
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ ЛЧМ-ИОНОЗОНДА

FEATURES OF BACKSCATTER IONOSPHERIC SOUNDING AS STUDIED WITH A CHIRP IONOSONDE

С.Н. Пономарчук*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@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.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. В работе приводятся результаты исследований возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ) на базе многофункционального ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН. Анализировались экспериментальные данные ВНЗ, полученные в различные сезоны за период 2005–2009 гг. Накопленный массив данных позволяет исследовать особенности распространения сигналов ВНЗ в различных гелиогеофизических условиях. Для анализа и интерпретации сигналов ВНЗ на ионограммах привлекались результаты моделирования характеристик ЛЧМ-сигналов при возвратно-наклонном зондировании ионосферы в рамках волноводного подхода. Были выявлены наиболее характерные типы ионограмм и установлены условия появления того или иного типа в зависимости от времени суток, сезона, направления зондирования, состояния среды. Зимой, весной и осенью преобладают типы ионограмм с сигналами ВНЗ, соответствующими моде распространения посредством отражения от F-слоя ионосферы. В летние периоды регистрируются сигналы, отраженные слоями E или E_s. При этом частоты принимаемых сигналов достаточно велики и возможны случаи, когда отражения от слоя F отсутствуют.

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

Abstract. We present the results of studies of backscatter ionospheric sounding (BS) on the basis of a multipurpose chirp ionosonde developed in ISTP SB RAS. We analyze BS experimental data obtained during different seasons from 2005 to 2009. The accumulated dataset allows us to investigate features of BS signal propagation in various heliogeophysical conditions. To analyze and interpret BS signals on ionograms, we use the results of modeling of characteristics for chirp signals in the backscatter and oblique ionospheric sounding under the waveguide approach. We have revealed the most characteristic types of ionograms and have established conditions of appearance of a given type depending on the time of day, season, sounding direction, and medium conditions. In winter, spring, and autumn, the prevailing types of ionograms are those with BS signals corresponding to the propagation mode through reflection from the F layer. Signals reflected by E or E_s layers are recorded during summer periods. At the same time, frequencies of the received signals are sufficiently large, and sometimes there are no reflections from the F layer.

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

ВВЕДЕНИЕ

Метод возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) вошел в практику исследования ионосферы наряду с вертикальным и наклонным зондированием, и имеется опыт по его применению для прогнозирования условий распространения радиоволн на линиях радиосвязи и в системах загоризонтной радиолокации. По мощности излучения можно выделить два крайних вида радиотехнических систем, работающих в режиме возвратно-наклонного зондирования. К первому виду относятся системы с излучаемой мощностью свыше 10 кВт, ко второму виду —

системы с мощностью меньше 1 кВт. Качество получаемых ионограмм ВНЗ напрямую связано с мощностью излучения: чем выше излучаемая мощность, тем больше отношение сигнал/шум, что позволяет регистрировать с высоким разрешением рассеянные сигналы с больших дальностей, улучшает качество обработки и интерпретации ионограмм. Однако большая передаваемая мощность увеличивает затраты на поддержку работы системы. Кроме того, возникает проблема электромагнитной совместимости зондирующей системы в целом. Для решения проблемы повышения энергетического потенциала станций при ограничении на излучаемую мощность

и для обеспечения высокого разрешения по времени в радиолокации широко используются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [Варакин, 1970; Кук, Бернфельд, 1971; Sinnott, 1988; Wise, 2004; Earl, Ward, 1987]. В ионосферных исследованиях ЛЧМ-сигналы нашли применение при создании ионозондов, работающих в режимах вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования [Bryuko et al., 1988; Иванов и др., 2003; Подлесный и др., 2013]. Современные ЛЧМ-ионозонды наклонного зондирования позволяют регистрировать сигналы на протяженных трассах, включая кругосветные [Ivanov et al., 1997; Куркин, 2000; Иванов и др., 2003]. Разработан новый инструмент — ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор, который одновременно измеряет ключевые характеристики ионосферного канала (дистанционно-частотные, амплитудно-частотные и угловые частотные характеристики) во всем диапазоне частот прохождения КВ-радиосигналов. На базе данного инструмента проведены экспериментальные исследования распространения радиоволн на трассах с различной протяженностью и направлением в естественной и искусственно возмущенной ионосфере. Продемонстрированы возможности использования ионозонда-радиопеленгатора для загоризонтной коротковолновой радиолокации ионосферы Земли в планетарном масштабе [Валов и др., 2012; Вертоградов и др., 2013; Урядов и др., 2013]. В режиме возвратно-наклонного зондирования ЛЧМ-ионозонд позволяет регистрировать сигналы, рассеянные земной поверхностью на больших удалениях от излучателя, при относительно малых мощностях передатчика путем использования технологии сжатия сигнала по частоте [Филипп и др., 1991; Puyin et al., 1996; Иванов и др., 2003]. Многолетний опыт экспериментальных исследований возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН, выявил потенциальные возможности таких систем для диагностики среды распространения в пределах максимальной дальности одного скачка (~3000–4000 км). [Алтынцева и др., 1990; Ponomarchuk et al., 2009]. В данной работе приведены результаты исследования особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы в Северо-Восточном регионе России по экспериментальным данным, полученным в различных гелиогеофизических условиях в 2005–2009 гг. Для интерпретации сигналов ВНЗ на ионограммах привлекались результаты моделирования характеристик ЛЧМ-сигналов при возвратно-наклонном зондировании ионосферы в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI [Ponomarchuk et al., 2009; Bilitza, Reinisch, 2008; Пономарчук и др., 2014].

ЭКСПЕРИМЕНТ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Анализировались экспериментальные данные ВНЗ, полученные в различные сезоны за 2005–2009 гг. на базе ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. Пункт излучения находился в г. Усолье-Сибирское (52.8° N, 103.3° E), пункт приема в с. Торы, Республика Бурятия (51.8° N, 103° E). Для излучения использовалась

логопериодическая антенна с механизмом поворота по азимуту, для приема — система антенн БС-2, направления максимумов диаграмм направленности которых совпадали с азимутами 55, 121, 235 и 301°. Мощность передатчика была меньше 1 кВт, что позволяло регистрировать рассеянные сигналы в основном в пределах максимальной дальности одного скачка (~3000–4000 км). Основные временные периоды исследований ВНЗ приходятся на переходный минимум солнечной активности между 23-м и 24-м циклами. Время экспериментов характеризовалось спокойными геомагнитными условиями.

Предварительно была проведена вторичная обработка ионограмм с целью удаления шумовых составляющих с изображения и выделения точек со значимой амплитудой, соответствующих моментам прихода сигнала по переднему фронту сигнала ВНЗ или максимуму амплитудного рельефа [Grozov et al., 2012; Грозов и др., 2013]. 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. Для отсева одиночных артефактов, частичного восстановления данных и выявления первичного трека на ионограмме применяется механизм клеточного автомата. Интерпретация выделенных при вторичной обработке сигналов на ионограммах проводится по результатам моделирования характеристик сигналов ВНЗ. Путем экспериментальных исследований и моделирования характеристик распространения было выявлено, что основной вклад в формирование сигнала ВНЗ вносят участки рассеяния земной поверхностью, расположенные вблизи границы освещенной зоны (переход от зоны молчания к зоне приема для сигналов наклонного зондирования) для отдельных скачков [Чернов, 1971; Алтынцева и др., 1990]. Положение границы освещенной зоны находится с помощью дистанционно-частотной характеристики (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 наклонного зондирования. Рабочая частота f для соответствующей дальности $D_m(f)$ является максимальной применимой частотой (МПЧ) радиосвязи. Для автоматической интерпретации и восстановления ДЧХ ВНЗ на ионограммах был разработан метод, базирующийся на адиабатической зависимости минимального группового пути рассеянного земной поверхностью сигнала на относительной сетке частот $\nu = f/f_m$ при изменении параметров ионосферы [Куркин и др., 1993; Ponomarchuk et al., 2016]. Для прогнозных параметров ионосферы на сетке частот проводится расчет ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту. Прогнозная ДЧХ сигнала ВНЗ $P_m(f)$ пересчитывается на относительную сетку частот ν . В качестве начальной частоты f_m выбирается МПЧ для максимальной дальности распространения сигнала. После вторич-

ной 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 ν . Алгоритм идентификации мод 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 $\nu = f/f_m$. Перемножением ν на вычисленное значение реальной f_m прогнозные значения ДЧХ переносятся на частотную шкалу. Таким образом восстанавливаются ДЧХ сигналов ВНЗ для недостающих частот зондирования и проводится их идентификация.

На рис. 1 приведена ионограмма ВНЗ, полученная 22.01.2007 в 06:31 UT. Основной след сигнала ВНЗ, отраженного от слоя F2, является продолжением высотно-частотной характеристики моды второй кратности при квазивертикальном распространении сигнала от пункта излучения в пункт приема и начинается с критической частоты слоя F2. На ионограмме кратные сигналы квазивертикального зондирования присутствуют в диапазоне частот 4–7 МГц. Сплошными линиями на рисунке нанесены результаты расчета ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту $P_m(f)$ для односкачковой, двухскачковой и трехскачковой мод распространения 1F2, 2F2 и 3F2 соответственно. Моделирование $P_m(f)$ проводилось в рамках волноводного подхода с использованием модели IRI [Ponomarchuk et al., 2009; Пономарчук и др., 2014; Bilitza, Reinisch, 2008]. Результаты моделирования $P_m(f)$ для односкачковой моды распространения 1F2 позволяют уверенно идентифицировать соответствующие сигналы ВНЗ на ионограмме. Сигналы ВНЗ, соответствующие двухскачковым и трехскачковым модам распространения 2F2 и 3F2, на ионограмме присутствуют, но имеют малую амплитуду, поэтому при вторичной обработке данных не выделяются. На рис. 2 приведены результаты вторичной обработки и интерпретации моды 1F2.

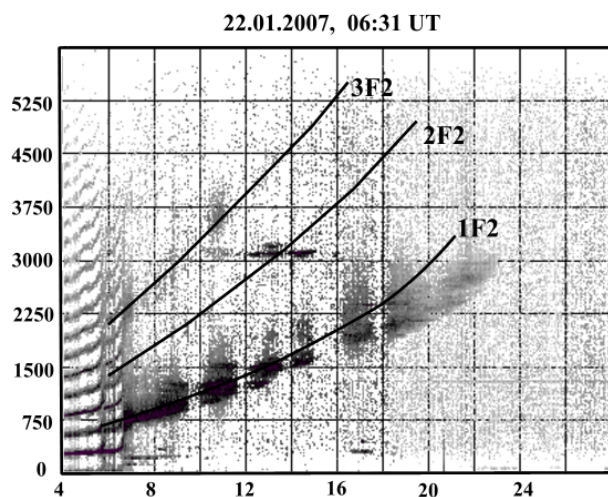


Рис. 1. Ионограмма ВНЗ и результаты моделирования $P_m(f)$: 22.01.2007, 06:31 UT

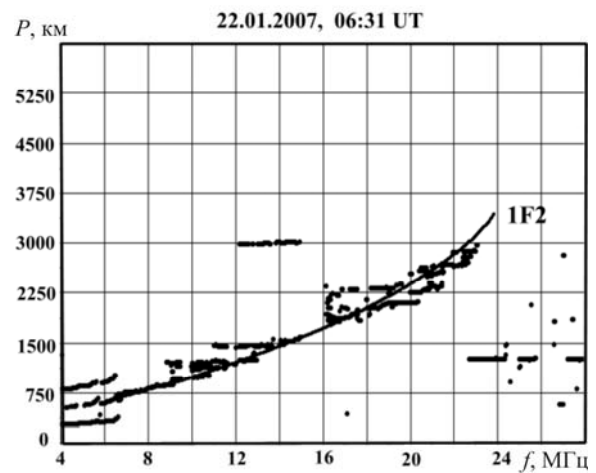


Рис. 2. Ионограмма ВНЗ и результаты обработки и интерпретации: 22.01.2007, 06:31 UT

В дальнейшем анализ экспериментальных данных проводится как на основе результатов моделирования, так и путем автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ.

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Анализ результатов зондирования ионосферы методом ВНЗ в течение продолжительного времени позволил выявить наиболее характерные виды ионограмм в зависимости от времени суток, сезона, направления зондирования, состояния среды. Ионограммы ВНЗ могут быть разделены условно на восемь основных типов [Кабанов, Осетров, 1965; Чернов, 1971; Алтынцева и др., 1990].

1 тип. Ионограммы первого типа характеризуются малым рассеянием радиоволн, отражаемых слоем F, на всем пути их распространения, исключая рассеяние землей. Состояние ионосферы, характеризуемое этим типом ДЧХ, создает наиболее благоприятные условия для выбора и корректировки рабочих частот. Как правило, удается получить качественные ионограммы для дальностей до 3000–4000 км.

В качестве иллюстрации на рис. 3 приведена ионограмма ВНЗ, полученная 12.11.2009 в 01:40 UT. Центральный азимут сектора зондирования и приема соответствовал 55° . Точками на ионограмме отмечены сигналы ВНЗ со значимой амплитудой, выделенные в результате вторичной обработки экспериментальных данных. Результаты интерпретации односкачковой моды распространения 1F2 (сплошная линия на рис. 3) уверенно идентифицируют соответствующие сигналы ВНЗ на ионограмме. На рис. 4 приведена ионограмма ВНЗ, полученная 07.02.2007 в 02:43 UT. Видно, что результаты обработки и интерпретации также правильно идентифицируют основные характеристики сигнала ВНЗ для односкачковой моды 1F2. Выделение треков сигнала ВНЗ на ионограмме позволяет проводить выбор и корректировку рабочих частот радиосвязи [Ponomarchuk et al., 2016].

2 тип. Ионограммы данного типа имеют место, когда отражаемые слоями E или E_s частоты достаточно велики, при этом отражения от слоя F могут

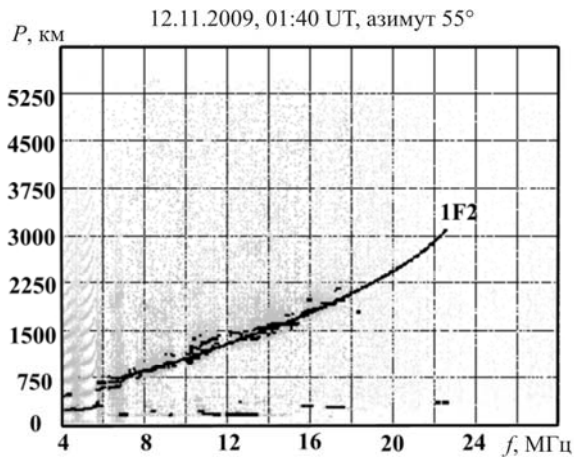


Рис. 3. То же, что на рис. 2, для 12.11.2009, 01:40 UT

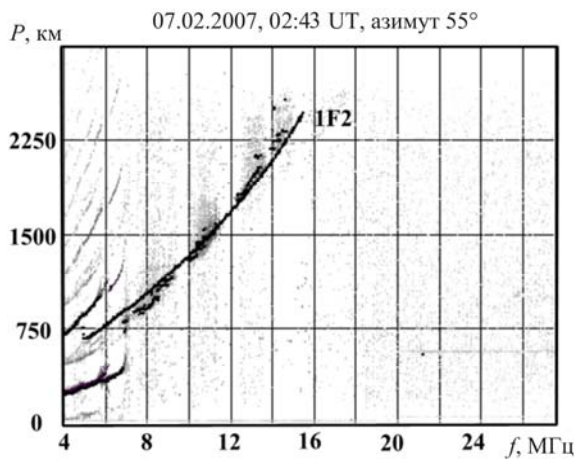


Рис. 4. То же, что на рис. 2, для 07.02.2007, 02:43 UT

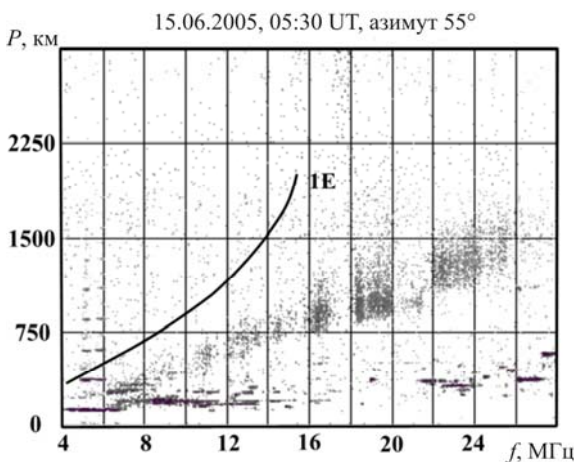


Рис. 5. Ионограмма ВНЗ и результаты моделирования $P_m(f)$: 15.06.2005, 05:30 UT

отсутствовать. Этот тип ионограмм позволяет судить об освещенности земной поверхности на расстояниях, не превышающих 1500–2000 км.

На рис. 5 приведена ионограмма ВНЗ, полученная в летний период 2005 г.: 15.06.2005, 05:30 UT. Сплошной линией на рисунке показаны результаты моделирования ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту $P_m(f)$ моды 1E, полученные при азимуте направления зондирования 55°. Отражения от слоя F на ионограмме ВНЗ в данный момент времени отсутствуют из-за сильного ослабления поля сигналов в распределенных слоях E и E_s в секторе зондирования.

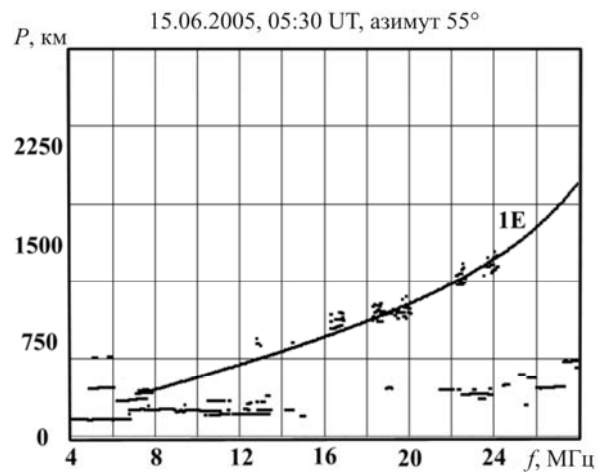


Рис. 6. Ионограмма ВНЗ и результаты обработки и интерпретации: 15.06.2005, 05:30 UT

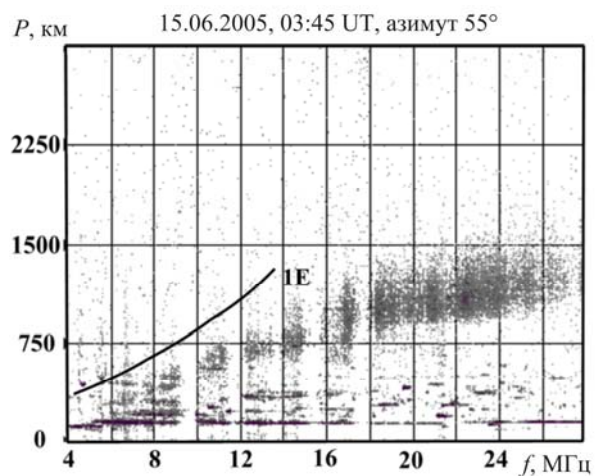


Рис. 7. Ионограмма ВНЗ и результаты моделирования $P_m(f)$: 15.06.2005, 03:45 UT

Присутствие спорадического слоя E_s в этот период времени подтверждается экспериментальными данными наклонного зондирования на трассе Магадан—Торы, а также данными вертикального зондирования. Результаты моделирования ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту моды распространения 1E существенно отличаются от экспериментальных данных, что связано с погрешностью прогнозирования критических частот слоя E в модели IRI. На рис. 6 приведены результаты вторичной обработки и интерпретации сигналов, соответствующие моде распространения 1E. На рис. 7 приведен пример экспериментальной ионограммы ВНЗ для случая, когда в точку приема приходят рассеянные земной поверхностью сигналы, отраженные от слоев E и E_s . Результаты обработки и интерпретации данных приведены на рис. 8. До рабочей частоты зондирования 20 МГц отражения рассеянных сигналов происходят от слоя E, после 20 МГц — от слоя E_s .

3 мин. Сигнал приходит в точку приема по двухскачковым или даже по трехскачковым траекториям за счет отражения от F-слоя и земной поверхности. В формировании сигнала ВНЗ могут участвовать также комбинированные моды. При определенном выборе параметров передатчика (скорость изменения частоты ЛЧМ-сигнала, мощность передатчика) возможно формирование ДЧХ сигналов ВНЗ рассеивающими

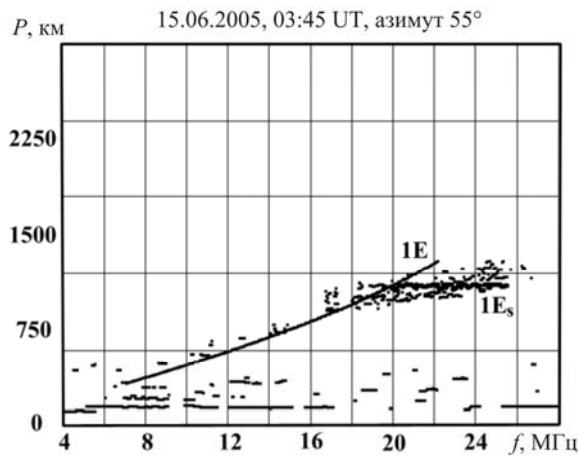


Рис. 8. Ионограмма ВНЗ и результаты обработки и интерпретации: 15.06.2005, 03:45 UT

участками, расположенными на удалении до 10 000 км [Алтынцева и др., 1990].

4 тип. К данному типу относятся ионограммы ВНЗ, на которых помимо сигналов, приходящих с направления основного излучения, регистрируются сигналы, приходящие с других направлений.

5 тип. Ионограммы с нестандартными следами отражений, имеющих слабую частотную зависимость группового пути, которые не могут быть интерпретированы как типовые сигналы ВНЗ. Появление таких сигналов может быть связано с отражением от сильных отражателей типа горных хребтов либо границы суша—море.

В качестве иллюстрации 3-, 4- и 5-го типов ионограмм ВНЗ приведем экспериментальные данные, полученные 22 января 2007 г. на базе ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН. Целью эксперимента было исследование особенностей формирования рассеянного сигнала ВНЗ, приходящего с разных азимутальных направлений. Прием сигналов ВНЗ осуществлялся на систему антенн типа БС-2 с последовательным переключением в течение часа через 15 мин азимутов основного направления приема: 55, 121, 235 и 301°. На рис. 9–13 представлены экспериментальные ионограммы ВНЗ и результаты моделирования ДЧХ ВНЗ по переднему фронту $P_m(f)$. Ионограмма, полученная для сеанса зондирования 05:01 UT (рис. 9), относится к четвертому типу ионограмм ВНЗ, когда помимо сигналов, приходящих с направления основного излучения, регистрируются сигналы, приходящие с других направлений. Результаты моделирования ДЧХ сигналов ВНЗ моды распространения 1F2 с использованием модели IRI, полученные для азимута направления зондирования 55°, показаны на рис. 9 (сплошная линия). Здесь же показаны результаты моделирования $P_m(f)$ (штриховая линия), полученные для азимутального направления 235°, противоположного основному направлению приема антенны БС-2. Из сопоставления результатов моделирования и экспериментальных данных можно сделать вывод, что разделение ДЧХ сигналов ВНЗ для данного сеанса обусловлено регистрацией рассеянных сигналов обратным лепестком диаграммы направленности приемной антенны. Наклон ДЧХ сигналов ВНЗ, приходящих с северного направления, больше наклона ДЧХ сигналов, приходящих с южного

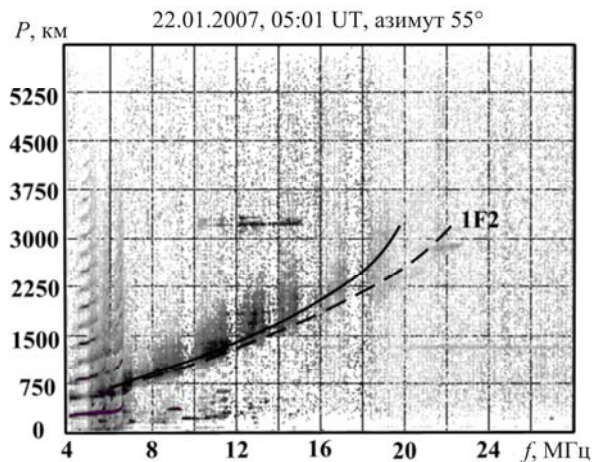


Рис. 9. Ионограмма ВНЗ и результаты моделирования $P_m(f)$: 22.01.2007, 05:01 UT

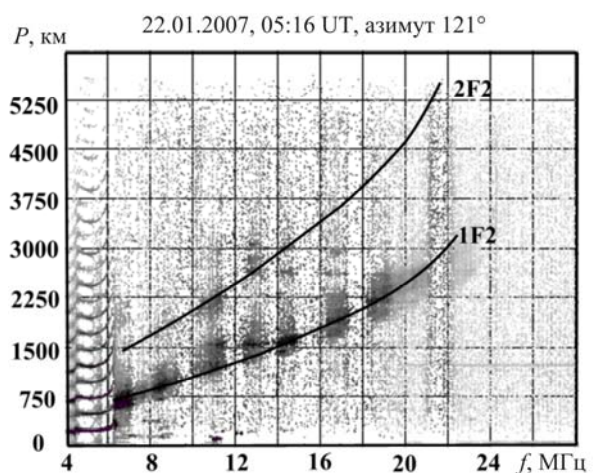


Рис. 10. То же, что на рис. 9, для 05:16 UT

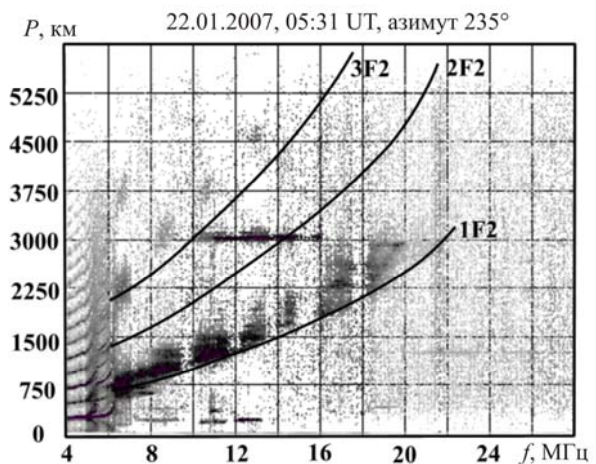


Рис. 11. То же, что на рис. 9, для 05:31 UT

направления. Эффект разделения ДЧХ сигналов ВНЗ более выражен в переходные часы суток вдоль направления зондирования и усиливается с увеличением мощности передатчика [Алтынцева и др., 1990]. Аналогичное разделение ДЧХ ВНЗ, менее выраженное, наблюдается для сеанса 05:46 UT при зондировании в секторе с азимутом 301°. На рис. 12 приведены ионограмма ВНЗ, полученная 22.01.2007 в 05:46 UT, и результаты моделирования ДЧХ сигналов ВНЗ по переднему фронту: сплошные линии — результаты моделирования $P_m(f)$ в секторе ВНЗ с азиму-

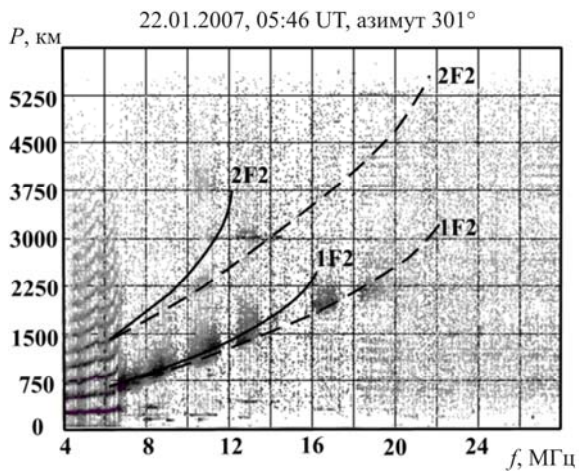


Рис. 12. То же, что на рис. 9, для 05:46 UT

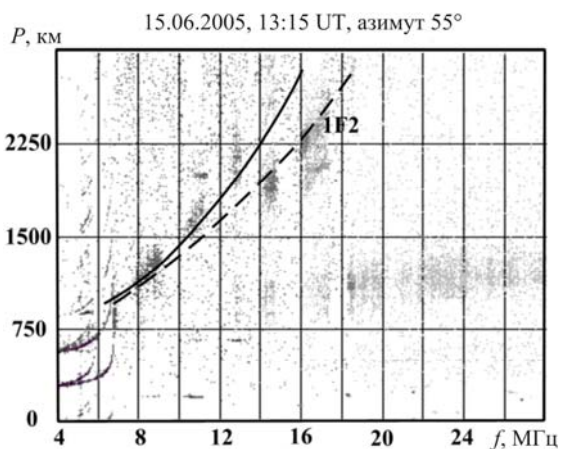


Рис. 13. Ионограмма ВНЗ и результаты моделирования $P_m(f)$: 15.06.2005, 13:15 UT

том 301°, штриховые — с азимутом 121°. В данном случае сигнал, регистрируемый с обратного направления приема, имеет большую амплитуду и более широкий частотный интервал по сравнению с прямым сигналом.

Помимо сигналов ВНЗ, соответствующих односкачковой моде распространения 1F2, на ионограммах, приведенных на рис. 10–12, присутствуют сигналы, приходящие в точку приема по двухскачковым и даже по трехскачковым траекториям за счет отражения от F-слоя и земной поверхности. Поэтому данные ионограммы также относятся и к третьему типу ионограмм. Двухскачковые и трехскачковые сигналы ВНЗ хорошо идентифицируются по результатам моделирования ДЧХ ВНЗ на основе метода нормальных волн с использованием модели IRI без адаптации ионосферных параметров.

Ионограммы ВНЗ, представленные на рис. 9 и рис. 11, можно также отнести к типу ионограмм с нестандартными следами отражений, имеющих слабую частотную зависимость группового пути, которые не могут быть интерпретированы как типовые сигналы ВНЗ. Появление таких сигналов на ионограммах для сеансов зондирования в 05:01 и 05:31 UT может быть связано с отражением от горных хребтов на юге Средней Азии — горной системы Памир, находящейся на удалении ~3000 км от пункта излучения в направлении с азимутом 235°.

6 мин. Условия распространения радиоволн существенно изменяются вдоль направления зондирования, что затрудняет выбор рабочих частот. На рис. 13 приведена ионограмма ВНЗ, полученная в летний период 2005 г.: 15.06.2005, 13:15 UT. Сплошной линией показаны результаты моделирования ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту $P_m(f)$ моды 1F2, полученные для направления зондирования с азимутом 55°, и штриховой линией — для обратного направления с азимутом 235°. Отражения от слоя F на ионограмме ВНЗ в данный момент времени присутствуют до частоты зондирования 14 МГц для прямого сигнала и до частоты 18 МГц для обратного сигнала. Для частот больше 18 МГц сигналы, соответствующие моде распространения 1F2, на ионограмме отсутствуют, что подтверждается результатами моделирования ДЧХ сигнала ВНЗ по переднему фронту с использованием модели IRI. Присутствие спорадического слоя E_s в секторе зондирования позволяет регистрировать сигналы ВНЗ, отраженные от слоя E_s . На рис. 14 приведены результаты вторичной обработки и интерпретации сигналов ВНЗ, соответствующие модам распространения 1F2 и $1E_s$. Сплошной линией показаны результаты интерпретации сигналов ВНЗ, приходящих в точку приема с азимута 55°, штриховой линией — результаты интерпретации сигналов, приходящих с обратного направления, азимутом 235°.

7 мин. В ионосфере отсутствуют условия для регулярного отражения сигнала и встречаются значительные неоднородности. На ионограммах присутствуют лишь сигналы обратного рассеяния от неоднородностей в ионосфере. Как правило, это происходит при сильных ионосферных возмущениях. На рис. 15 приведена ионограмма ВНЗ, полученная 11.09.2005 в 02:10 UT в период сильной магнитной бури 11–16 сентября 2005 г. Данный тип ионограмм характеризует возмущенность среды распространения радиоволн во время геомагнитных бурь. Для прогноза радиосвязи данные ВНЗ используются быть не могут.

8 мин. Для ионограмм восьмого типа характерно появление сигналов, для которых ближние границы отражений не зависят от частоты зондирования

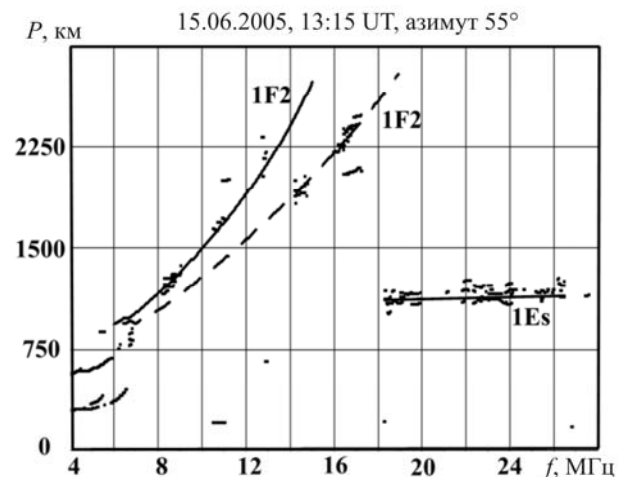


Рис. 14. Ионограмма ВНЗ и результаты обработки и интерпретации: 15.06.2005, 13:15 UT

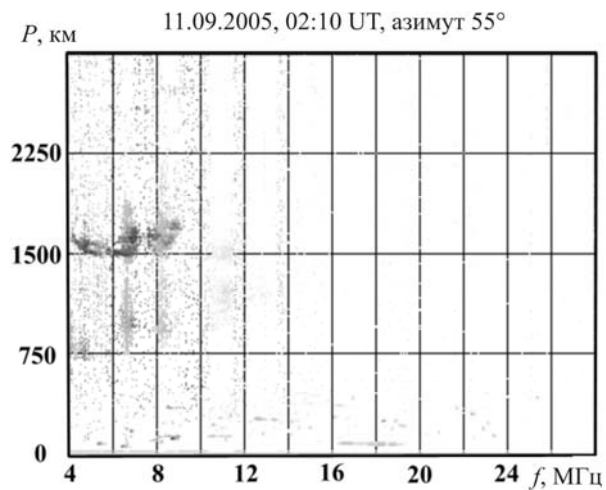


Рис. 15. Ионограмма ВНЗ: 11.09.2005, 02:10 UT

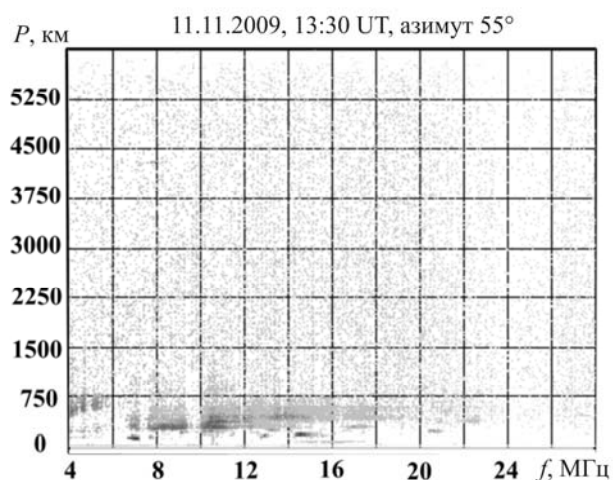


Рис. 16. Ионограмма ВНЗ: 11.11.2009, 13:30 UT

и приблизительно равны 100 км. Подобные отраженные сигналы наблюдаются в случае полной экранировки слоем E_s вышележащих слоев ионосферы. Признаком данного типа ионограмм является наличие сигналов, приходящих с дальностей от ста до нескольких сотен километров. В качестве примера на рис. 16 приведена ионограмма ВНЗ, полученная 11.11.2009 в 13:30 UT. Этот тип ионограмм также не позволяет использовать данные зондирования для контроля радиосвязи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Накопленный массив данных позволяет исследовать особенности распространения сигналов ВНЗ в различных гелиогеофизических условиях. Были выявлены наиболее характерные типы ионограмм и установлены условия появления того или иного типа в зависимости от времени суток, сезона, направления зондирования, состояния среды. Зимой, весной и осенью преобладают типы ионограмм с сигналами ВНЗ, соответствующими односкачковой моде распространения посредством отражения от F-слоя ионосферы. Состояние ионосферы, характеризуемое этим типом ионограмм, создает наиболее благоприятные условия для выбора и корректировки рабочих частот наклонного зондирования. Как правило, удается получать качественные ионограммы для дальности

до 3000–4000 км. В переходные часы суток наряду с основными сигналами регистрируются сигналы, приходящие с противоположных относительно азимута зондирования направлений. В летние периоды регистрируются сигналы, отраженные слоями E или E_s . При этом частоты принимаемых сигналов достаточно высоки и возможны случаи, когда отражения от слоя F отсутствуют. Этот тип ионограмм позволяет судить об освещенности земной поверхности на расстояниях, не превышающих 1500–2000 км. Были зарегистрированы также ионограммы с нестандартными следами отражений, имеющих слабую частотную зависимость группового пути, которые не могут быть интерпретированы как типовые сигналы ВНЗ.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук № П.12.2.2 и при поддержке гранта РФФИ № 16-32-00788. Экспериментальные данные получены на базе ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алтынцева В.Н., Брынько И.Г., Галкин И.А. и др. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы сигналом с линейной частотной модуляцией // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1990. Вып. 92. С. 106.
- Валов В.А., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. и др. ЛЧМ-ионозонд-радиопеленгатор и его применение в ионосферных исследованиях // Физические основы приборостроения. 2012. Т. 1, № 4(5). С. 24–43.
- Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1970. 376 с.
- Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. и др. Ионозонд-радиопеленгатор с линейной частотной модуляцией сигнала — новый инструмент для исследования ионосферы и распространения радиоволн // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 5. С. 287–306.
- 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.
- Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919–952.
- Кабанов Н.И., Осетров Б.И. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: Советское радио, 1965. 112 с.
- Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. М.: Советское радио, 1971. 567 с.
- Куркин В.И., Носов В.Е., Пономарчук С.Н. и др. Метод оперативной диагностики КВ-радиоканала // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Новосибирск, 1993. Вып. 100. С. 168–188.
- Куркин В.И., Носов В.Е., Матюшонок С.М. и др. Особенности распространения кругосветных сигналов на трассах российской сети ЛЧМ-ионозондов в годы низкой и средней солнечной активности // Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. 43, № 10. С. 843–854.
- 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.
- Урядов В.П., Вертоградов Г.Г., Вертоградова Е.Г. Радарные наблюдения F-рассеяния в среднеширотной ионо-

сфере с помощью ионозонда-радиопеленгатора // Известия вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 1. С. 1–11.

Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 288 с.

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

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 599–609.

Bryanko 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.

Earl G.F., Ward B.D. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar // Radio Sci. 1987. V. 22, N 2. P. 275–291.

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.

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.

Ivanov V. A., Ryabova N.A., Shumakov V.V., Uryadov V.P. Forecasting and updating HF channel parameters on the basis of oblique chirp sounding // Radio Sci. 1997. V. 32, N 3. P. 983–988.

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

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.

Sinnott D.H. The Development of Over-the-Horizon Radar in Australia. Defence Science & Technology Organisation, 1988. 39 p.

Wise J.C. Summary of recent Australian radar developments // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2004. P. 8–10.

REFERENCES

Altynseva V.I., Bryanko I.G., Galkin I.A., et al. Oblique back scatter sounding of the ionosphere by a linear-frequency modulation signal. *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* [Research on Geomagnetism, Aeronomy, and Solar Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1990, iss. 92, pp. 106–116. (In Russian).

Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, pp. 599–609.

Bryanko 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, vol. 8, no. 4, pp. 121–124.

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

Kuk Ch., Bernfel'd M. *Radiolokatsionnye signaly. Teoriya i primeneniye* [Radar Signals: Theory and Application]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971, 567 p. (In Russian). English edition: Cook C., Bernfeld M. *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application*. Academic press, 1967, 567 p.

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

Earl G.F., Ward B.D. The frequency management system of the Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar. *Radio sci.* 1987, vol. 22, no. 2, pp. 275–291.

Filipp N.D., Blaunstein N.Sh., Eruhimov L.M., Ivanov V.A., Uryadov V.P. *Sovremennye metody issledovaniya dinamicheskikh protsessov v ionosfere*. [Modern Methods of Investigation of Dynamic Processes in the Ionosphere]. Kishinev, Shtiintsa Publ., 1991, 288 p. (In Russian).

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.

Grozov V.P., Kiselev A.M., Kotovich G.V., Mikhailov S.Ya., Ponomarchuk S.N. Software for processing and interpretation of ionograms obtained by digital chirp ionosonde. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2013, vol. 4, pp. 75–85. (In Russian).

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

Ivanov V. A., Ryabova N.V., Shumakov 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, pp. 983–988.

Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., Uryadov V.P., Shumakov V.V. FMCW-ionosounder and its application in ionosphere research. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2003, vol. 46, no. 11, pp. 919–952. (In Russian).

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

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

Kurkin V.I., Nosov V.E., Matyushonok S.M. The features of round-the-world signal propagation over the paths of the Russian chirp-sounder network during low and mild solar activity. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2000, vol. 43, no.10, pp.755–765. (In Russian).

Podlesnyi A.V., Bryanko I.G., Kurkin V.I., Berezovsky V.A., Kiselyov 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 Moscow Proc.* 2009, pp. 1307–1310.

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-Terrestrial Physics]. 2014, iss. 25, pp. 33–39. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Kurkin V.I., Penzin M.S. Automatic processing and interpretation of backscatter ionosphere sounding ionograms. *Proc. SPIE*. 2016, vol. 10035, 100351E. DOI: 10.1117/12.2248765.

Sinnott D.H. *The Development of Over-the-Horizon Radar in Australia*. Defence Science & Technology Organisation Publ., 1988, 39 p.

Uryadov V.P., Vertogradov G.G., Vertogradova E.G. Spread-F radar observations in the midlatitude ionosphere using an ionosonde-radiodirection finder. *Izvestiya vuzov. Radiofizika* [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2013, vol. 56, no. 1, pp. 1–11. (In Russian).

Valov V.A., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., et al. LFM ionosonde-radiodirection finder and its application in the Ionospheric Researches. *Fizicheskie osnovy priborostroeniya* [Physical Bases of Instrumentation]. 2012, vol. 1, no. 4(5), pp. 24–43. (In Russian).

Varakin L.E. *Teoriya slozhnykh signalov* [Theory of Complex Signals]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1970, 376 p. (In Russian).

Vertogradov G.G., Uryadov V.P., Vertogradov V.G., et al. Chirp ionosonde-radiodirection finder as a new tool for Studying the Ionosphere and radio-wave propagation. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. [Radiophysics and Quantum Electronics]. 2013, vol. 56, no. 5, pp. 259–275. (In Russian).

Wise J.C. Summary of recent Australian radar developments. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. December 2004, pp. 8–10.

Как цитировать эту статью

Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Пензин М.С. Исследование особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 3. С. 61–69.

How to cite this article

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Penzin M.S. features of backscatter ionospheric sounding as studied with a chirp ionosonde. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3, iss. 3. P. 61–69.