
АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ АЛГОРИТМОВ

AUTOMATIC INTERPRETATION OF OBLIQUE SOUNDING IONOGRAMS BASED ON HYBRID ALGORITHMS

С.Н. Пономарчук *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru***В.П. Грозов** *Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grozov@iszf.irk.ru***S.N. Ponomarchuk***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru***V.P. Grozov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grozov@iszf.irk.ru*

Аннотация. В работе представлен метод интерпретации данных наклонного зондирования ионосферы (НЗ) непрерывным ЛЧМ-сигналом. Разработаны и реализованы гибридные алгоритмы автоматической интерпретации ионограмм по выделенным в результате вторичной обработки данных точкам со значимой амплитудой для различных гелиогеофизических условий. Для условий двуслойной ионосферы разработан метод интерпретации на основе анализа гистограмм распределения точек со значимой амплитудой, попадающих по задержке сигнала в модельную маску, построенную по результатам моделирования дистанционно-частотной характеристики мода распространения, при ее перемещении по ионограмме. Для многослойной ионосферы интерпретация проводится на основе исследования амплитудного рельефа ионограммы. Отдельно рассматриваются алгоритмы выделения треков сигналов, отраженных от спорадических слоев. Приведены результаты интерпретации ионограмм, полученных на сети радиотрасс ЛЧМ-зондирования в северо-восточном регионе России.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, распространение радиоволн, наклонное зондирование ионосферы.

Abstract. The paper presents a method of interpreting data on oblique ionosphere sounding (OS) with a continuous chirp signal. Hybrid algorithms for automatic interpretation of ionograms by selected points with significant amplitude obtained during secondary data processing for various heliogeophysical conditions have been developed and implemented. For the conditions of the two-layer ionosphere, an interpretation method has been worked out which involves analyzing histograms for the distribution of points with significant amplitude, which fall into a model mask constructed from the results of modeling of the distance-frequency characteristic for propagation when it moves over the ionogram. For the multilayer ionosphere, the interpretation is based on the study of the ionogram amplitude relief. The algorithms for extracting tracks of signals reflected from sporadic layers are examined separately. We report the results of interpretation of ionograms obtained on the network of chirp sounding radio paths in the northeastern region of Russia.

Keywords: ionosphere, ionogram, radio wave propagation, oblique ionosphere sounding.

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность радиотехнических систем КВ-диапазона зависит от согласования параметров технических средств с изменяющимися свойствами среды распространения, что определяет необходимость оснащения радиоцентров средствами диагностики ионосферы. Одним из таких средств является пространственно-распределенный ЛЧМ-ионозонд, работающий в режиме наклонного зондирования (НЗ) [Иванов и др., 2003; Подлесный и др., 2013]. Современные ЛЧМ-ионозонды НЗ широко используются для исследования и мониторинга ионосферы на протяженных трассах, включая кругосветные, в различных гелиогеофизических условиях [Ivanov et al., 1997; Куркин и др., 2000; Иванов и др., 2003; Вертоградов и др., 2008]. По результатам регистрации и обработки сигнала НЗ в приемном устройстве ЛЧМ-ионозонда формируется ионограмма [Подлесный и др.,

2014]. При построении системы диагностики и прогнозирования ионосферы и условий распространения радиоволн КВ-диапазона на базе ионозонда НЗ важна автоматизация процесса обработки и анализа экспериментальных данных в режиме, близком к реальному времени. Ключевой задачей является автоматическая интерпретация ионограмм НЗ для оперативного определения модового состава и максимальной применимой частоты (МПЧ) каждого мода, масштабирование прогнозных дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) модов распространения и построение треков по значимым точкам амплитудного рельефа регистрируемого сигнала. Временные ряды МПЧ служат исходными данными для схем оперативного и краткосрочного прогнозирования условий распространения радиоволн [Ильин и др., 2018]. Выделяемые треки сигналов с контролируемым отношением сигнал/шум являются входными

данными в алгоритмах выбора диапазона оптимальных рабочих частот на связных радиотрассах [Вертоградов и др., 2008]. Реконструкция высотного распределения электронной концентрации по трекам мода 1F2, выделяемого на ионограмме НЗ, позволяет определять основные параметры ионосферы в удаленной от передатчика и приемника области [Михайлов, Грозов, 2013; Ponomarchuk et al., 2015].

Целью работы является разработка и исследование методов автоматической интерпретации ионограмм НЗ, получаемых на базе ЛЧМ-ионозонда, для идентификации и построения треков регистрируемых сигналов в различных гелиогеофизических условиях. Алгоритмы интерпретации ионограмм НЗ базируются на результатах моделирования ДЧХ сигналов НЗ в режиме долгосрочного прогноза (ДП) и результатах вторичной обработки экспериментальных данных по амплитудному рельефу. Выбор того или иного алгоритма интерпретации ионограмм зависит от гелиогеофизических условий распространения радиоволн. Для двуслойной ионосферы используется метод интерпретации, основанный на анализе гистограмм распределения точек со значимой амплитудой, которые попадают по задержке сигнала в модельную маску, построенную по результатам моделирования ДЧХ мода распространения [Grozov et al., 2012]. Для многослойной ионосферы интерпретация сигналов проводится на основе исследования амплитудного рельефа ионограммы. Отдельно рассматриваются алгоритмы выделения треков сигналов, отраженных от спорадического слоя E_s . Приведены результаты интерпретации ионограмм, полученные на сети радиотрасс ЛЧМ-зондирования в северо-восточном регионе России.

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Для верификации приведенных ниже алгоритмов обработки и интерпретации ионограмм привлекались данные, полученные на базе пространственно-распределенного ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Kurkin et al., 2024]. Передающие пункты расположены вблизи Магадана (60° N, 150.7° E), Хабаровска (47.6° N, 134.7° E), в Норильске (69.4° N, 88.4° E), приемный пункт «Иркутск» — в с. Торы, Бурятия (51.8° N, 103° E). Все пункты оснащены устройствами временной привязки и синхронизации. Управление передающими и приемными устройствами проводится автоматически по заданным программам режимов работы. На основе передающих и приемных ЛЧМ-ионозондов создана сеть трасс НЗ ионосферы, охватывающая северо-восточный регион России [Kurkin et al., 2024].

В цифровом ЛЧМ-ионозонде ИСЗФ СО РАН регистрация сигналов проводится по схеме восстановления передаточной функции радиоканала [Подлесный и др., 2014]. Выражение для принятого сигнала $u_a(t)$ имеет вид

$$u_a(t) = H(\omega_0 + \eta t). \quad (1)$$

Здесь $H(\omega)$ — передаточная функция радиоканала; ω_0 — начальная круговая частота зондирования; η —

скорость девиации частоты. Для построения ионограммы цифровые выборки сигнала, которые соответствуют предполагаемым задержкам прихода регистрируемого сигнала, умножаются на гладкую короткую функцию времени (временное окно) с последующим вычислением спектра произведения. В результате полученный спектр является откликом радиоканала на эффективный узкополосный комплексный сигнал, форма которого как функция времени равна форме спектра окна, а несущая частота связана через скорость девиации частоты с положением окна на временной развертке сигнала. Таким образом, на выходе приемника формируется ионограмма НЗ — матрица, где каждый элемент (амплитуда) $A(f_i, P_j)$ определяется двумя характеристиками: групповым путем (задержкой сигнала) P_j и частотой f_i . Ионограмма НЗ характеризует зависимость группового времени распространения сигнала от частоты.

На рис. 1 в качестве иллюстрации показана ионограмма НЗ, полученная на трассе зондирования Хабаровск—Иркутск 7 июля 2015 г. в 04:51 UT. В отличие от аналогового ионозонда в цифровом проводится обработка данных корректирующим фильтром, что позволяет эффективно детектировать сосредоточенные помехи и удалять их без ущерба для полезного сигнала на этапе первичной обработки [Подлесный и др., 2014].

Для выделения массива точек, соответствующих моментам прихода сигналов со значимой амплитудой по отношению сигнал/шум, проводится вторичная обработка ионограммы [Grozov et al., 2012; Penzin et al., 2019], которая сводится к решению двух задач:

- проведение предобработки ионограмм для удаления шума на изображении и улучшения амплитудных характеристик;
- сжатие данных, позволяющее провести значительное сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

Для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала в промежуточных точках используется медианный фильтр, позволяющий сглаживать помехи и уменьшать размытие границ треков, а также восстанавливать значения в разрывах треков.

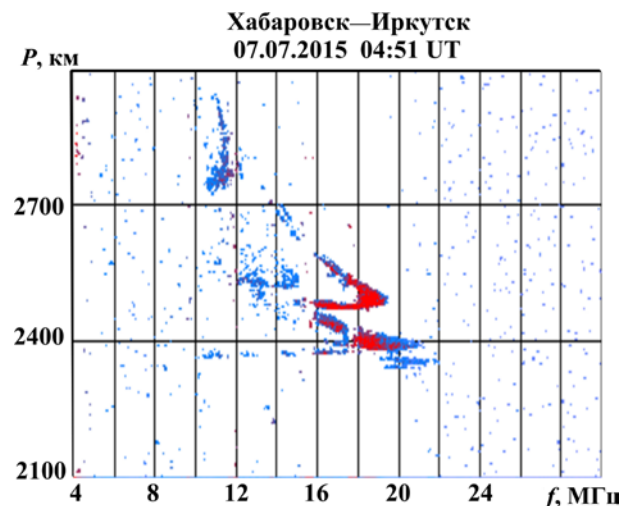


Рис. 1. Ионограмма НЗ: 07.07.2015, 04:51 UT

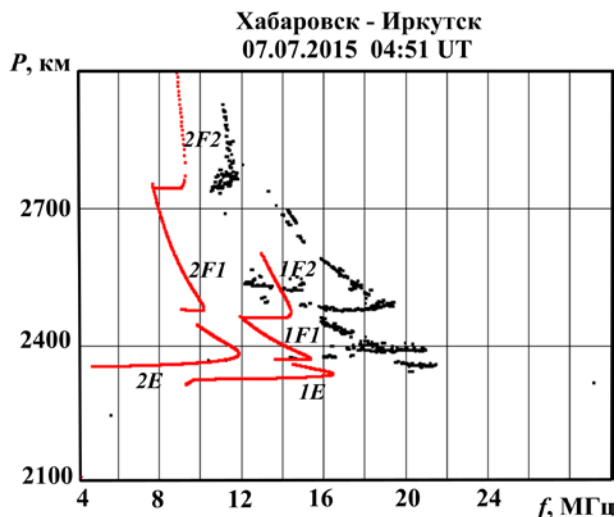


Рис. 2. Результаты обработки ионограммы НЗ и моделирования $P(f)$ 07.07.2015, 04:51 UT. Черные точки — результаты обработки, красные — $P(f)$

Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме применяется механизм клеточного автомата [Grozov et al., 2012; Penzin et al., 2019]. После вторичной обработки ионограммы НЗ формируется новая матрица экспериментальных точек $A(f_i, P_j)$, соответствующая массиву точек со значимой амплитудой $(f, P, A)_k, k = \overline{1, M}$.

На рис. 2 в качестве иллюстрации показаны результаты вторичной обработки ионограммы НЗ, приведенной на рис. 1, а также результаты расчета ДЧХ распространения сигналов $P_l^j(f)$. Здесь P — групповой путь; l — число отражений от ионосферы; j — номер канала распространения (нижней стенкой его является поверхность Земли, а верхней — слой ионосферы); для волноводных каналов E, F1, F2 $j=1, 2, 3$ соответственно. Расчеты $P_l^j(f)$ проведены методом кривых передачи [Дэвис, 1973; Котович и др., 2006] с использованием высотно-частотной характеристики (ВЧХ) вертикального зондирования, рассчитанной в средней точке радиотрассы по оперативной полуэмпирической модели ионосферы (ОПЭМИ). Оперативная модель ВЧХ была разработана в ИСЗФ СО РАН на основе разложения узловых параметров ВЧХ: $f_oE, f_oF1, f_oF2, h'F, h'F2, h_pF, h'F1$ по естественным ортогональным функциям (ЕОФ) [Dvinskikh, 1988].

Моделирование $P_l^j(f)$ позволяет провести идентификацию отдельных регистрируемых сигналов на ионограмме. На показанной на рис. 2 ионограмме НЗ можно достаточно уверенно идентифицировать сигналы, относящиеся к модам распространения 1F1, 1F2 и 2F2. Идентификация мода 1E неоднозначна из-за присутствия на ионограмме сигналов, отраженных от спорадического слоя E_s .

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ

Основной задачей интерпретации ионограмм НЗ в реальном масштабе времени является идентификация модового состава, определение МПЧ каждого

мода $f_{m,l}^j$, корректировка частотных зависимостей группового пути распространения $P_l^j(f)$ и построение треков сигналов по точкам со значимой амплитудой. Результаты интерпретации ионограммы могут быть использованы в качестве входных параметров

- при выборе диапазона оптимальных рабочих частот для заданной радиотрассы по текущим данным наклонного зондирования [Вертоградов и др., 2008];
- при решении обратной задачи определения параметров ионосферы по данным НЗ [Котович и др., 2006; Krasheninnikov et al., 1990; Михайлов, Грозов, 2013; Ponomarchuk et al., 2015; Song et al., 2016].

Условно ионограммы НЗ можно разделить на три типа: ионограммы, полученные 1) в зимний, весенний и осенний периоды года и в ночные часы летом; 2) в дневные часы летом; 3) в периоды сильных ионосферных возмущений.

Ионограммы первого типа в условиях отсутствия ионосферных возмущений характеризуются достаточно простой модовой структурой принимаемых сигналов. Основные следы отражений на ионограммах НЗ соответствуют сигналам, приходящим в точку приема путем отражения от ионосферного слоя F2. Пример ионограммы первого типа показан на рис. 3. Она получена на трассе Магадан—Иркутск 15 января 2023 г. в 09:00 UT. Штриховые черные линии — результаты моделирования ДЧХ НЗ $P(f)$, которые позволяют идентифицировать на ионограмме сигналы, пришедшие в точку приема путем однократного, двукратного и трехкратного отражения от слоя F2, — 1F2, 2F2 и 3F2 соответственно. Модовая структура регистрируемого сигнала усложняется в условиях присутствия крупномасштабных ионосферных неоднородностей на трассе распространения радиоволн. В качестве примера на рис. 4 показана ионограмма НЗ на трассе Хабаровск—Иркутск, полученная 4 января 2014 г. в 02:16 UT. На ионограмме идентифицированы сигналы 1F2, 2F2 и 3F2. Сигналы, отраженные от слоя E, выражены слабо — диапазон частот 8–12 МГц. Между основными модами распространения 1F2 и 2F2, 2F2 и 3F2 присутствуют так называемые m-моды за счет различных комбинаций основного отражения от слоя F2 с промежуточными отражениями от слоя E (обозначены m) [Дэвис, 1973, Благовещенский и др., 2018]. В случае присутствия перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на радиотрассе на верхнем луче Педерсона основного мода распространения 1F2 наблюдаются серпообразные треки, соответствующие отражениям от среднemasштабных ПИВ [Kurkin et al., 2024] (отмечены стрелкой ПИВ).

Примером ионограммы второго типа является ионограмма НЗ, полученная на трассе Хабаровск—Иркутск 7 июля 2015 г. в 04:51 UT (см. рис. 2). Многослойная структура ионосферы приводит к появлению на ионограммах НЗ дополнительных сигналов, отраженных от слоя F1. Отличительной особенностью летних дневных ионограмм НЗ является присутствие ярко выраженных следов, соответствующих задержкам прихода сигналов, отраженных от спорадического слоя E_s . В отдельные летние дневные

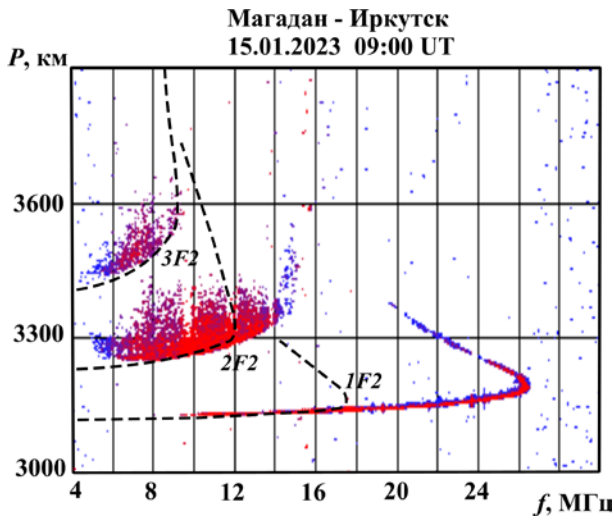


Рис. 3. Ионограмма НЗ и результаты моделирования $P(f)$: 15.01.2023, 09:00 UT. Черная штриховая линия — $P(f)$

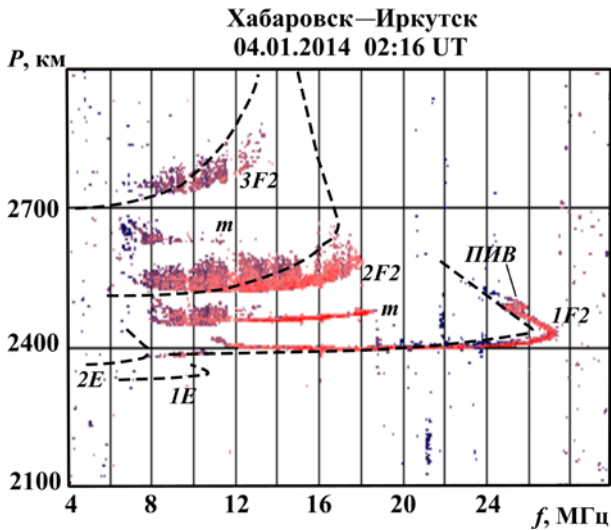


Рис. 4. Ионограмма НЗ и результаты моделирования $P(f)$ 04.01.2014, 02:16 UT. Черная штриховая линия — $P(f)$

периоды времени слой E_s становится доминирующим на трассе, что приводит к полной экранировке вышележащих отражающих слоев ионосферы F1 и F2. Максимальная рабочая частота приема сигналов, отраженных от слоя E_s , может превышать предельную частоту передатчика. В летний период регулярно регистрируются также среднemasштабные ПИВ и m-моды распространения.

К отдельному третьему типу относятся ионограммы, полученные в периоды ионосферных возмущений, вызванных главным образом сильными магнитными бурями. Во время геомагнитных возмущений авроральный овал и главный ионосферный провал (ГИП) смещаются на более низкие широты, что приводит к изменению модовой структуры сигнала [Урядов и др., 2004; Благовещенский и др., 2018]. Ионосферные неоднородности различных масштабов вблизи южной границы аврорального овала приводят к значительным вариациям максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) [Kurkin et al., 2008], увеличению диффузности сигналов стандартных модов распространения и появлению дополнительных сигналов с задержками, превышающими за-

держки основных модов, распространяющихся вдоль дуги большого круга. Для интерпретации таких сигналов необходимы специальные методы расчета характеристик распространения и модели ионосферы, включающие крупномасштабные структуры типа ГИП и модели неоднородностей. Поэтому в данной работе вопрос интерпретации ионограмм третьего типа не рассматривается.

Метод интерпретации ионограмм НЗ базируется на использовании результатов моделирования $P_1^j(f)$ на заданной трассе в режиме долгосрочного прогноза и обработки экспериментальных ионограмм $(f, P, A)_k$, $k = \overline{1, M}$ [Grozov et al., 1996; Пономарчук и др., 2013]. Основой метода являются адиабатические инварианты — величины, сохраняющиеся при вариациях параметров ионосферы в пределах погрешности долгосрочного прогноза (20 %), а именно,

- отношение группового пути $P_{m,l}^j$ в точке смыкания нижнего и верхнего лучей к длине трассы D $\gamma = P_{m,l}^j / D$;
- частотная зависимость группового пути $P_1^j(f)$ мода на относительной сетке частот $\beta = f / f_{m,l}^j$, где $f_{m,l}^j$ — МПЧ мода для рассматриваемой дальности $P_1^j(\beta)$;
- отношение МПЧ модов различных кратностей, распространяющихся в одном из волноводных каналов $\chi = f_{m,l}^j / f_{m,l\pm 1}^j$.

Рассмотрим алгоритм интерпретации ионограмм НЗ первого типа. Вначале проводится разделение мод сигнала. Для этого рассчитываются $P_1^j(f)$ для заданной трассы в режиме долгосрочного прогноза. По результатам расчета строится модельная маска для мода минимальной кратности l_{\min} слоя F, включающая две полосы шириной ΔP (км) по вертикали: 1) для нижнего луча с частотой от μf_m^p до f_m^p , где f_m^p — прогнозная МПЧ опорного мода; 2) для верхнего луча с частотой от νf_m^p до f_m^p . Значения μ и ν можно варьировать (эмпирически подобранные значения $\mu \cong 0.7$, $\nu \cong 0.8$). На рис. 5 показана маска односкачкового мода 1F2 на относительной сетке частот $\beta = f / f_{m,1}^3$ для ионограммы НЗ, полученной 15 января 2023 г. в 09:00 UT (см. рис. 3). Синей линией показаны результаты расчета $P_1^3(f)$ мода распространения 1F2, черными точками — результаты вторичной обработки ионограммы, красной штриховой линией — положение модельной маски долгосрочного прогноза.

Алгоритм идентификации опорного мода (мода минимальной кратности) на ионограмме заключается в подсчете числа точек со значимой амплитудой в модельной маске на относительной сетке частот при ее движении по ионограмме. Маска движется без поворотов путем совмещения носика маски с точками со значимой амплитудой $(f, P, A)_k$, $k = \overline{1, M}$. При движении подсчитывается число точек N_k , попадающих

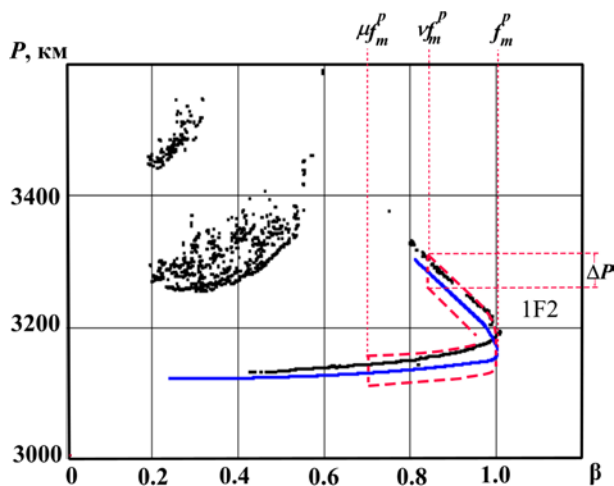


Рис. 5. Результаты обработки ионограммы НЗ и модельная маска мода 1F2 на относительной сетке частот β 15.01.2023, 09:00 UT. Черные точки — результаты обработки, красная штриховая линия — маска

в маску в пределах прямоугольников $\Delta f \times \Delta P$ с центром в каждой точке маски, где Δf и ΔP подбираются исходя из разрешения ионозонда по дальности и частоте. Значения частоты f_m^r и группового пути P_m^r , при которых достигается максимум числа точек, попадающих в маску, принимаются за реальные МПЧ и точку смыкания верхнего и нижнего лучей мода распространения. Если максимальное число точек, попадающих в маску, меньше некоторого числа, считается, что мод кратности l_{\min} не идентифицирован и процедура повторяется для мода кратности $l_{\min}+1$. Переход на мод кратности $l_{\min}+1$ необходимо сделать также в случае, если опорный мод выходит за правый край ионограммы — МПЧ мода больше предельной частоты зондирования. Поэтому предварительно перед идентификацией опорного мода требуется просканировать правый край ионограммы прямоугольной маской с размерами ~ 1000 кГц по горизонтали и ΔP по вертикали. Интерпретацию мода распространения в этом случае можно провести также по регистрируемым трекам для нижнего и верхнего лучей, попадающих в модельную маску.

В случае определения f_m^r и P_m^r корректируется $P^{\text{mod}}(f)$ путем масштабирования по частоте множителем f_m^r / f_m^p . В результате получаем частотную зависимость группового пути $P^{\text{real}}(f)$, по которой строится трек для интерпретированного мода распространения. Для этого из массива $(f, P)_k, k = \overline{1, M}$ выбираются точки, попадающие в полосы шириной ΔP вдоль линии частотной зависимости группового пути $P^{\text{real}}(f)$, привязанной к точке (f_m^r, P_m^r) . Далее проводится линейная интерполяция точек трека на равномерной сетке частот.

По идентичному алгоритму проводится интерпретация модов большей кратности и модов распространения в других каналах. Для повышения быстродействия алгоритма построения гистограммы распределения числа точек, попадающих в модельную маску, определяются ориентировочные значения f_m^r и P_m^r с использованием адиабатических инвариантов

$\gamma = P_{m,l}^j / D$ и $\chi = f_{m,l}^j / f_{m,l\pm 1}^j$. Тем самым выделяются локальные области на ионограмме, в пределах которых перемещается модельная маска.

Разработанная схема интерпретации модов распространения позволяет проводить восстановление $P^{\text{real}}(f)$ сигналов НЗ на заданной трассе, когда отсутствуют какие-либо стандартные моды распространения или возникают проблемы их идентификации в силу многолучевости и диффузности. Восстановление $P^{\text{real}}(f)$ проводится по следующей схеме. Рассчитываются $P_l(f)$ по прогнозной модели ионосферы и прогнозные адиабатические отношения МПЧ модов различной кратности $\chi = f_{m,l}^p / f_{m,l\pm 1}^p$, где l — кратность мода, присутствующего на ионограмме. Далее определяется экспериментальное значение МПЧ мода $f_{m,l}^r$ кратности l и вычисляются значения $f_{m,l\pm 1}^r = f_{m,l}^r / \chi$. Определив реальные МПЧ и имея расчеты группового пути по прогнозным параметрам ионосферы на относительной сетке частот $\beta = f / f_{m,l\pm 1}^p$, можно восстановить $P_{l\pm 1}^{\text{real}}(f)$ НЗ отсутствующих модов на текущий момент времени умножением β на $f_{m,l\pm 1}^r$.

Сигналы, соответствующие отражениям от слоя E, на ионограммах первого типа, за исключением летнего периода года, регистрируются в узком частотном диапазоне, и их амплитуды малы. Выделенные в результате обработки точки со значимой амплитудой, соответствующие нижним лучам для модов распространения E и F, в низкочастотной области по задержке близки, поэтому их разделение в автоматическом режиме затруднено. В летний период года треки сигналов, отраженных от слоя E, можно выделить и идентифицировать, используя модельную маску, построенную по долгосрочному прогнозу $P_l^j(f)$. При этом трек мода E переходит в трек мода E_s, поэтому их разделение также затруднено.

Для интерпретации сигналов, отражающихся от слоя E_s, используется процедура выделения точек со значимой амплитудой для сигналов с почти постоянной задержкой в выделенных коридорах по групповому пути на ионограммах НЗ. Для радиотрасс протяженностью меньше 3000 км границы коридоров можно рассчитать в рамках плоского волновода Земля—ионосфера, используя теорему эквивалентности в модифицированном методе кривых передачи. Угол падения луча на слой ϕ согласно теореме эквивалентности в модифицированном методе кривых передачи связан с действующей высотой h' формулой [Котович и др., 2006]

$$\phi = \arctg \left(\frac{\sin(D/(2R))}{x - \cos(D/(2R))} \right), \quad (2)$$

где $x = \frac{R+h'}{R}$; R — радиус Земли. Групповой путь распространения дециметрового сигнала P при наклонном распространении определяется следующим образом:

$$P = 2R \frac{\sin(\Omega - \varphi)}{\sin \varphi}, \quad (3)$$

где $\Omega = \arcsin(x \sin \varphi)$. Предположим, что действующая высота, на которой находится слой E_s в средней точке трассы, равна 105 км. По формуле (3) рассчитаем групповой путь P_n при отражении сигнала на уровне 105 км для первого и второго скачков, если длина трассы меньше 2000 км, и для второго и третьего скачков, если длина трассы больше или равна 2000 км. По значениям этих границ из массива точек со значимой амплитудой $(f, P, A)_k, k = \overline{1, M}$ формируются треки сигналов в выделенных рассчитанных коридорах по групповому пути. Интерпретация треков проводится с учетом числа отражений от слоя E_s . По выбранным трекам E_s определяется МНЧ и групповой путь для каждого мода. Если встречаются участки отсутствия трека шириной по частоте более 400 кГц, левая и правая граница частотного диапазона выбираются в пределах непрерывности трека. Если участки отсутствия трека меньше 400 кГц, начальная и конечная границы E_s выбираются по крайним значениям частоты трека.

На рис. 6 показаны результаты обработки ионogramмы НЗ, полученной на трассе Магадан — Иркутск 15 января 2023 г. в 09:00 UT, и результаты интерпретации модов распространения 1F2, 2F2 и 3F2 в автоматическом режиме. Серые точки — результаты обработки ионogramмы НЗ, красные точки — результаты восстановления частотных зависимостей группового пути $P^{real}(f)$, синие точки — выделенные треки сигналов. На рис. 7 показаны результаты обработки и интерпретации ионogramмы НЗ, полученной на трассе Магадан — Иркутск 11 августа 2014 г. в 00:00 UT. Результаты интерпретации модов распространения 2E, 1F2 и 2F2 отмечены красными точками, результаты обработки ионogramмы — серыми, результаты выделения треков — синими. В отличие от зимних условий в летний период года в утренние часы на ионogramме НЗ регистрируются сигналы, отраженные от слоя E_s . Выделенный и идентифицированный в автоматическом режиме трек мода $2E_s$ отмечен синими точками.

Основные трудности автоматической интерпретации ионogramм НЗ возникают в летние периоды года в условиях распространения радиоволн в многоканальном волноводе Земля — ионосфера, образованном многослойной ионосферой и поверхностью Земли. Модовая структура принимаемых сигналов усложняется даже при отсутствии различного рода ионосферных возмущений. Помимо стандартных модов распространения от ионосферных слоев E и F, на ионogramмах НЗ присутствуют m-моды и сигналы, отраженные от слоя E_s . Применение развитой выше схемы интерпретации ионogramм на основе построения модельных масок по долгосрочному прогнозу затруднено в силу двух основных причин. Необходимо наличие а) моделей ионосферы, адекватно описывающих высотное распределение электронной концентрации в области слоя F1 и в нижней ионосфере; б) оперативных алгоритмов расчета траекторных характеристик распространения в много-

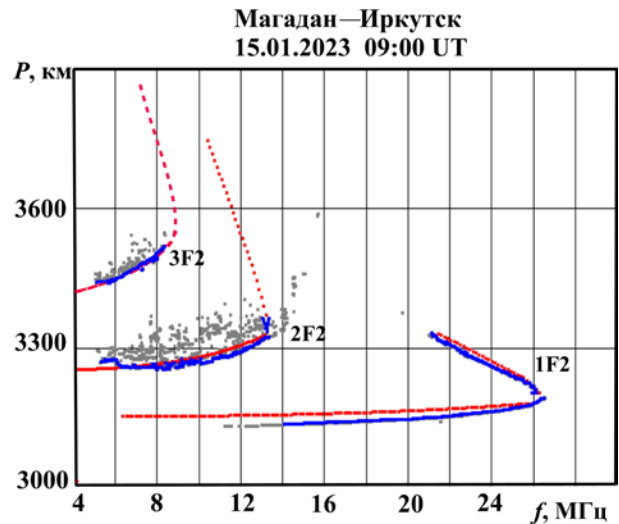


Рис. 6. Результаты обработки и интерпретации ионogramмы НЗ 15.01.2023, 09:00 UT. Серые точки — результаты обработки, красные — $P^{real}(f)$, синие — треки сигналов

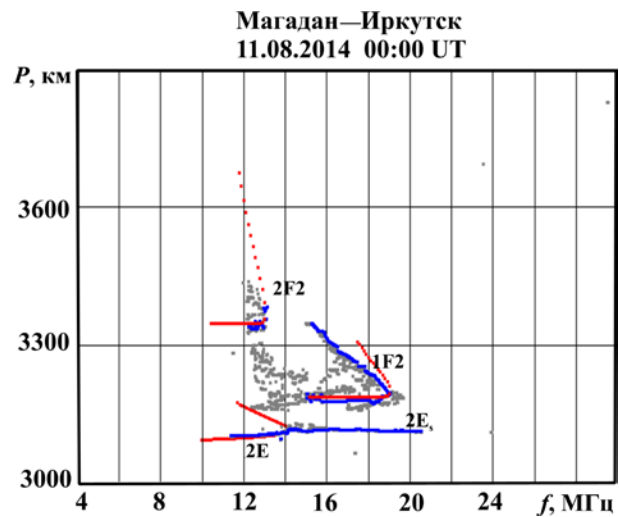


Рис. 7. Ионogramма НЗ 11.08.2014, 00:00 UT. Обозначения те же, что на рис. 6

слойной замагниченной ионосфере. Дополнительные затруднения возникают при разделении по групповой задержке сигналов, отраженных от слоев E_s и F1.

Для интерпретации летних ионogramм НЗ был разработан гибридный алгоритм на основе анализа амплитудных характеристик принимаемого сигнала. Рассчитываются амплитудно-частотная характеристика $\Phi(f) = \sum_j A^2(f_i, P_j)$ (суммирование проводится

по точкам дистанционной временной развертки сигнала P_j на фиксированной частоте f_i) и амплитудно-дистанционная характеристика $\Psi(P) = \sum_i A^2(f_i, P_j)$

(суммирование проводится по точкам частотного диапазона f_i для фиксированного группового пути P_j). Рассмотрим основные элементы алгоритма интерпретации на примере ионogramмы НЗ, полученной на трассе Хабаровск — Иркутск 7 июля 2015 г. в 04:51 UT и приведенной на рис. 1. На рис. 8 показаны результаты вторичной обработки ионogramмы НЗ, зависимости $\Phi(f)$ и $\Psi(P)$, расчетные границы коридоров для сигналов, отраженных от слоя E_s . Точки со значимой

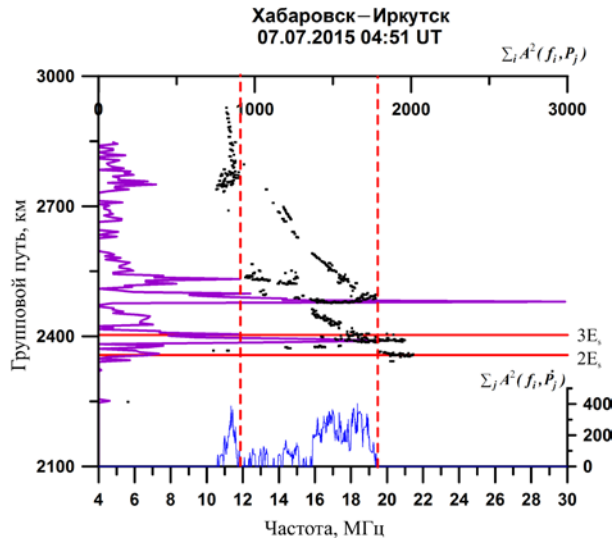


Рис. 8. Ионограмма НЗ — серые точки; синяя линия — $\Phi(f)$; бордовая линия — $\Psi(P)$; красные линии — границы E_s

амплитудой отмечены серым, красные линии — нижние границы коридоров прихода двухскачковых и трехскачковых модов распространения посредством отражения от слоя E_s , бордовые и синие линии — усредненные по трем точкам зависимости $\Psi(P)$ и $\Phi(f)$ соответственно. Амплитудно-дистанционная характеристика $\Psi(P)$ рассчитывается по точкам $(f, P, A)_k, k = \overline{1, M}$. Способ расчета $\Phi(f)$ будет приведен ниже.

Видно, что локальные максимумы в зависимости $\Psi(P)$ определяют на ионограмме местоположение сигналов, отраженных от разных слоев ионосферы. Исходя из результатов расчета $P_i^j(f)$ по долгосрочному прогнозу и расчета коридоров прихода отраженных от слоя E_s сигналов, можно предварительно идентифицировать треки сигналов на ионограмме по зависимости $\Psi(P)$. Первый максимум в $\Psi(P)$ соответствует времени прихода односкачкового сигнала, отраженного от слоев E или E_s — мод 1E или $1E_s$; второй максимум — двухскачковому моду $2E_s$ и односкачковому моду 1F1; третий максимум — моду 1F2. С учетом границ коридоров E_s и результатов долгосрочного прогноза $P_i^1(f)$ из массива точек со значимой амплитудой $(f, P, A)_k, k = \overline{1, M}$ формируются треки сигналов, отраженных от слоев E и E_s . Если в долгосрочном прогнозе $P_i^1(f)$ имеются моды E, то методом модельной маски определяется МПЧ мода минимальной кратности l_{\min} , корректируются модельная ДЧХ $P_{l_{\min}}^1(f)$ и строится трек мода E. Из оставшихся точек со значимой амплитудой формируются и идентифицируются треки сигналов, отраженных от E_s . По выделенным трекам определяется правая частотная граница f_{m, E_s} слоя E_s и максимальное значение группового пути P_{E_s} сигналов, отраженных от E и E_s .

Затем определяются области на ионограмме, в которых будет осуществляться поиск и интерпретация сигналов, отраженных от слоев F1 и F2 методом модельной маски. Для этого делается обрезка

ионограммы снизу по значению P_{E_s} , т. е. формируется новый массив точек со значимой амплитудой $(f, \tilde{P}, A)_n, n = \overline{1, N}$, в котором $\tilde{P} > P_{E_s}, N < M$. По новому массиву точек со значимой амплитудой рассчитывается $\Phi(f) = \sum_j A^2(f, \tilde{P}_j)$. Анализ частотной зависимости $\Phi(f)$ позволяет определить МНЧ модов распространения относительно заданного начального уровня амплитуды сигнала, зависящего от отношения сигнал/шум. На рис. 8 вертикальные штриховые линии определяют значения МНЧ для модов 1F1, 1F2 и 2F2, равные 19.3 и 11.9 МГц соответственно. Точка пересечения вертикальной линии МНЧ с горизонтальной линией, соответствующей локальному максимуму зависимости $\Psi(P)$, позволяет определить примерное расположение точки смыкания верхнего и нижнего лучей и МПЧ для модов распространения 1F1, 1F2 или 2F2. Далее для более точного определения МПЧ модов, корректировки прогнозных $P_1^2(f), P_1^3(f), P_2^3(f)$ и построения треков сигналов применяется алгоритм модельной маски.

На рис. 9 показана ионограмма НЗ на трассе Хабаровск—Иркутск, полученная 7 июля 2015 г. в 04:51 UT, с результатами интерпретации и построения треков модов распространения $1E_s, 2E_s, 1F1, 1F2$ и $2F2$. Серые точки — моменты прихода сигналов со значимой амплитудой, красные — результаты интерпретации модов распространения $P^{\text{real}}(f)$, бордовые — треки $1E_s$ и $2E_s$, синие — треки 1F1, 1F2 и 2F2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Тестирование разработанных алгоритмов для автоматической обработки и интерпретации ионограмм НЗ проводилось на большом массиве экспериментальных данных, полученных в северо-восточном регионе России на сети радиотрасс Магадан — Иркутск, Хабаровск — Иркутск, Норильск — Иркутск [Kurkin et al., 2008]. Для оценки достоверности вычислялись относительные ошибки $\delta = (f_m^{\text{manual}} - f_m^a) / f_m^{\text{manual}} \cdot 100 \%$,

где $f_m^{\text{manual}}, f_m^a$ — МНЧ мода распространения, полученные в результате ручной и автоматической обработки ионограмм соответственно. На рис. 10, 11 показаны распределения относительной ошибки определения МНЧ мода 1F2 на трассах Хабаровск—Иркутск и Магадан—Иркутск в марте 2014 г. Генеральная выборка для каждого месяца составляла 8928 ионограмм.

На рис. 12 приведены суточные вариации предельной частоты МНЧ $_{E_s}$ отражения сигналов от слоя E_s на трассе Магадан—Иркутск 11 июля 2015 г. Черные и красные точки — результаты ручной и автоматической обработки ионограмм НЗ. На рис. 13, 14 показаны суточные вариации МНЧ модов распространения 1F1 и 1F2 соответственно МНЧ $_{1F1}$ и МНЧ $_{1F2}$ на трассе Магадан—Иркутск 11 июля 2015 г. На рис. 15–17 показаны суточные вариации МНЧ $_{1F} = \max(\text{МНЧ}_{1F1}, \text{МНЧ}_{1F2})$ в этот период времени на трассах Магадан—Иркутск, Хабаровск—Иркутск и Норильск—Иркутск соответственно.

Стандартные отклонения относительных ошибок определения модов распространения, %

Дата	Магадан—Иркутск				Хабаровск—Иркутск			
	МНЧ _{E_s}	МНЧ _{1F1}	МНЧ _{1F2}	МНЧ _{1F}	МНЧ _{E_s}	МНЧ _{1F1}	МНЧ _{1F2}	МНЧ _{1F}
август 2014	6.89	7.34	5.78	6.21	6.11	3.25	3.67	5.83
июль 2015	5.54	6.15	7.27	4.0	9.56	10.26	8.45	6.87

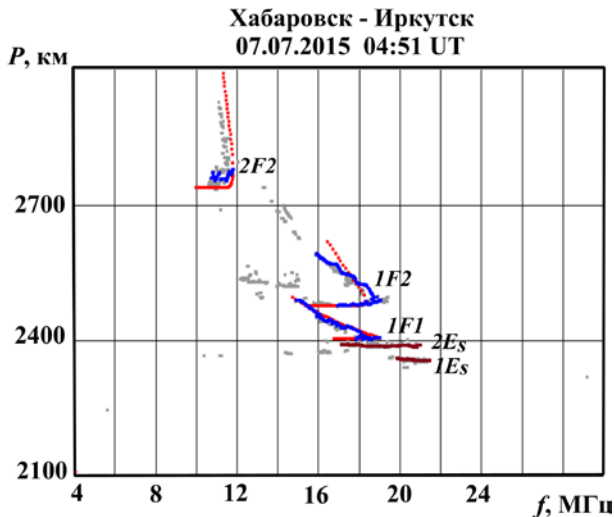


Рис. 9. Результаты обработки и интерпретации ионограммы НЗ 07.07.2015, 04:51 UT. Серые точки — результаты обработки; красные — $P^{real}(f)$; синие — треки сигналов

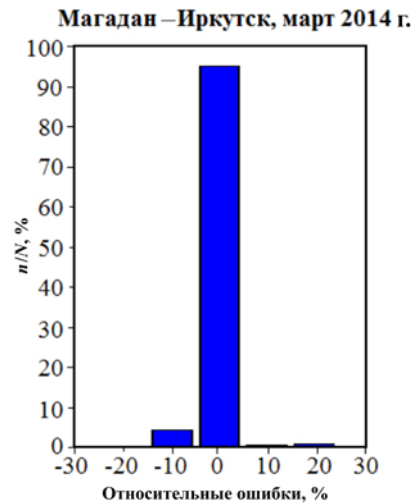


Рис. 11. То же, что на рис. 10, для трассы Магадан—Иркутск в марте 2014 г.

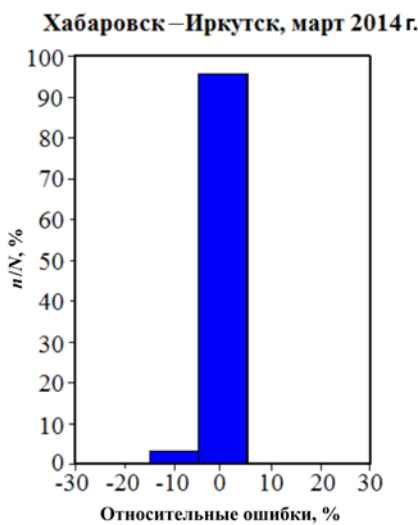


Рис. 10. Распределение относительных ошибок определения МНЧ мода 1F2 на трассе Хабаровск — Иркутск в марте 2014 г.

В таблице даны результаты тестирования разработанных алгоритмов на сети радиотрасс ЛЧМ-зондирования в летний период года — стандартные отклонения относительных ошибок определения МНЧ модов распространения в процентах. Генеральная выборка для каждого месяца составляла 8928 ионограмм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанные методы анализа и интерпретации ионограмм НЗ позволяют в автоматическом режиме проводить оперативное определение модового состава и МПЧ каждого мода, коррек-

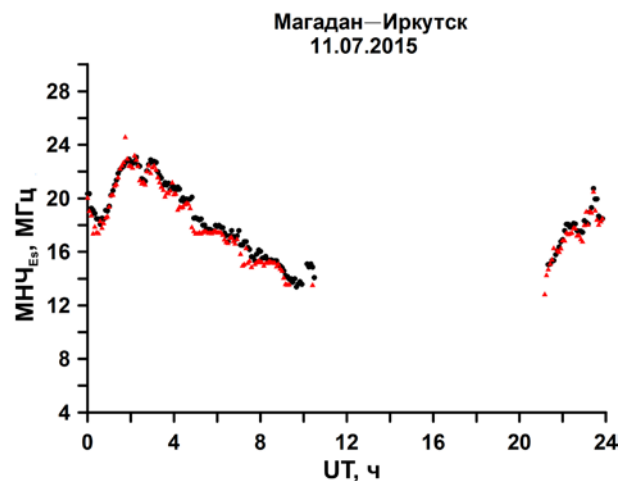


Рис. 12. Суточные вариации предельной частоты мода МНЧ_{E_s} на трассе Магадан—Иркутск 11 июля 2015 г. Черные и красные кривые — ручная и автоматическая обработка

тировать ДЧХ модов распространения, выделять треки регистрируемых сигналов по значимым точкам амплитудного рельефа ионограммы. Выходными характеристиками разработанных алгоритмов интерпретации являются: МНЧ модов распространения 1F2, 2F2, 1F1, предельные частоты слоя E_s, идентифицированные треки сигналов. Новыми являются алгоритмы разделения сигналов, отраженных от слоев E_s, 1F1 и 1F2 на основе исследования амплитудно-дистанционной характеристики $\Psi(P)$, построенной по значимым точкам амплитудного рельефа. Новыми являются также алгоритмы определения МНЧ основных модов распространения на основе анализа амплитудно-частотной зависимости $\Phi(f)$ по заданному отношению сигнал/шум.

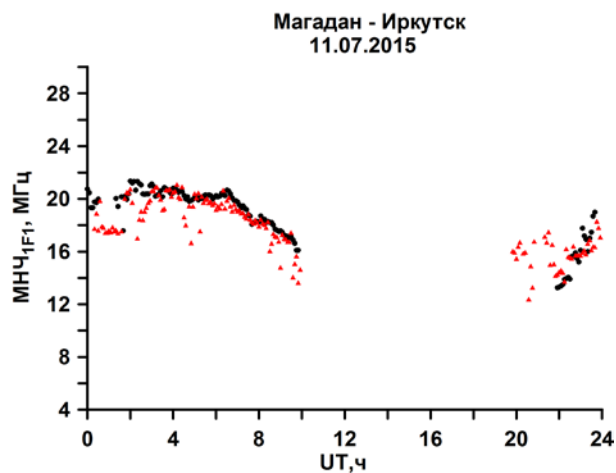


Рис. 13. То же для $MNЧ_{1F1}$



Рис. 16. То же для $MNЧ_{1F1}$ на трассе Хабаровск—Иркутск

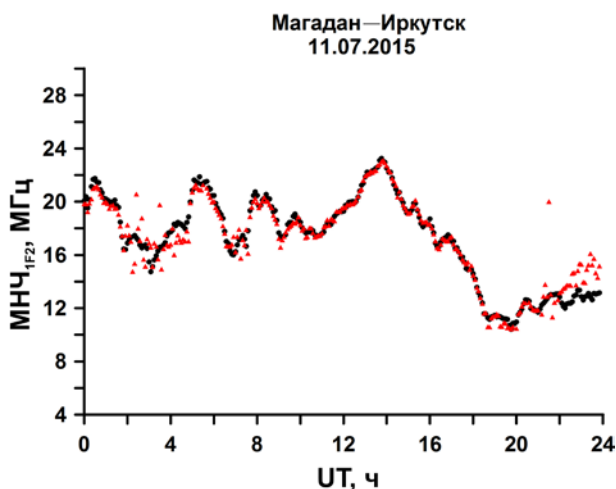


Рис. 14. То же для $MNЧ_{1F2}$

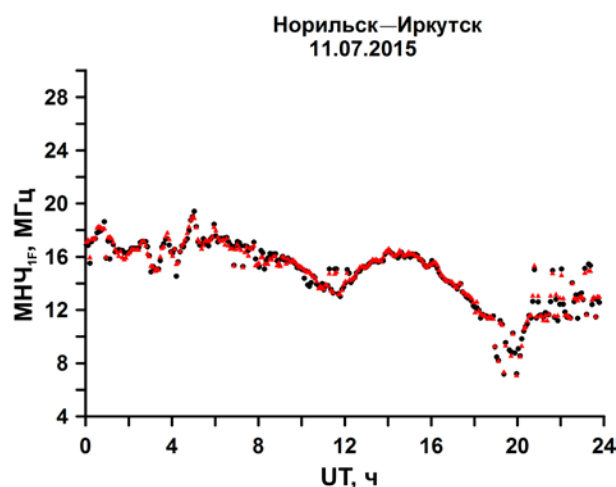


Рис. 17. То же для $MNЧ_{1F1}$ на трассе Норильск—Иркутск

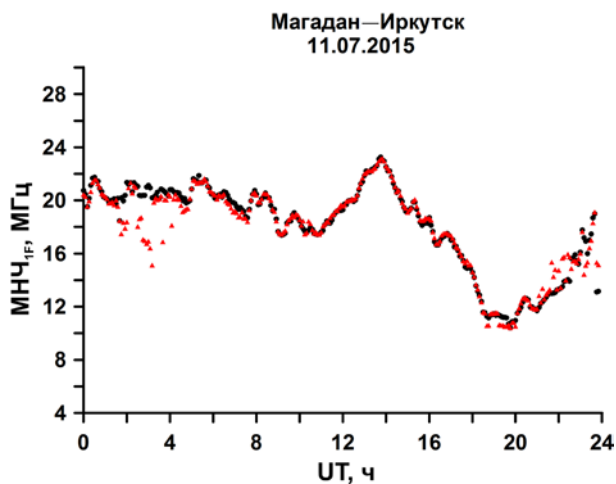


Рис. 15. То же для $MNЧ_{1F1}$

Результаты интерпретации ионограмм могут использоваться при выборе диапазонов оптимальных рабочих частот для заданной радиотрассы по текущим данным НЗ; при решении обратной задачи определения параметров ионосферы по данным НЗ. Для решения этих задач необходимо усовершенствовать процедуру построения треков регистрируемых сигналов по скорректированной ДЧХ наклонного зондирования $P^{real}(f)$ с учетом многолучевости и рассеяния сигналов на ионосферных неоднородно-

стях и шероховатостях земной поверхности. Другими словами, необходимо добиться оптимального вписывания кривой $P^{real}(f)$ в облако экспериментальных точек со значимой амплитудой, выделенных в результате вторичной обработки ионограммы. Выделенные треки экспериментальных точек с заданным отношением сигнал/шум могут использоваться в качестве входных данных в алгоритмах выбора оптимальных рабочих частот (например [Вертоградов и др., 2008]). Для решения обратной задачи определения параметров ионосферы по данным НЗ необходимо правильно выделить верхний луч однократного мода 1F2 для более точного определения критической частоты F2-слоя.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Благовещенский Д.В., Жбанков Г.А., Мальцева О.А. Реальные и расчетные ионограммы наклонного зондирования ионосферы на коротковолновых радиотрассах во время магнитной бури 7–8 сентября 2017 года. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 12. С. 991–1004.

Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградова Е.Г. Расчет оптимальных рабочих частот связной радиолнии по данным наклонного зондирования ионосферы. *Изв. вузов Радиофизика*. 2008. Т. 51, № 1. С. 10–21.

Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 502 с.

Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ-иозонд и его применение в ионосферных исследованиях. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.

Ильин Н.В., Бубнова Т.В., Грозов В.П. и др. Оперативный прогноз МПЧ радиотрасс по текущим данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 3. С. 103–113. DOI: [10.12737/szf-43201811](https://doi.org/10.12737/szf-43201811).

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я. и др. Определение критической частоты f_oF2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита. *Геоматематизм и аэрономия*. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

Куркин В.И., Носов В.Е., Матюшонок С.М. и др. Особенности распространения кругосветных сигналов на трассах Российской сети ЛЧМ-иозондов в годы низкой и средней активности. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000. Т. 43, № 10. С. 843–854.

Михайлов С.Я., Грозов В.П. Реконструкция немонотонного высотного профиля плазменной частоты по данным наклонного зондирования ионосферы. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2013. Т. 56, № 7. С. 443–457.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-иозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

Подлесный А.В., Лебедев В.П., Ильин Н.В., Хахинов В.В. Реализация метода восстановления передаточной функции ионосферного радиоканала по результатам зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19, № 1. Р. 63–70.

Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Михайлов С.Я. Обработка и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования для диагностики ионосферы на базе ЛЧМ-иозонда. *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. акад. М.Ф. Решетнева*. 2013. Спец. вып. 5 (51). С. 163–166.

Урядов В. П., Куркин В.И., Вертоградов Г.Г. и др. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47, № 12. С. 1041–1056.

Dvinskikh N.I. Expansion of ionospheric characteristics fields in empirical orthogonal functions. *Adv. Space Res.* 1988. Vol. 8, no. 4. P. 179–187. DOI: [10.1016/0273-1177\(88\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(88)90238-4).

Grozov V.P., Kurkin V.I., Nosov V.E., Ponomarchuk S.N. An interpretation of data oblique-incidence sounding using the chirp-signal. *Proceedings of ISAP'96, Chiba, Japan*. 1996. P. 693–696.

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. Vol. 22, no. 3. P. 458–463.

Ivanov V.A., Ryabova N.A., Shumayev V.V., Uryadov V.P. Forecasting and updating HF channel parameters on the basis of oblique chirp sounding. *Radio Sci.* 1997. Vol. 32, no. 3. P. 983–988.

Krashennnikov I.V., Liannyoy B.E. Estimation of the true ionospheric height profile, with a continuous gradient, from oblique sounding data. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1990. Vol. 52, no. 2. P. 113–117.

Kurkin V.I., Pirog O.M., Polekh N.V., et al. Ionospheric response to geomagnetic disturbances in the north-eastern region of Asia during the minimum of 23rd cycle of solar activity. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008. Vol. 70, no. 18. P. 2346–357. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.022).

Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia. *Adv. Space Res.* 2024. Vol. 73, no. 7. P. 3613–3623. DOI: [10.1016/j.asr.2023.09.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.020).

Penzin M.S., Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kurkin V.I. Real-time techniques for interpretation of ionospheric backscatter sounding data. *Radio Sci.* 2019. Vol. 54, iss. 5. P. 480–491. DOI: [10.1029/2018RS006656](https://doi.org/10.1029/2018RS006656).

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kim A.G., et al. The near real-time diagnostics of ionosphere parameters at the middle point of the radio path on the base of oblique sounding data. *Proc. of SPIE*. 2015. Vol. 9680. 96805E. DOI: [10.1117/12.2203589](https://doi.org/10.1117/12.2203589).

Song H., Hu Y., Jiang C., et al. An automatic scaling method for obtaining the trace and parameters from oblique ionogram based on hybrid genetic algorithm. *Radio Sci.* 2016. Vol. 51, no. 12. P. 1838–1854. DOI: [10.1002/2016RS005987](https://doi.org/10.1002/2016RS005987).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 15 января 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Автоматическая интерпретация ионограмм наклонного зондирования на основе гибридных алгоритмов. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 2. С. 109–118. DOI: [10.12737/szf-102202410](https://doi.org/10.12737/szf-102202410).