

---

**ДИАГНОСТИКА КВ-РАДИОКАНАЛА  
ПО ДАННЫМ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ  
НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-СИГНАЛОМ**

**DIAGNOSTICS OF HF RADIO CHANNEL:  
BASED ON DATA FROM BACKSCATTER IONOSPHERIC SOUNDING  
BY CONTINUOUS CHIRP SIGNAL**

**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***Г.В. Котович***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kotovich@iszf.irk.ru***В.И. Куркин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, kurkin@iszf.irk.ru***М.С. Пензин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,  
Иркутск, Россия, penzin@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***G.V. Kotovich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kotovich@iszf.irk.ru***V.I. Kurkin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, kurkin@iszf.irk.ru***M.S. Penzin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,  
Irkutsk, Russia, penzin@iszf.irk.ru*

**Аннотация.** Возвратно-наклонное зондирование ионосферы (ВНЗ) является мощным инструментом для мониторинга и прогноза условий функционирования систем КВ-связи. Метод ВНЗ применяется для определения зон покрытия радиопередающих средств, максимальных применимых частот радиосвязи и расстояния по земле до источника рассеяния, а также для получения информации о структуре и состоянии ионосферы. Для решения этих задач в работе предлагается метод прямой диагностики КВ-радиоканала по переднему фронту сигналов ВНЗ на ионограммах. Метод базируется на автоматической обработке и интерпретации ионограмм ВНЗ в режиме реального времени. Приведены алгоритмы определения максимальных применимых частот и характеристик сигналов наклонного зондирования по текущим данным ВНЗ, минуя коррекцию параметров ионосферы. Реализован алгоритм восстановления параметров ионосферы в средней точке радиотрассы.

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

**Abstract.** Backscatter ionospheric sounding (BIS) is a powerful tool for monitoring and predicting conditions of operation of HF communication systems. The BIS method is adopted to determine coverage areas of radio waves and maximum usable radio frequencies, distance along the ground to a scatterer, as well as to gain information about ionospheric structure and conditions. To solve these problems, we propose a method for direct diagnostics of HF radio channel at the front edge of BIS signals on ionograms. The method relies on real-time automatic processing and interpretation of BIS ionograms. We present algorithms for determining the maximum usable frequencies and characteristics of oblique sounding signals from current BIS data, without correcting ionospheric parameters. We realize the algorithm for recovering ionospheric parameters at the path midpoint.

**Keywords:** ionosphere, ionogram, radio wave propagation, backscatter ionosphere sounding.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Возвратно-наклонное зондирование (ВНЗ) прочно вошло в практику исследования ионосферы наряду с вертикальным (ВЗ) и наклонным (НЗ) зондированием начиная с 40-х гг. XX в., и имеется опыт по применению его для прогнозирования условий работы на линиях радиосвязи [Вепнер, 1949; Кабанов, Осетров, 1965; Чернов, 1971]. При ВНЗ сигнал подвергается влиянию тех же факторов, которые

действуют на сигналы магистральных радиолиний. Поэтому естественно ожидать, что по параметрам сигнала ВНЗ и их изменениям можно предсказать условия распространения на линиях связи. Кроме того, сигнал ВНЗ несет в себе информацию о состоянии ионосферы на удалении несколько тысяч километров от места наблюдения в любом заданном направлении. Это существенно дополняет возможности, предоставляемые ионосферными станциями ВЗ в изучении ионосферы и прогнозирования

нии ее параметров. Существует несколько основных подходов к определению характеристик радиосвязи по данным ВНЗ. Наиболее широко распространенный подход связан с решением так называемых обратных задач, когда из данных ВНЗ ионосферы определяются ее количественные параметры. Как правило, в качестве измеряемых характеристик используются задержки зондирующего сигнала, соответствующие переднему фронту сигнала ВНЗ [Benito et al., 2008; Fridman et al., 2012; Norman et al., 2013; Zhu et al., 2015; Feng et al., 2016]. Использование таких методов обычно требует больших временных затрат на ЭВМ, что значительно снижает возможности использования средств ВНЗ для контроля условий работы на коротковолновых трассах.

Одним из возможных путей оперативного прогнозирования характеристик радиосвязи является метод прямой диагностики радиоканала, позволяющий по зондирующему сигналу определять характеристики радиоканала, минуя коррекцию параметров ионосферы [Куркин и др., 1993]. Данный подход применяется в случаях, когда диагностическая трасса НЗ совпадает с интересующей радиотрассой или лежит в секторе возвратно-наклонного зондирования. В настоящей работе излагается метод оперативной диагностики КВ-радиоканала по результатам автоматической обработки и интерпретации ионограмм возвратно-наклонного зондирования, полученных с помощью ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Brynko et al., 1988; Подлесный и др., 2013]. Результаты интерпретации сигналов ВНЗ и построения треков являются исходными данными для определения максимальных применимых частот (МПЧ) и дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) наклонного зондирования ионосферы на заданные дальности. В дальнейшем результаты оперативной диагностики КВ-радиоканала по текущим данным ВНЗ используются для восстановления параметров ионосферы в секторе зондирования.

## МЕТОД ПРЯМОЙ ДИАГНОСТИКИ РАДИОКАНАЛА

При моделировании характеристик сигналов наклонного и возвратно-наклонного зондирования и анализе экспериментальных данных были выявлены следующие слабо меняющиеся при вариациях параметров ионосферы соотношения [Куркин и др., 1993; Ponomarchuk et al., 2009, 2012]:

- отношение группового пути  $P_m$ , соответствующего переднему фронту сигнала ВНЗ, к дальности до границы освещенной зоны  $D_m$  ( $P_m/D_m$ );
- ДЧХ мода наклонного распространения на относительной сетке частот  $\beta=f/f_m$ , где  $f_m$  — МПЧ мода для рассматриваемой дальности ( $P(\beta)$ );
- ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту на относительной сетке частот  $\nu=f/f_m$ , где  $f_m$  — МПЧ для максимальной дальности распространения сигнала ВНЗ.

Данные соотношения позволяют решать следующие задачи оперативной диагностики декаметрового радиоканала:

- интерпретация модов распространения на экспериментальных ионограммах ВНЗ по точкам со значимой амплитудой, полученным в результате вторичной обработки;
- восстановление ионограмм ВНЗ по фрагментам треков, когда технические возможности ионозонда или условия на трассе распространения не позволяют получить частотные зависимости группового пути какого-либо мода;
- оперативное определение МПЧ и ДЧХ сигналов НЗ на заданной радиотрассе по данным ВНЗ.

Положение границы освещенной зоны находится с помощью ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту, поскольку максимум в амплитудном рельефе сигнала ВНЗ близок по групповому пути к границе переднего фронта [Dyson, 1991; Ponomarchuk et al., 2009]. Поэтому интерпретацию ионограмм ВНЗ можно проводить на основе расчета частотной зависимости минимального группового пути  $P_m(f)$ , соответствующего точке смыкания верхнего и нижнего лучей для сигналов НЗ [Ponomarchuk et al., 2016]. Рабочая частота  $f$  для соответствующей дальности  $D_m(f)$  является максимальной применимой частотой радиосвязи. Моделирование характеристик сигналов ВНЗ и НЗ проводится в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI [Puyin et al., 1996; Bilitza, Reinisch, 2008; Ponomarchuk et al., 2009; Пономарчук и др., 2014].

## ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ

При оперативном прогнозировании характеристик радиосвязи определяющим фактором является автоматизация процесса вторичной обработки и анализа поступающей диагностической информации о состоянии КВ-радиоканала. Обработка ионограмм включает следующие этапы [Grozov et al., 2012; Ponomarchuk et al., 2012; Грозов и др., 2013]:

- а) предобработка ионограмм для удаления шума с изображения и улучшения амплитудных характеристик;
- б) сжатие данных, позволяющее провести значительное сокращение их объема без существенной потери полезной информации.

*Предобработка ионограмм* заключается в ее очистке от шумовых составляющих с целью выделения полезного сигнала, а также в удалении одиночных выбросов, по интенсивности сравнимых с полезным сигналом. Для исключения шума применяются локальные методы сглаживания, имеющие высокую вычислительную эффективность и возможность обработки изображений в реальном масштабе времени. Для удаления шума на изображении и восстановления отсчетов сигнала используется медианный фильтр, который позволяет сглаживать помехи и уменьшать размытие границ треков, а также восстанавливать значения в разрывах треков. При переходе между реализациями на соседних частотах низкая корреляция между шумовыми помехами приводит к тому, что помеха становится импульсной и лучше всего удаляется медианным фильтром.

Методика сжатия данных применяется для выделения точек со значимой амплитудой, физически соответствующих величинам — моментам прихода сигнала по переднему фронту сигнала или максимуму амплитудного рельефа. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме эффективен механизм клеточного автомата. Клеточные автоматы — это дискретные динамические системы, поведение которых полностью определяется локальными взаимными связями элементов этих систем. В результате такой обработки остаются точки на гребнях треков и незначительная часть шума. Реализованный алгоритм позволил достигнуть сжатия исходной информации в 5–10 раз в зависимости от уровня шума и диффузности.

На рис. 1 приведены ионограмма ВНЗ (а) и результаты вторичной обработки данных (б). Пункт излучения — Усье-Сибирское (52.88° N, 103.26° E). Пункт приема — Торы (51.8° N, 103.0° E). Азимут излучения — 55°. Время регистрации — 08:40 UT 25.09.2005. Используемый ЛЧМ-ионозонд относится к маломощным системам с мощностью передатчика менее 1 кВт, поэтому в режиме ВНЗ он позволяет регистрировать рассеянные сигналы в пределах максимальной дальности одного скачка (~3000÷4000 км). На ионограмме на рис. 1 выделенные рассеянные сиг-

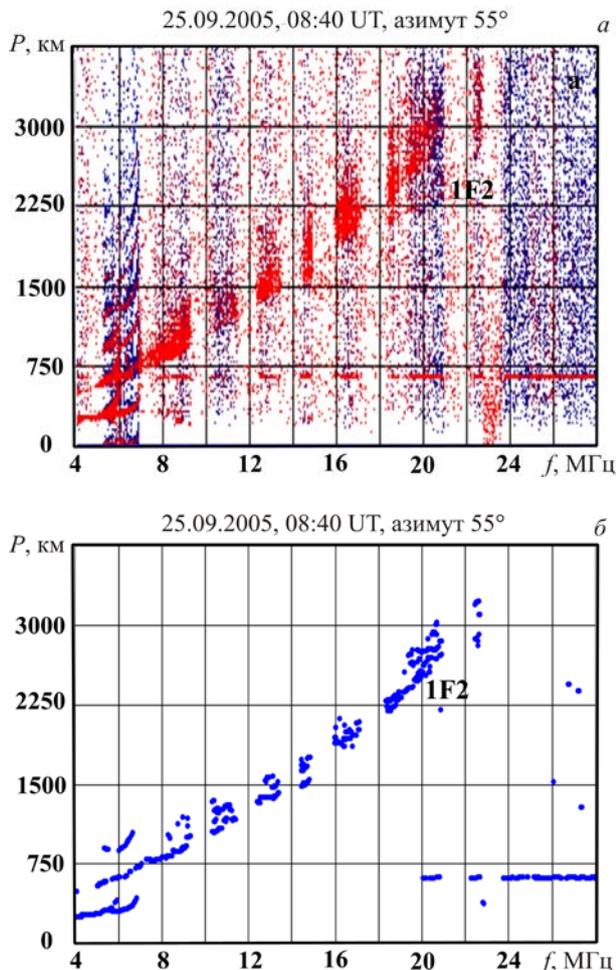


Рис. 1. Ионограмма ВНЗ (а) и результаты вторичной обработки (б) (25.09.2005, 08:40 UT)

налы ВНЗ соответствуют однократному отражению от слоя F2.

Алгоритм восстановления ДЧХ ВНЗ базируется на адиабатической зависимости минимального группового пути рассеянного земной поверхностью сигнала на относительной сетке частот  $v=f/f_m$  при изменении параметров ионосферы. Для прогнозных параметров ионосферы на сетке частот проводится расчет ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту. Моделирование характеристик сигналов ВНЗ по переднему фронту проводится в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI [Bilitza, Reinisch, 2008; Ponomarchuk et al., 2009]. Прогнозная ДЧХ сигнала ВНЗ пересчитывается на относительную сетку частот  $v$ . В качестве частоты  $f_m$  выбирается МПЧ для максимальной дальности распространения сигнала. После вторичной обработки экспериментальной ионограммы ВНЗ имеется матрица экспериментальных точек, соответствующая двумерному массиву значений группового пути  $P_i$  на сетке частот  $f_j$  для точек со значимой амплитудой. Экспериментальные точки также переводятся на относительную сетку частот  $v$ . Алгоритм идентификации мода распространения на ионограмме ВНЗ в автоматическом режиме заключается в определении максимума гистограммы распределения числа экспериментальных точек, попадающих в модельную маску, построенную по долгосрочному прогнозу, при изменении частоты  $f_m$  на относительной сетке частот  $v=f/f_m$ .

На рис. 2 приведены результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ. Линиями 1 и 2 показаны результаты моделирования  $P_m$  и  $D_m$  по долгосрочному прогнозу, линией 3 — интерпретированная ДЧХ ВНЗ, черными точками — точки со значимой амплитудой сигнала ВНЗ.

### ОПЕРАТИВНАЯ ДИАГНОСТИКА

Разработанные методы автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ позволяют решать следующие задачи оперативной диагностики декаметрового радиоканала по текущим данным регистрации ионограмм ВНЗ:

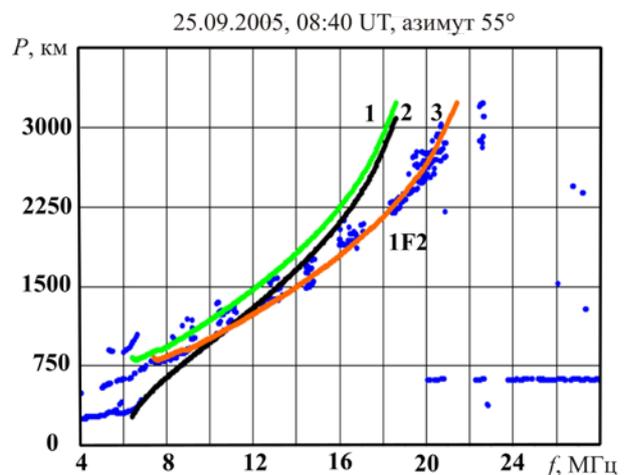


Рис. 2. Результаты вторичной обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ, полученной 25.09.2005 в 08:40 UT: линия 1 —  $P_m$ , линия 2 —  $D_m$ , линия 3 — ДЧХ ВНЗ, черные точки — точки со значимой амплитудой сигнала ВНЗ

- оперативное определение МПЧ и ДЧХ сигналов НЗ для мода распространения 1F2 на заданной радиотрассе по данным ВНЗ;

- восстановление пространственного распределения электронной концентрации в секторе зондирования ионосферы ЛЧМ-ионозондом в режиме ВНЗ.

Расчет МПЧ сигнала НЗ при заданной длине радиотрассы по текущей ДЧХ сигналов ВНЗ базируется на адиабатическом соотношении  $P_m/D_m$ . На первом этапе для прогнозных параметров ионосферы рассчитываются дистанционно-частотные характеристики  $P_m(f)$  и  $D_m(f)$ . Для заданной дальности  $D_0$  вычисляется отношение  $\eta = P_m/D_0$ . Далее на реальной ДЧХ ВНЗ по переднему фронту сигнала определяется частота, для которой групповой путь равен значению  $P = \eta D_0$ . Рассчитанная таким образом частота будет являться реальной частотой  $f_m$  для дальности  $D_0$ . После определения МПЧ для заданной дальности по текущим данным ВНЗ можно рассчитать реальную ДЧХ НЗ соответствующего мода распространения. ДЧХ наклонного зондирования для дальности  $D_0$  рассчитывается по долгосрочному прогнозу параметров ионосферы на относительной сетке частот  $\beta = f / f_m^{\text{прогн}}$ . Реальная ДЧХ НЗ на текущий момент времени восстанавливается из прогнозной умножением  $\beta$  на  $f_m$  [Куркин и др., 1993; Grozov et al., 2012].

На рис. 3 приведены результаты пересчета прогнозных ДЧХ НЗ мода 1F2 в реальные задержки сигнала на сетке дальностей по МПЧ, восстановленным по текущей ДЧХ сигнала ВНЗ, приведенной на рис. 2. Время регистрации — 08:40 UT 25.09.2005. Геометрия сектора зондирования в данном эксперименте приведена на рис. 4. Центральный азимут сектора  $55^\circ$  совпадает с направлением на Магадан.

Для иллюстрации возможностей метода коррекции МПЧ по данным ВНЗ на рис. 5 приведены результаты сопоставления ДЧХ НЗ для односкачкового мода 1F2 на удалении 3000 км от пункта излучения с экспериментальной ионограммой НЗ, полученной на трассе Магадан—Торы (длина трассы ~3000 км) в 08:45 UT. Штриховой линией показаны результаты моделирования ДЧХ НЗ в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI, сплошной — результаты восстановления.

На рис. 6 приведены временные вариации МПЧ односкачкового мода 1F2 для дальности 3000 км в направлении Магадана для 18 и 19 ноября 2005 г. Для корректировки МПЧ на заданную дальность использовались данные, полученные по результатам автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ [Ponomarchuk et al., 2016]. Сплошной линией обозначены МПЧ, рассчитанные по результатам восстановления ДЧХ НЗ по текущим данным ВНЗ. Здесь же штриховой линией показаны экспериментальные значения максимальных наблюдаемых частот (МНЧ) на трассе наклонного зондирования Магадан—Торы в этот период наблюдений. Вариации МНЧ около 2 МГц с периодами 1–2 ч обусловлены перемещающимися ионосферными

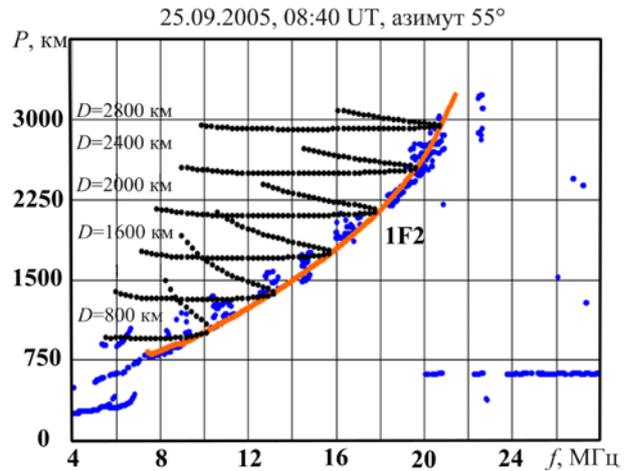


Рис. 3. Результаты вторичной обработки, интерпретации ионограммы ВНЗ (25.09.2005, 08:40 UT) и ДЧХ НЗ на сетке дальностей

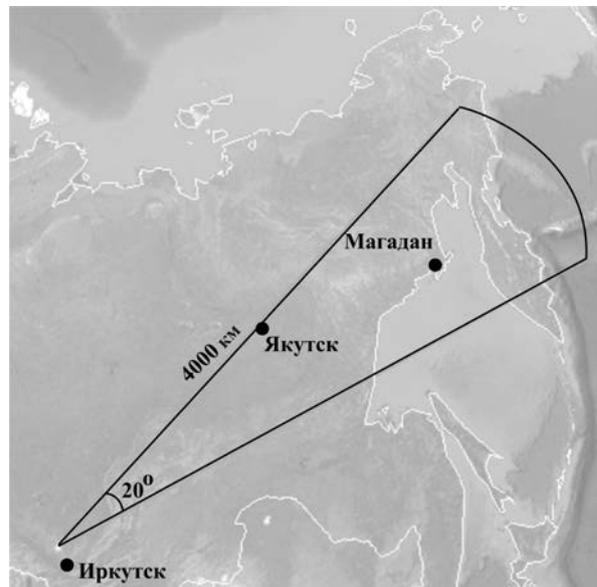


Рис. 4. Сектор зондирования с центральным азимутом  $55^\circ$

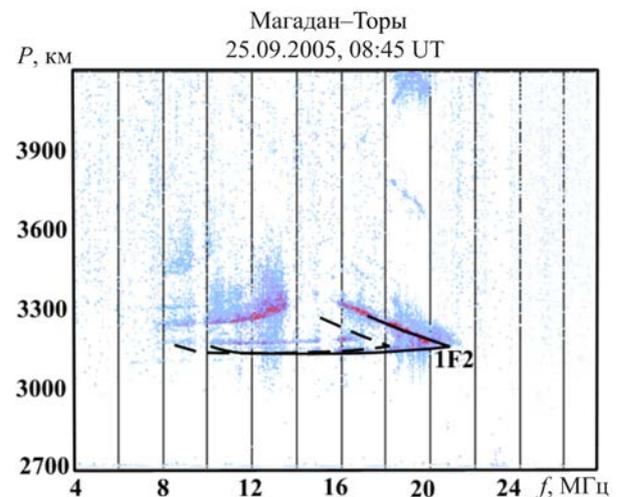


Рис. 5. Ионограмма НЗ (25.09.2005, 08:45 UT) и полученная ДЧХ НЗ для 08:40 UT того же дня: штриховая линия — по модели IRI; сплошная линия — в результате восстановления

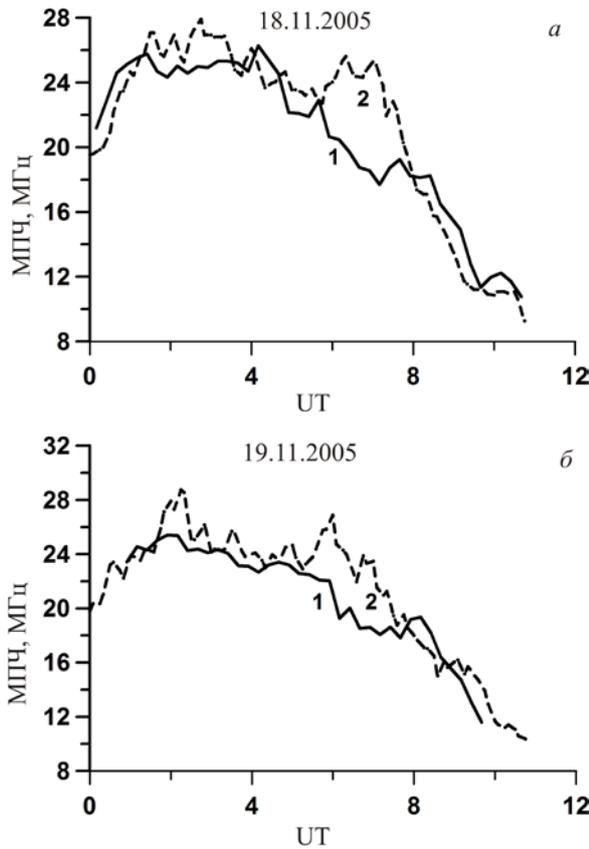


Рис. 6. Временные вариации реальных и восстановленных МПЧ на трассе Магадан—Торы: линия 1 — восстановленная МПЧ, 2 — реальная МПЧ

возмущениями (ПИВ) на трассе [Ivanova et al., 2011]. Рассчитанные по текущим данным ВНЗ МПЧ согласуются с экспериментальными МНЧ (рис. 6). Для коррекции МПЧ с учетом перемещающихся ионосферных возмущений в качестве входных данных необходимо выбирать на ионограмме ВНЗ семейство точек со значимой амплитудой, соответствующих моментам прихода рассеянных сигналов с различных направлений. Такая задача решается с использованием данных когерентных радаров SuperDARN. Характеристики принимаемого радаром SuperDARN сигнала ВНЗ используются для диагностики ПИВ среднего и крупного масштабов [Oinats et al., 2016].

Таким образом, развитые методы прямой диагностики радиоканала по данным ВНЗ позволяют оперативно корректировать МПЧ и ДЧХ сигналов НЗ на заданной радиотрассе по текущим данным ВНЗ в секторе зондирования без восстановления параметров ионосферы.

Результаты оперативной диагностики радиоканала по данным ВНЗ — ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту  $P_m(f)$ , восстановленные ДЧХ НЗ и МПЧ для заданной радиотрассы — могут быть использованы также в качестве входных параметров при решении обратной задачи определения параметров ионосферы по данным зондирования. Обратная задача определения параметров ионосферы по ДЧХ НЗ рассматривалась многими авторами. В работе [Smith, 1970] предложено ее решение путем сведения системы интегральных уравнений к системе нелинейных уравнений посредством кусоч-

но-гиперболической аппроксимации монотонного высотного профиля электронной концентрации. В работе [Krashennikov, Liannoy, 1990] авторами для повышения точности восстановления профиля электронной концентрации была использована кусочно-квазипараболическая аппроксимация квадрата плазменной частоты. Для оперативного расчета параметров ионосферы в работе [Котович и др., 2006] предложена методика обращения ДЧХ наклонного зондирования в высотно-частотную характеристику (ВЧХ) вертикального зондирования вблизи средней точки трассы с использованием модифицированного метода Смита (метод кривых передачи). В рамках данной методики реализован алгоритм расчета ВЧХ в средних точках радиотрасс, расположенных в секторе ВНЗ, с последующим восстановлением профиля электронной концентрации [Михайлов, 2000].

В модифицированном методе кривых передачи линейная связь между частотами вертикального  $f_o$  и наклонного зондирования  $f_H$  определяется выражением  $f_H = kf_o \sec \varphi$ , где  $\varphi$  — угол падения луча на слой,  $k$  — коэффициент Смита, учитывающий сферичность Земли. Угол падения  $\varphi$  луча на слой, согласно теореме эквивалентности, в модифицированном методе кривых передачи связан с действующей высотой  $h'$  следующей формулой:

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

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

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

где  $\Omega = \arcsin(x \sin \varphi)$ . Ионограмма НЗ представляет собой зависимость группового времени распространения волны от частоты зондирования. Для каждой частоты  $f_H$  групповое время распространения сигнала зависит от высоты отражения. Для нахождения искомого значения  $h'$ , соответствующего задержке сигнала на частоте  $f_H$  на ионограмме НЗ при односкачковом распространении (мод 1F2), выполняется, начиная со значения 200 км, перебор с шагом 200 м действующих высот, по которым рассчитывается групповое время распространения. В результате находится значение группового пути, равное экспериментальному значению на выбранной частоте. Согласно закону секанса, по частоте  $f_H$  наклонного зондирования рассчитывается значение частоты  $f_o$  вертикального зондирования. Таким образом, проводится расчет ВЧХ ВЗ в средней точке трассы. Для реконструкции высотного профиля плазменной частоты  $f_e(h)$  развит метод численного решения интегральных уравнений посредством модифицированного метода Джексона с повышением точности в областях максимумов слоев (прикритических частот) и долин [Михайлов, 2000]. По полученному  $f_e(h)$ -про-

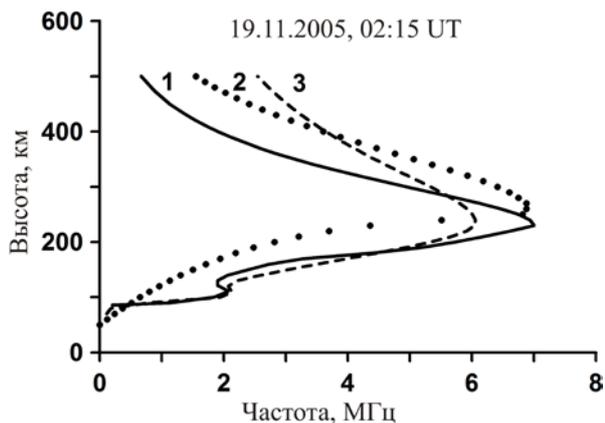


Рис. 7. Профили плазменной частоты  $f_e(h)$ : 1 — реальный, 2 — восстановленный, 3 — по модели IRI

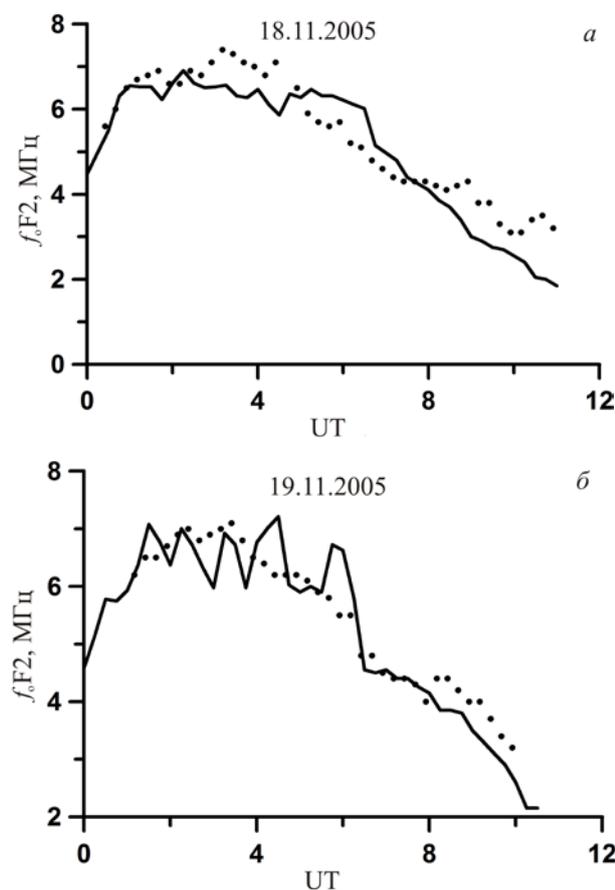


Рис. 8. Временные вариации критической частоты слоя F2 в средней точке трассы Магадан—Торы: сплошная линия — экспериментальные значения  $f_oF2$  на ст. «Якутск», точки — восстановленные значения  $f_oF2$  в средней точке трассы

филю определяются ионосферные параметры слоя F2: критическая частота  $f_oF2$  и высота максимума  $h_mF2$ . Точностные характеристики метода расчета параметров ионосферы вблизи средней точки трассы по текущим данным НЗ приведены в работе [Ponomarchuk et al., 2015].

На рис. 7 в качестве примера приведены профили плазменной частоты  $f_e(h)$ , полученные на удалении 1500 км от пункта излучения в направлении зондирования  $55^\circ$ . Сплошной линией показан профиль  $f_e(h)$ , полученный по данным вертикального зонди-

рования в Якутске ( $62^\circ$  N,  $129.7^\circ$  E) для 02:15 UT 19.11.2005, штриховой линией — профиль  $f_e(h)$ , рассчитанный по модели IRI [Bilitza, Reinisch, 2008], точками — результаты расчета  $f_e(h)$  по ВЧХ ВЗ, восстановленной из ДЧХ НЗ для дальности 3000 км. ДЧХ НЗ была рассчитана по текущим данным ВНЗ в этот период времени. Разница по широте станции ВЗ и средней точки трассы ( $58.2^\circ$  N,  $124.2^\circ$  E) составляет почти  $4^\circ$ , и расстояние между точками примерно равно 500 км, поэтому данные ст. «Якутск» лишь частично могут быть контрольными при верификации методики диагностики параметров ионосферы.

Для иллюстрации метода диагностики параметров ионосферы по данным ВНЗ на рис. 8 приведены результаты определения критической частоты слоя F2 в средней точке радиотрассы Магадан—Торы по ДЧХ НЗ, восстановленной по текущим данным ВНЗ, полученными 18 и 19 ноября 2005 г. (см. рис. 6). Сплошной линией на рис. 8 показаны вариации критической частоты по данным станции ВЗ, расположенной в Якутске. Вариации  $f_oF2$  около 1 МГц и с периодами около 1 ч обусловлены наличием перемещающихся ионосферных возмущений над Якутском в эти дни [Куркин и др., 2014]. Значения критической частоты слоя F2, рассчитанные по ДЧХ НЗ, восстановленной из данных ВНЗ, согласуются с экспериментальными данными.

Отметим, что аналитические выражения для  $P_m$  и  $D_m$ , полученные в сферически-симметричном волноводе с модельным квазипараболическим профилем электронной концентрации, позволяют определять критическую частоту и высоту максимума слоя F2 по текущим данным ВНЗ по переднему фронту сигнала [Li et al., 2013].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе излагается метод оперативной диагностики КВ-радиоканала по результатам автоматической обработки и интерпретации ионограмм возвратно-наклонного зондирования ионосферы, полученных с помощью ЛЧМ-иозонда. Используются слабо меняющиеся в различных гелиогеофизических условиях соотношения частотных зависимостей групповых характеристик сигналов НЗ и ВНЗ. Интерпретация сигналов на ионограмме проводится по результатам расчета дистанционно-частотной характеристики ВНЗ по переднему фронту сигнала. Моделирование характеристик распространения радиоволн проводится в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI. Результаты идентификации регистрируемых сигналов ВНЗ и построения треков являются исходными данными для определения МПЧ и ДЧХ односкачкового мода наклонного распространения 1F2 на радиотрассах в секторе зондирования, минуя коррекцию параметров ионосферы. Для оперативного восстановления параметров ионосферы реализован алгоритм на основе преобразования ДЧХ НЗ в ВЧХ ВЗ вблизи средней точки трассы с последующим восстановлением профиля электронной концентрации, тем самым решается обратная задача ВЗ. В дальнейшем

предполагается провести дополнительные исследования по количественной оценке эффективности метода диагностики декаметрового радиоканала по текущим данным ВНЗ на базе автоматизированного программного комплекса обработки и интерпретации ионограмм.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12. Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара», <http://ckp-rf.ru/ckp/3056>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Грозов В.П., Киселев А.М., Котович Г.В. и др. Программное обеспечение обработки и интерпретации ионограмм зондирования на базе цифрового ЛЧМ-ионозонда // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 75–85.

Кабанов Н.И., Осетров Б.И. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Советское радио, 1965. 112 с.

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я. и др. Определение критической частоты  $f_oF_2$  в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

Куркин В.И., Носов В.Е., Пономарчук С.Н. и др. Метод оперативной диагностики КВ-радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. Новосибирск, 1993. Вып. 100. С. 168–188.

Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В. и др. Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабо-наклонного зондирования ионосферы // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 158–163.

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.

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

Пономарчук С.Н., Ильин Н.В., Пензин М.С. Модель распространения радиоволн в диапазоне частот 1–10 МГц на основе метода нормальных волн // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 25. С. 33–39.

Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Связь, 1971. 204 с.

Benito E., Bourdillon A., Saillant S., et al. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1935–1948. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.031).

Benner A. Predicting Maximum Usable Frequency from Long-Distance Scatter // Proc. IRE. 1949. V. 37, N 1. P. 44–47.

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 599–609. DOI: [10.1016/j.asr.2007.07.048](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048).

Brynko I.G., Galkin I.A., Grosov V.P., et al. An automatically controlled data gathering and processing system using an FMCW ionosonde // Adv. Space Res. 1988. V. 8, N 4. P. 121–124.

Dyson P.L. A simple method of backscatter ionogram analysis // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53, N 1. P. 75–88.

Fridman S.V., Nickisch L.J., Hausman M. Inversion of backscatter ionograms and TEC data for over-the-horizon radar // Radio Sci. 2012. V. 47, RS0L10. DOI: [10.1029/2011RS004932](https://doi.org/10.1029/2011RS004932).

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, N 3. P. 458–463. DOI: [10.1134/S1054661812030042](https://doi.org/10.1134/S1054661812030042).

Ilyin N.V., Khakhinov V.V., Kurkin V.I., et al. The theory of chirp-signal ionospheric sounding // Proc. ISAP'96, Chiba, Japan, 1996. P. 689–692.

Ivanova V.A., Kurkin V.I., Polekh N.M., et al. Studying large-scale traveling ionospheric disturbances according to the data of oblique-incidence sounding // Geomagnetism and Aeronomy. 2011. V. 51, N 8. P. 1101–1104. DOI: [10.1134/S0016793211080196](https://doi.org/10.1134/S0016793211080196).

Feng J., Ni B.-B., Zhao Z.-Y., et al. A method of reconstructing horizontally-inhomogeneous ionospheric structure using HF sky-wave backscatter ionograms // Chinese J. Geophys. 2016. V. 59, N 5. P. 457–473.

Krashenninnikov I.V., Liannyo B.E. Estimation of the true ionospheric height profile, with a continuous gradient, from oblique sounding data // J. Atmos. Terr. Phys. 1990. V. 52, N 2. P. 113–117.

Li N., Zhao Z., Zhou C., et al. Inversion of sweep frequency backscatter ionogram from monostatic HF sky-wave radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2013. V. 10, N 6. P. 1360–1364. DOI: [10.1109/LGRS.2013.2241728](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2241728).

Norman R.J., Dyson P.L. HF radar backscatter inversion technique // Radio Sci. 2006. V. 41, RS4010. DOI: [10.1029/2005RS003355](https://doi.org/10.1029/2005RS003355).

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behavior of the Hokkaido East SuperDARN ground backscatter: simulation and observation // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68, N 1. P. 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0378-9](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0378-9).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Oinats A.V. The diagnostics of ionosphere and Earth ground surface by backscatter sounding data // PIERS 2009: Proc. Moscow, 2009. V. I, II. P. 1307–1310.

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Penzin M.S. The real-time forecast of HF radio channel on the base of ionosphere sounding data // PIERS 2012: Proc. Moscow, 2012. P. 1182–1186.

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. SPIE. 2015. V. 9680, 96805E. DOI: [10.1117/12.2203589](https://doi.org/10.1117/12.2203589).

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., et al. Automatic processing and interpretation of backscatter ionosphere sounding ionograms // Proc. SPIE. 2016. V. 10035, 100351E. DOI: [10.1117/12.2248765](https://doi.org/10.1117/12.2248765).

Smith M.S. The calculation of ionospheric profiles from data given on oblique incidence ionograms // J. Atmos. Terr. Phys. 1970. V. 32, N 6. P. 1047–1056.

Zhu P., Zhou C., Zhang Yu., et al. F region electron density profile inversion from backscatter ionogram based on international reference ionosphere // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2015. V. 129. P. 111–118. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.003).

## REFERENCES

Benito E., Bourdillon A., Saillant S., Rannou V., Molinié J.P. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans. *J. Atmos. Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 15, pp. 1935–1948. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.031).

Benner A.H. Predicting maximum usable frequency from long-distance scatter. *Proceedings of IRE.* 1949, vol. 37, no. 1, pp. 44–47.

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, pp. 599–609. DOI: [10.1016/j.asr.2007.07.048](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.07.048).

Brynko I.G., Galkin I.A., Grosov V.P., Dvinskikh N.I., Matyushonok S.M., Nosov V.E. An automatically controlled data gathering and processing system using an FMCW ionosonde. *Adv. Space Res.* 1988, vol. 8, no. 4, pp. 121–124.

Chernov Yu.A. *Vozvratno-naklonnoe zondirovanie ionosfery* [Backscatter Sounding Ionosphere]. Moscow, Sov. svyaz' Publ., 1971, 204 p. (In Russian).

Dyson P.L. A simple method of backscatter ionogram analysis. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1991, vol. 53, no. 1, pp. 75–88.

Fridman S.V., Nickisch L.J., Hausman M. Inversion of backscatter ionograms and TEC data for over-the-horizon radar. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, RS0L10. DOI: [10.1029/2011RS004932](https://doi.org/10.1029/2011RS004932).

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, pp. 458–463. DOI: [10.1134/S1054661812030042](https://doi.org/10.1134/S1054661812030042).

Grozov V.P., Kiselev A.M., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Ponomarchuk S.N. The software for processing and interpretation of sounding ionogram on base of digital chirp sounder. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2013, vol. 4, pp. 75–85. (In Russian).

Ilyin N.V., Khakhinov V.V., Kurkin V.I., Nosov V.V., Orlov I.I., Ponomarchuk S.N. The theory of chirp-signal ionospheric sounding. *Proceedings of ISAP'96.* Chiba, Japan, 1996, pp. 689–692.

Ivanova V.A., Kurkin V.I., Polekh N.M., Chistyakova L.V., Brynko I.G., Chuyev V.V., Dumbava Z.F., Poddelskii I.N. Studying large-scale traveling ionospheric disturbances according to the data of oblique-incidence sounding. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2011, vol. 51, no. 8, pp. 1101–1104.

Feng J., Ni B.-B., Zhao Z.-Y., Liu W., Wei N., Lou P. A method of reconstructing horizontally-inhomogeneous ionospheric structure using HF sky-wave backscatter ionograms. *Chinese J. Geophys.* 2016, vol. 59, no. 5, pp. 457–473.

Kabanov N.I., Osetrov B.I. *Vozvratno-naklonnoe zondirovanie ionosfery* [Backscatter Sounding Ionosphere]. Moscow, Svyaz' Publ., 1965, 112 p.

Kotovich G.V., Kim A.G., Mikhailov S.Ya., Grozov V.P., Mikhailov Ya.S. Determining the foF2 critical frequency at the path midpoint from oblique sounding data based on the Smith method. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006, vol. 46, no. 4, pp. 517–521. DOI: [10.1134/S0016793206040141](https://doi.org/10.1134/S0016793206040141).

Krashennikov I.V., Lianny 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, pp. 113–117.

Kurkin V.I., Laryunin O.A., Podlesny A.V., Pezhemskaya M.D., Chistyakova L.V. Studying morphological characteristics of traveling ionospheric disturbances with the use of near-vertical ionospheric sounding data. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2014, vol. 27, iss. 4, pp. 303–309. DOI: [10.1134/S1024856014040095](https://doi.org/10.1134/S1024856014040095).

Kurkin V.I., Nosov V.E., Ponomarchuk S.N., Savkov S.S., Chistyakova L.V. Method for operative diagnostics of HF radio channel. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1993, vol. 100, pp. 168–188. (In Russian).

Li N., Zhao Z., Zhou C., Chen G., Yang G., Huang S., Li T. Inversion of sweep frequency backscatter ionogram from monostatic HF sky-wave radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters.* 2013, vol. 10, no. 6, pp. 1360–1364. DOI: [10.1109/LGRS.2013.2241728](https://doi.org/10.1109/LGRS.2013.2241728).

Mikhailov S.Ya. Ambiguity of the reconstruction of plasma frequency profiles from a given height-frequency characteristic and their discernibility for oblique propagation of HF radio waves in an isotropic ionosphere. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2000, vol. 43, no. 10, pp. 766–782.

Norman R.J., Dyson P.L. HF radar backscatter inversion technique. *Radio Sci.* 2006, vol. 41, RS4010. DOI: [10.1029/2005S003355](https://doi.org/10.1029/2005S003355).

Oinats A.V., Nishitani N., Ponomarenko P., Ratovsky K.G. Diurnal and seasonal behavior of the Hokkaido East Super-DARN ground backscatter: simulation and observation. *Earth, Planets and Space.* 2016, vol. 68, no. 1, pp. 18. DOI: [10.1186/s40623-015-0378-9](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0378-9).

Podlesnyi A.V., Brynko I.G., Kurkin V.I., Berezovsky V.A., Kiselev A.M., Petukhov E.V. Multifunctional chirp ionosonde for monitoring the ionosphere. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2013, no. 4, pp. 24–31. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Oinats A.V. The Diagnostics of ionosphere and Earth ground surface by backscatter sounding data. *PIERS 2009: Proceedings.* Moscow, 2009, vol. I, II, pp. 1307–1310.

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Penzin M.S. The real-time forecast of HF radio channel on the base of ionosphere sounding data. *PIERS 2012: Proceedings.* Moscow, 2012, pp. 1182–1186.

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

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Kurkin V.I., Penzin M.S. Automatic processing and interpretation of backscatter ionosphere sounding ionograms. *Proceedings of SPIE.* 2016, vol. 10035, 100351E. DOI: [10.1117/12.2248765](https://doi.org/10.1117/12.2248765).

Ponomarchuk S.N., Ilyin N.V., Penzin M.S. The model of radio wave propagation in 1–10 MHz frequency range on the base of normal wave technique. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terr. Phys.]. 2014, iss. 25, pp. 33–39. (In Russian).

Smith M.S. The calculation of ionospheric profiles from data given on oblique incidence ionograms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1970, vol. 32, no. 6, pp. 1047–1056.

Zhu P., Zhou C., Zhang Yu., Yang G., Jiang C., Sun H., Cui X. F region electron density profile inversion from backscatter ionogram based on international reference ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 129, pp. 111–118. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.003).

*Как цитировать эту статью*

Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Куркин В.И., Пензин М.С. Диагностика КВ-радиоканала по данным возвратно-наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Солнечно-земная физика.* 2018. Т. 4, № 2. С. 47–54. DOI: [10.12737/szf-42201804](https://doi.org/10.12737/szf-42201804).