополосная) помеха умножается на опорный сигнал и по временной выборки длительности  $T$  проводится преобразование Фурье. При этом получаемый спектр в полосе анализа имеет практически постоянный модуль. В этом случае наиболее приемлемым является алгоритм выбора порога очистки на основе гистограммы распределения яркости точек, который широко применяется при обработке изображений. Идея метода состоит в том, что разделение по яркости двух объектов изображения производится по порогу, который определяется по точке ми-

нимума между двумя пиками на гистограмме яркости. Считается, что один мод гистограммы соответствует определенному объекту изображения или группе объектов, объединенных общим критерием однородности.

Зная, что средний уровень шума ниже среднего уровня полезного сигнала, критерий однородности для шума можно определить как принадлежность значения яркости точки к первому моду гистограммы. Значения яркости, которые относятся к другим модам, соответствуют полезному сигналу. Отсюда следует, что для надежного обнаружения и выделения сигнала фрагмент изображения должен иметь фон с унимодальной гистограммой распределения амплитуд.

Методика сжатия данных применяется для выделения точек со значимой амплитудой, физически соответствующих величинам – моментам прихода сигнала по максимуму амплитудного рельефа. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме эффективен механизм клеточного автомата [12]. Клеточные автоматы – это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется локальными взаимными связями элементов этих систем. Фактически клеточный автомат, в сущности, является простейшим вариантом нейронной сети с локальным взаимодействием клеток (нейронов) и локальной эволюцией. Все пространство данных делится на элементарные ячейки, которые затем эволюционируют при дискретно идущем времени. Закон динамики такой системы выражается некоторым набором правил, по которым каждая клетка изменяет свое состояние в зависимости от состояния соседних, входящих в некоторую локальную область. В результате работы клеточного автомата остаются лишь точки на гребнях треков и незначительная часть плотного высокоэнергетического шума. Реализованный в программном комплексе алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации до 5-10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности. Выходом клеточного автомата является первичный трек, состоящий из набора точек с координатами частота – задержка. На рисунке 1 приведены результаты вторичной обработки ионограмм ВЗ (а) и НЗ (б), полученные на базе цифрового ЛЧМ - ионозонда. Черным цветом выделены результаты вторичной обработки, нанесенные на исходные ионограммы.

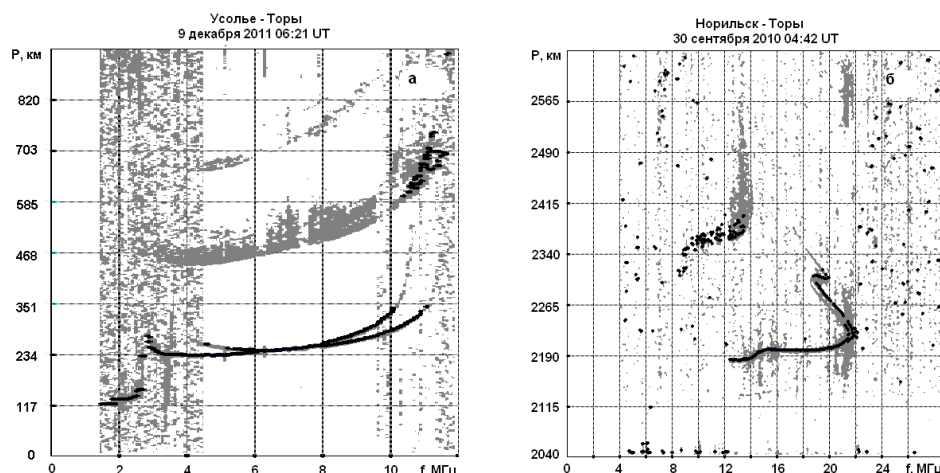


Рис. 1. Результаты вторичной обработки ионограмм ВЗ (а) и НЗ (б)

Видно, что отсеялась значительная часть шума и остались выделенными точки, соответствующие основным модам первой кратности и частично точки - модам второй кратности.

### МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИОНОГРАММ ВЗ И НЗ

Задача интерпретации ионограмм вертикального зондирования является достаточно сложной, так как не всегда удается достоверно выделить точки моментов прихода сигналов на экспериментальной ионограмме зондирования. Это связано как с наличием сложных геофизических условий – возмущения, помехи, многослойность ионосферы, так и с погрешностью восстановления ионограмм с использованием существующих моделей ионосферы.

Предлагаемая методика автоматической интерпретации ионограмм ВЗ основана на использовании результатов моделирования высотно-частотной характеристики (ВЧХ) в режиме долгосрочного прогноза и результатов обработки экспериментальных ионограмм.

Используя модель IRI [13] или полуэмпирическую модель ПЭМИ [14], рассчитывается ВЧХ вертикального распространения 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 фор-

мируется в виде треков высотно-частотная характеристика, по которой рассчитывается профиль электронной концентрации. Реализован вариант восстановления профиля  $N(h)$  посредством развития метода Джексона численного решения интегральных уравнений с повышением точности метода в областях максимумов слоев (для критических частот отражения) и долин [15]. На рисунке 2 приведены высотные профили электронной концентрации, рассчитанные по методике [15].

Методика интерпретации ионограмм НЗ основана на использовании результатов моделирования дистанционной частотной характеристики (ДЧХ) на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза, адиабатических соотношений и результатах обработки экспериментальных ионограмм: матрице точек со значимой амплитудой  $A(f_i, P_j)$ .

Для задачи интерпретации ионограмм НЗ можно сформулировать следующие основополагающие предположения [16]. При вариациях параметров ионосферы в пределах погрешности долгосрочного прогноза сохраняются:

- отношение группового пути  $P_m$  в точке смыкания нижнего и верхнего лучей какого-либо мода к длине трассы;
- отношение максимальных применимых частот (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.

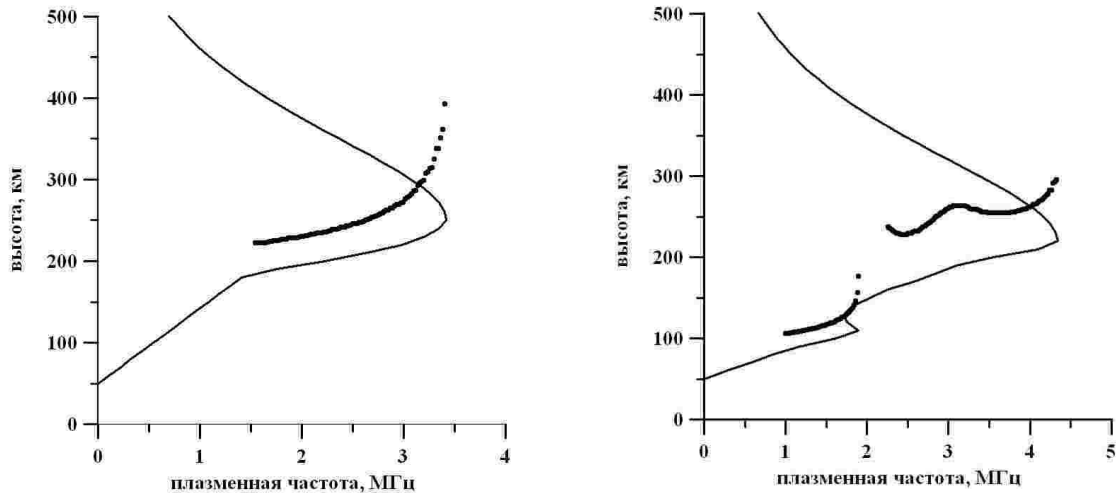


Рис. 2 – Высотные профили электронной концентрации: точки - ВЧХ, сплошная линия - профиль  $N(h)$ . а) 22 января, 2010 г., 07:10 UT; б) 06 июля, 2010 г., 05:03 UT

Алгоритм интерпретации ионограмм НЗ в автоматическом режиме строится следующим образом. Проводятся расчеты ДЧХ НЗ для данной трассы в режиме долгосрочного прогноза. Исходя из этого, строится модельная маска для мода минимальной кратности слоя F, включающая в себя две полосы шириной  $\Delta P$  км (по вертикали) и протяженностью по частоте от  $\mu f_m^P$  до  $f_m^P$ , где  $f_m^P$  – прогнозная МПЧ опорного мода, для нижнего луча, и протяженностью от  $\nu f_m^P$  до  $f_m^P$  – для верхнего луча. Значения  $\mu$  и  $\nu$  можно варьировать ( $\mu \cong 0.8$ ,  $\nu \cong 0.7$ ).

Алгоритм идентификации опорного следа на ионограмме заключается в подсчете числа точек моментов прихода сигналов при движении модельной маски по экспериментальным точкам на относительной сетке частот. Маска движется по точкам матрицы  $A(f_i, P_j)$ , путем совмещения "носика" с точкой  $A_{ij}$ . При передвижении маски подсчитывается число точек  $A(f_i, P_j)$ , попадающих в маску в пределах прямоугольника  $[\Delta f \times \Delta P]$ , где  $\Delta f$  и  $\Delta P$  подбираются, исходя из разрешения ионозонда по дальности и частоте. Максимум гистограммы распределения числа экспериментальных точек в зависимости от положения маски позволяет определить реальные значения МПЧ  $f_m^r$  и группового пути  $P_m^r$  на этой частоте. По результатам идентификации строится трек для выбранного мода распространения. В случае

определения  $f_m^r$  и  $P_m^r$  оставшиеся экспериментальные точки, соответствующие моду первой кратности, идентифицируются путем удлинения полос маски в область низких частот вдоль модельной ДЧХ, масштабированной множителем  $f_m^r / f_m^P$ , и поиском элементов  $P_{ij}$ , попадающих в эти полосы. Далее проводится линейная интерполяция треков для перехода на равномерную сетку частот. По вышеописанной процедуре проводится идентификация модов большей кратности.

#### ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИОНОГРАММ ВЗ И НЗ

На основе разработанных методов обработки и интерпретации сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы реализован программный комплекс, позволяющий в автоматическом режиме выделять треки на ионограммах и проводить их идентификацию. Для вертикального зондирования по трекам производится отсчет ионосферных параметров: критических частот и минимальных высот отражения для каждого ионосферного слоя; минимальных частот отражения от слоев E и F2; критической частоты, минимальной высоты отражения и частоты экранировки для Es-слоя. По ВЧХ рассчитывается профиль электронной концентрации  $N(h)$  и по рассчитанному профилю определяются дополнительные ионосферные параметры: высота максимума слоя F2 и коэффициент  $M(3000)$ .

На рисунке 3 показаны результаты автоматической обработки и интерпретации ионо-

граммы ВЗ, полученной 16 ноября 2012 г. в 07:14 UT на многофункциональном цифровом ЛЧМ - ионозонде: исходная ионограмма (а), результат вторичной обработки ионограммы (б) и результат автоматической интерпретации ионограммы (в). Данная ионограмма ВЗ относится к стандартному типу экспериментальных ионограмм, поддающихся обработке, как в ручном, так и в автоматическом режимах. Как видно из рисунка 3б были уверенно выделены обыкновенная и необыкновенная компонента в результате вторичной обработки, что позволило хорошо проинтерпретировать ионограмму (рисунок 3в) и снять ионосферные параметры.

Наибольшие трудности возникают при обработке ионограмм, полученных в летний период времени, когда присутствует спорадический слой E<sub>s</sub>, который может экранировать отражения от слоя F. На рисунке 4 показаны результаты автоматической обработки и интерпретации ионограммы ВЗ, полученной летом 10 июля 2012 г. в 22:30 UT: исходная ионограмма (а), результат вторичной обработки ионограммы (б) и результат автоматической интерпретации ионограммы (в).

По результатам обработки и интерпретации ионограмм формируются треки, соответствующие отраженным сигналам от ионосферных слоев, по которым проводится расчет профиля электронной концентрации N(h). На рисунке 5 приведены суточные вариации высотного профиля электронной концентрации, полученные по результатам автоматической интерпретации ионограмм ВЗ за 12 ноября 2012 года.

Статистическая оценка точности автоматической обработки ионограмм ВЗ была проведена по экспериментальным данным вертикального зондирования за 2012 – 2013 г.г. на базе цифрового многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН.

Были обработаны пятиминутные данные за 2012- 2013 г.г., всего свыше 10000 ионограмм. На рисунке 6 приведены гистограммы распределения абсолютных ошибок ( $dx = f_0^a F2 - f_0^3 F2$ ) автоматического определения критической частоты foF2 за отдельные месяцы. По оси ОХ – отклонения  $dx$  в МГц, по оси ОУ – количество ионограмм, попавших в соответствующий интервал ( в процентах).

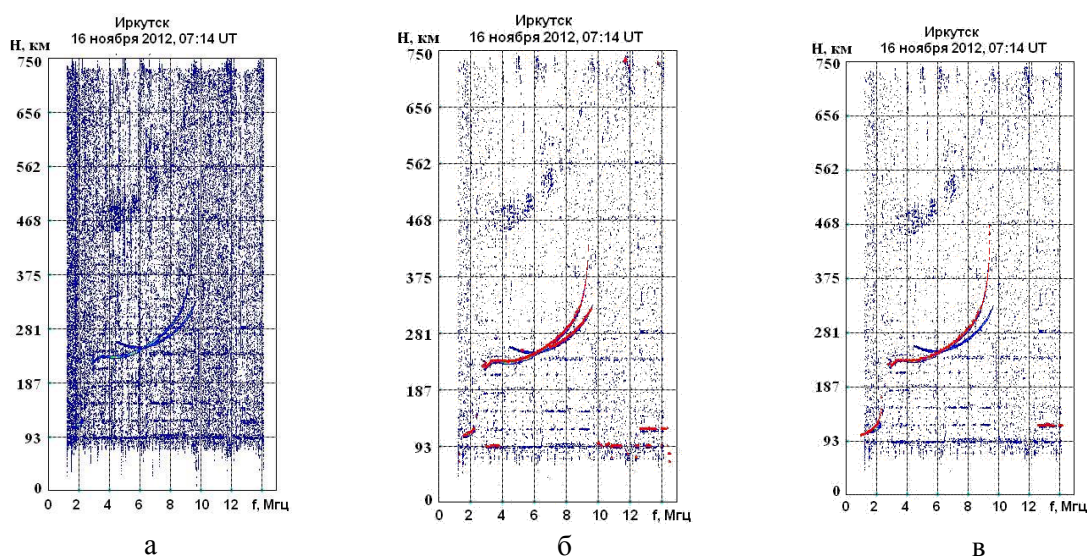


Рис. 3. Ионограмма ВЗ (а) и результаты вторичной обработки (б) и интерпретации (в), 16 ноября 2012 г., 07:14 UT

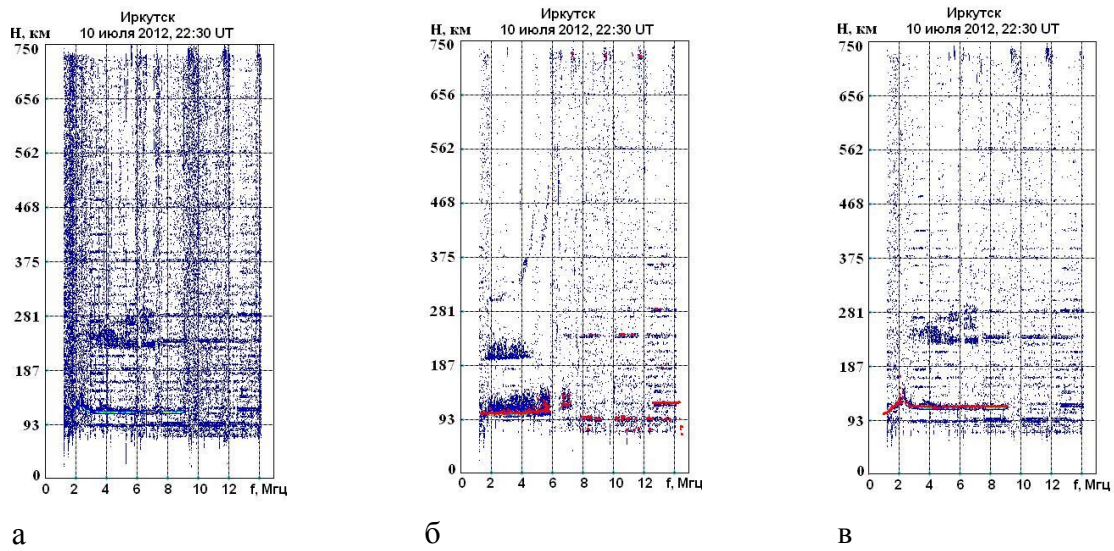


Рис. 4. ИONOграмма ВЗ (а) и результаты вторичной обработки (б) и интерпретации (в), 10 июля 2012 г., 22:30 UT

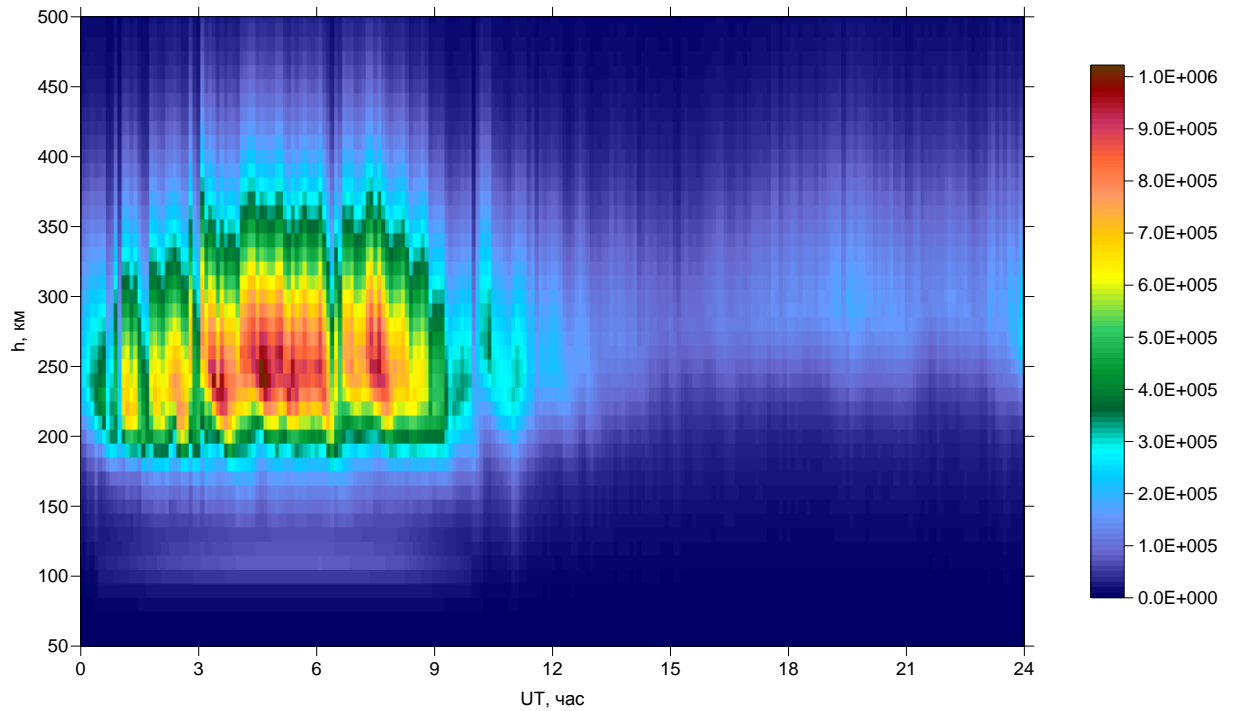


Рис. 5. Суточные вариации высотного профиля электронной концентрации, 12 ноября 2012 г.

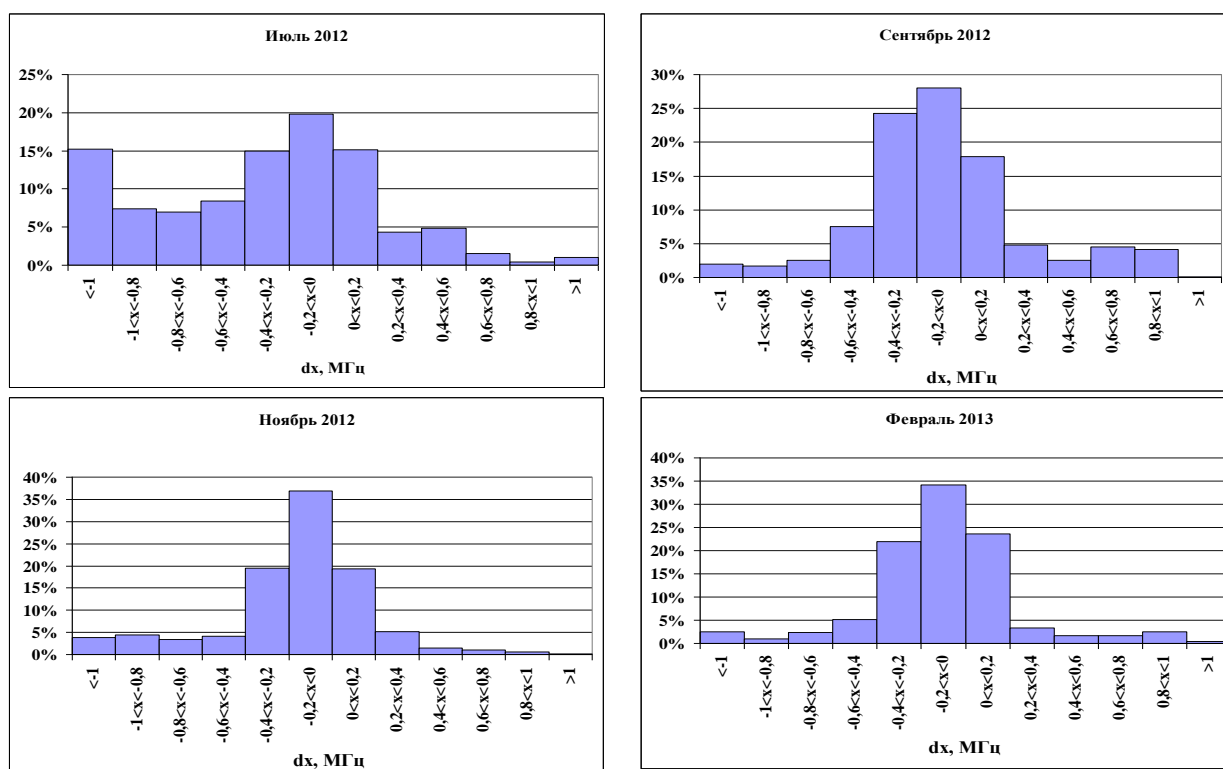


Рис. 6. Распределение ошибок определения foF2 при автоматической обработке ионограмм: ось X – отклонение в МГц, ось Y – процент появления

В таблице 1 приведены значения статистических параметры для ряда рассматриваемых месяцев: среднее квадрата -  $\overline{(dx)^2}$ , среднее значение -  $\overline{(dx)}$  (МГц), среднее квадратичное -  $\sigma$ . Видно, что, в основном, отклонения лежат в диапазоне  $-0.4 \div 0.4$  МГц. При этом автоматическое определение foF2 реализуется в среднем  $\sim 70\% \div 75\%$ .

Таблица 1.

Дата	$\overline{(dx)^2}$	$\overline{(dx)}$	$\sigma$
Март 2012	1,36	-0,48	1,07
Июль 2012	4,54	-0,47	2,08
Сентябрь 2012	0,44	-0,13	0,65
Ноябрь 2012	0,20	-0,18	0,41
Февраль 2013	0,37	-0,15	0,59

Результаты статистической оценки точности автоматической обработки ионограмм ВЗ на базе цифрового многофункционального ЛЧМ - ионозонда были сравнены с данными, полученными на ионозонде DPS-4 ИСЗФ СО РАН. На рисунке 7 представлены гистограммы распределения абсолютных ошибок ( $dx = f_0^a F2 - f_0^3 F2$ ) автоматического определения критической частоты foF2 за март 2012 г.:

слева – данные DPS-4, справа - ЛЧМ- ионозонда.

Процент ионограмм, для которых отклонения максимально применимых частот  $dx$  находятся в диапазоне  $-0.4 \div 0.4$  МГц равен 59% для DPS-4 и 64% для ЛЧМ-ионозонда. Анализ результатов статистической оценки точности обработки ионограмм вертикального зондирования на базе цифрового многофункционального ЛЧМ - ионозонда, показал, что результаты автоматического определения foF2 ЛЧМ-ионозонда, не хуже результатов тестирования ионозонда DPS-4 [17].

Проведенный анализ отклонений критических частот слоя F2 по имеющимся данным ЛЧМ-зонда, DPS-4 и литературным данным позволил определить, что наибольшие отклонения критических частот слоя F2, полученных при автоматической обработке ионограмм ВЗ, по сравнению с интерактивной обработкой ионограмм, связаны:

- с ошибками прогнозирования треков ВЧХ по моделям ионосферы;
- с "экстраполяцией" оператором о – компоненты отраженного сигнала при определении  $f_0 F2$ , что приводит к отрицательной систематической ошибке;

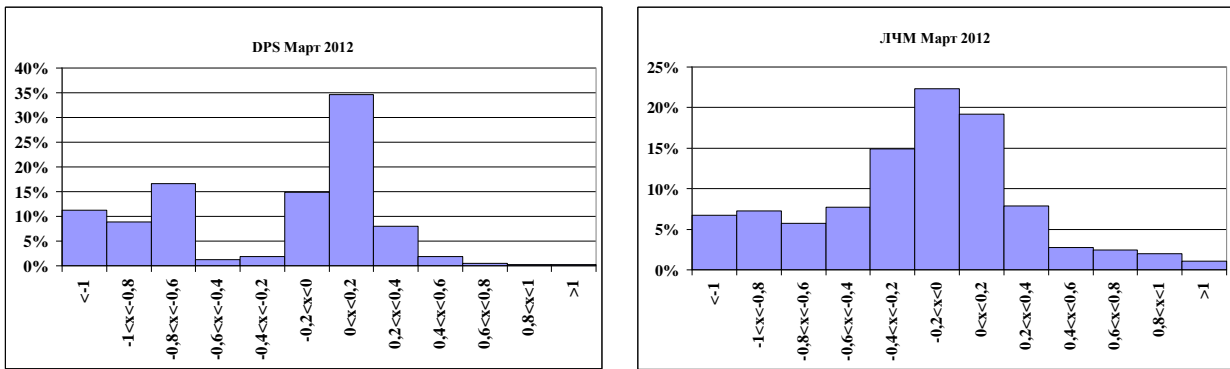


Рис. 7. Распределение ошибок определения foF2 при автоматической обработке ионограмм на ЛЧМ-ионозонде и DPS-4: ось X – отклонение в МГц, ось Y – процент появления

- "ложной" интерпретацией  $x$  – компоненты в автоматическом режиме (например, рисунок 7, отклонения  $> -0.6$  МГц);

- экранировкой слоя F слоем Es в летние периоды времени (рисунок 6, июль 2012);
- с наличием неоднородностей в ионосфере во время геомагнитных возмущений;
- с присутствием перемещающихся ионосферных возмущений.

Для экспериментальных данных наклонного зондирования ионосферы разработанный

программный комплекс позволяет в автоматическом режиме проводить идентификацию модов распространения, выделять треки на ионограммах, определять МПЧ каждого мода, восстанавливать ДЧХ сигнала по значимым точкам амплитудного рельефа сигнала. На рисунке 8 показаны результаты автоматической обработки и интерпретации ионограммы НЗ, полученной на ЛЧМ - ионозонде: результат вторичной обработки (а) и результат автоматической интерпретации ионограммы (б).

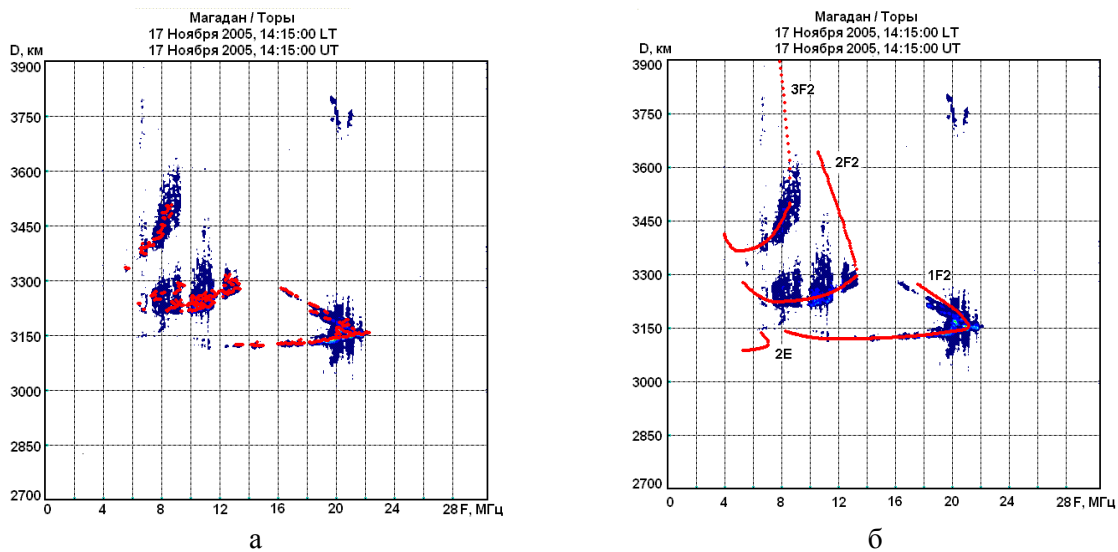


Рис. 8. Ионограмма НЗ (а) и результаты интерпретации (б), 17 ноября 2005 г., 14:15 UT

Для оценки достоверности результатов автоматической обработки и интерпретации ионограмм НЗ были вычислены отклонения ( $dx = f_m^{\exists} - f_m^a$ ) в МГц, где  $f_m^{\exists}$  и  $f_m^a$  - максимальные наблюдаемые частоты (МНЧ), снятые в интерактивном и автоматическом режимах соответственно.

Тестирование программного обеспечения на большом массиве экспериментальных данных было проведено на трассах наклонного

зондирования Магадан – Омск и Магадан – Иркутск. Для трассы Магадан – Омск (слой F2, двухскачковый мод) были обработаны пятнадцатиминутные данные за 12 – 28 февраля 2013 г., всего свыше 300 ионограмм. Данные для данной трассы получены на многофункциональном ЛЧМ – ионозонде, разработанном в ОНИИП, г. Омск. Используются методы обработки и интерпретации ионограмм НЗ, разработанные в ИСЗФ СО РАН. Для трассы Магадан



– Иркутск (слой F2, односкачковый мод) выборка за период 2010 г. составила ~ 2400 ионограмм. На рисунке 9 представлены гистограммы распределения ошибок автоматического определения максимальной наблюдаемой частоты. В таблице 2 приведены

статистические параметры для рассматриваемых периодов времени: среднее квадрата -  $\overline{(dx)^2}$ , среднее значение -  $\overline{(dx)}$  (МГц), среднее квадратичное -  $\sigma$ .

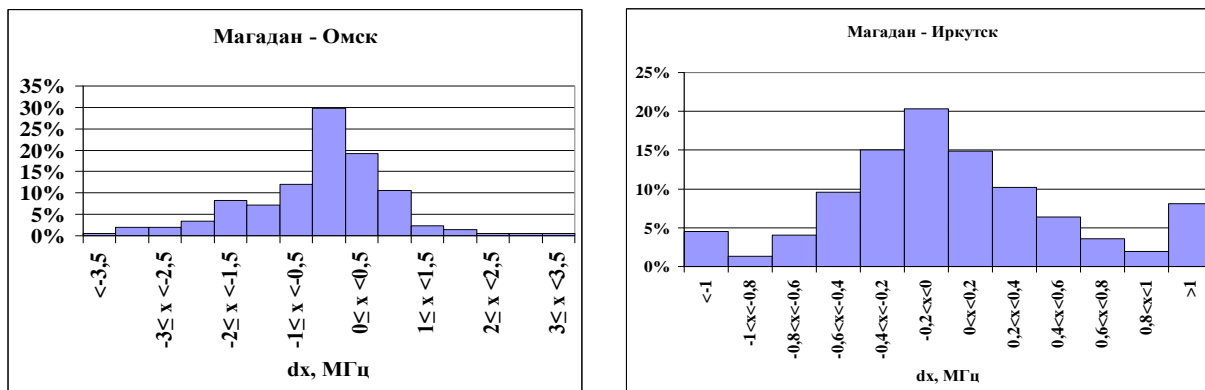


Рис. 9. Распределение ошибок определения МНЧ при автоматической обработке ионограмм на наклонной трассе: а) - Магадан – Омск, б) – Магадан – Иркутск; ось X – отклонение в МГц, ось Y – частота появления

Таблица 2.

Дата	$\overline{(dx)^2}$	$\overline{(dx)}$	$\sigma$
Февраль 2013	1,28	-0,38	1,07
2010 г.	5,98	0,16	2,44

Для трассы Магадан – Омск для 74% процентов ионограмм отклонения  $dx$  находятся в диапазоне  $-1.0 \div 1.0$  МГц. Для трассы Магадан – Иркутск в этом диапазоне находятся 87% всех ионограмм, что объясняется более представительной выборкой данных, при этом 50% ионограмм имеют отклонения в диапазоне  $-0.2 \div 0.2$  МГц.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы и алгоритмы вторичной обработки ионограмм и интерпретации сигналов вертикального и наклонного зондирования ионосферы реализованы в виде программного комплекса, позволяющего в автоматическом режиме выделять треки на ионограммах и проводить их идентификацию.

Для вертикального зондирования по трекам производится отсчет ионосферных параметров: критических частот и минимальных высот отражения для каждого ионосферного слоя; ми-

нимальных частот отражения от слоев E и F2; критической частоты, минимальной высоты отражения и частоты экранировки для Es-слоя. В случае правильной идентификации всех слоев по ВЧХ рассчитывается профиль электронной концентрации  $N(h)$  посредством развития метода Джексона численного решения интегральных уравнений с повышением точности метода в областях максимумов слоёв (для критических частот отражения) и долин. По рассчитанному профилю определяются дополнительные ионосферные параметры: высота максимума слоя F2 и коэффициент  $M(3000)$ .

Для наклонного зондирования разработанные методы анализа ионограмм позволяют проводить оперативное определение модового состава, МПЧ каждого мода, строить ДЧХ сигнала по значимым точкам амплитудного рельефа сигнала и проводить идентификацию модов распространения.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственный контракт № 14.518.11.7065, соглашение № 8388) и грантов РФФИ (№11-05-00892-а и № 13-05-00979-а).

## THE SOFTWARE FOR PROCESSING AND INTERPRETATION OF SOUNDING IONOGRAM ON BASE OF DIGITAL CHIRP SOUNDER

V.P. Grozov, A.M. Kiselev, G.V. Kotovich, S.Ya Mikhailov, S.N. Ponomarchuk,

ISTP SB RAS, 664033, Irkutsk, P/O Box 291, Russia

[spon@iszf.irk.ru](mailto:spon@iszf.irk.ru), [grozov@iszf.irk.ru](mailto:grozov@iszf.irk.ru), [amk1960@rambler.ru](mailto:amk1960@rambler.ru), [kotovich@iszf.irk.ru](mailto:kotovich@iszf.irk.ru), [mikh@iszf.irk.ru](mailto:mikh@iszf.irk.ru)

Keywords : ionosphere, ionogram, radio wave propagation, signal processing.

In our report we consider techniques and algorithms for secondary processing and interpretation of ionograms obtained with a help of chirp ionosonde operating in vertical and oblique sounding mode (VS and OS). The secondary processing of experimental ionograms is carried out on the base of primary data filtering with subsequent compression with a help of cellular automaton technique. Ionogram interpretation methods is based on modeling results for frequency dependences of propagation characteristics in the regime of long-term forecast and on results of experimental data processing. We also develop the algorithm for electron concentration profile restoration on the base of HFC selected tracks.

### ЛИТЕРАТУРА

- Greenwald R. A., Baker K. B., Dudeney J. R., Pinnock M., Jones T. B., Thomas E. C., Villain J.-P., Cerisier J.-C., Senior C., Hanuise C., Hunsucker R. D., Sofko G., Koehler J., Nielsen E., Pellinen R., Walker A. D. M., Sato N., Yamagishi H. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection // *Space Science Reviews*.–1994.–№ 710. –P. 761-796.
- Reinisch B.W. Modern Ionosondes, in *Modern Ionospheric Science* / ed. by Kohl H., Ruster R., Schlegel K., European Geophysical Society.–Katlenburg-Lindau, 1996. – P.440-458.
- Goodman J.M. *Space Weather & Telecommunications* // Springer: New York, USA.– 2005.– 382 p.
- Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // *Известия Вузов. Радиофизика*. –2003.– Т.46, № 11. –С. 919-952.
- Ильин Н.В., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. Моделирование характеристик ЛЧМ-сигналов при наклонном зондировании ионосферы // *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца*. – Новосибирск: Наука.–1995.–Вып. 103.–С. 149-157.
- Матюшонко С.М., Савченко Т.Н. Многофункциональный приемный комплекс ионосферного зондирования // *Труды Международной научной конференции “Излучение и рассеяние ЭМВ”*: Таганрог.–2003.– С. 283-286.
- Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Мальцев А.В.. Адаптивное обнаружение и выделение широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией при сжатии его в частотной области // *Радиотехника. Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2009. – Т 14, №8. – С. 34-45.
- Galkin, I. A., G. M. Khmyrov, A. V. Kozlov, B. W. Reinisch, X. Huang, and V. V. Paznukhov (2008), The ARTIST 5, in *Radio Sounding and Plasma Physics*, AIP Conf. Proc. 974. –150-159. – doi:10.1063/1.2885024
- Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Мальцев А.В.. Адаптивное обнаружение и выделение широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией при сжатии его в частотной области. // *Радиотехника. Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2009. – Т14, №8. – С.34-45.
- Зыков Е.Ю. Акчурин А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования. // *ЭНЖ «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ»* <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/005.pdf> – С. 52 - 63.
- Grozov V.P., Ilyin N.V., Kotovich G.V., Ponomarchuk S.N. Software system for automatic interpretation of ionosphere sounding data // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2012. –V.22, № 3. – P.458-463.
- Grozov V.P., Nosov V.E., Ososkov G.A., Zaznobina E.G. Artificial neural networks for computer-aided ionogram analysis // *Computer Aided Processing of Ionograms and Ionosonde*: Boulder, USA. –1998. –P. 30-34.
- Bilitza D., Reinisch D.D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // *Advances in Space Research*. – 2008. – Vol. 42. – P. 599-609.
- Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий. – М.: МЦД-Б. – 1986. – 136 с.
- Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере // *Изв.вузов. Радиофизика*. – 2000. –Т. XLII, № 10. –С.855-872.
- Куркин В.И., Носов В.Е., Пономарчук С.Н., Савков С.С., Чистякова Л.В. Метод опера-

- тивной диагностики КВ радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике солнца: Новосибирск.– 1993. –Вып. 100. –С.168-188.
17. Ратовский К.Г., Степанов А.Е. Исследования ионосферы в северо-восточном регионе России с помощью цифровых ионозондов DPS-4 // Труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн»: Ростов-на-Дону. –2008.–Т.1. –С. 173-176.