

УДК

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

Г.А. Жеребцов, В.И. Куркин, А.П. Потехин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ В ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

G.A. Zherebtsov, V.I. Kurkin, A.P. Potekhin

В Институте солнечно-земной физики СО РАН создан комплекс радиофизических инструментов для исследования верхней атмосферы Земли. Комплекс включает радар некогерентного рассеяния, многопозиционный ЛЧМ-ионозонд с одним приемным и тремя передающими пунктами и два цифровых ионозонда DPS-4 в Иркутске и Норильске. В лекции дано описание инструментов комплекса, приведены примеры ионосферных исследований в период высокой и умеренной солнечной активности, включая мощные геомагнитные бури октября 2003 и ноября 2004 гг.

In the Institute of Solar-Terrestrial Physics (Irkutsk, Russia), a radio instrument network has been created for investigation of the upper atmosphere. The network includes the Irkutsk incoherent scatter (IS) radar, the multi-position chirp-ionosonde for investigating the ionosphere with 1 receiving station and 3 transmitting stations and 2 digital ionosondes DPS-4 at Norilsk and Irkutsk. This lecture presents the network description and some examples of comprehensive investigations of the ionosphere during years of high and moderate solar activity, including the events from October 2003 and November 2004.

Введение

Наземные радиофизические средства, работающие в широком диапазоне длин волн являются основным источником экспериментальных данных о верхней атмосфере Земли. Современные ионосферные исследования требуют глобального охвата наблюдаемых явлений и использования различных радиофизических и радиолокационных методов [Rottger, 1999].

В Институте солнечно-земной физики СО РАН создан комплекс радиофизических инструментов для исследования верхней атмосферы Восточно-Сибирского региона. Комплекс включает радар некогерентного рассеяния, многопозиционный ЛЧМ-ионозонд с одним приемным и тремя передающими пунктами и два цифровых ионозонда DPS-4 в Иркутске и Норильске. Диагностические средства комплекса дают возможность проводить полномасштабные исследования верхней атмосферы на обширной территории северо-восточного региона России в долготном секторе от 90° Е до 150° Е от субполярных до средних широт (вплоть до 50° N) и оказывать наземную поддержку спутниковых наблюдений.

Описание инструментов комплекса

Иркутский радар некогерентного рассеяния (НР) расположен в 100 км к северо-западу от города Иркутска. Установка представляет собой моностатическую импульсную РЛС с частотным сканированием (рис. 1) [Жеребцов и др., 2002]. Радар НР был создан на базе переданного ИСЗФ СО РАН оборудования радиолокационной станции (РЛС) «Днепр». При этом были заменены или модернизированы некоторые устройства переданного оборудования, главным образом приемники, системы управления, регистрации и обработки сигналов.

Ниже приведены основные технические характеристики радара:

- диапазон частот – 154...162 МГц;
- пиковая мощность одного передатчика – 3.2 МВт;

- длительность импульса – 10÷820 мкс;
- частота повторения импульсов – 24.4 Гц;
- тип антенны – секториальный рупор;
- коэффициент усиления антенны – 35...38 дБ;
- угловые размеры луча – 0.5°×10.0°;
- сектор сканирования – ±30°;
- поляризация – линейная;
- шумовая температура входного усилителя – 150 К;
- количество приемных каналов – 4.
- полосы пропускания приемных устройств – 25, 50, 100, 300 кГц.

Иркутский радар НР используется для измерения высотных профилей электронной плотности, температуры ионов и электронов, скорости дрейфа плазмы. Главное отличие Иркутского радара НР от подобных зарубежных систем заключается в возможности излучать и принимать радиоволны только одной линейной поляризации. Регистрация замираний НР-сигнала, вызванных Фарадеевским вращением плоскости поляризации электромагнитной волны делает возможным определение профиля электронной концентрации без привлечения внешних средств калибровки [Shpynev, 2003].

На очередном этапе модернизации радара 2002–2004 гг. был создан приемно-регистрирующий комплекс Иркутского радара НР с прецизионным цифровым многоканальным радиоприемным устройством с более широкими динамическим диапазоном, спектральной полосой и автоматическим контролем сквозных характеристик, что позволяет перейти на новый уровень проведения экспериментов с использованием современных цифровых технологий. Расширенный динамический диапазон обеспечит выделение слабых шумоподобных НР-сигналов на фоне мощных когерентных сигналов, отраженных от гор и рассеянных на плазменных неустойчивостях. Это позволит определять параметры ионосферы, начиная с высот средней и нижней ионосферы (90–150 км) и де-

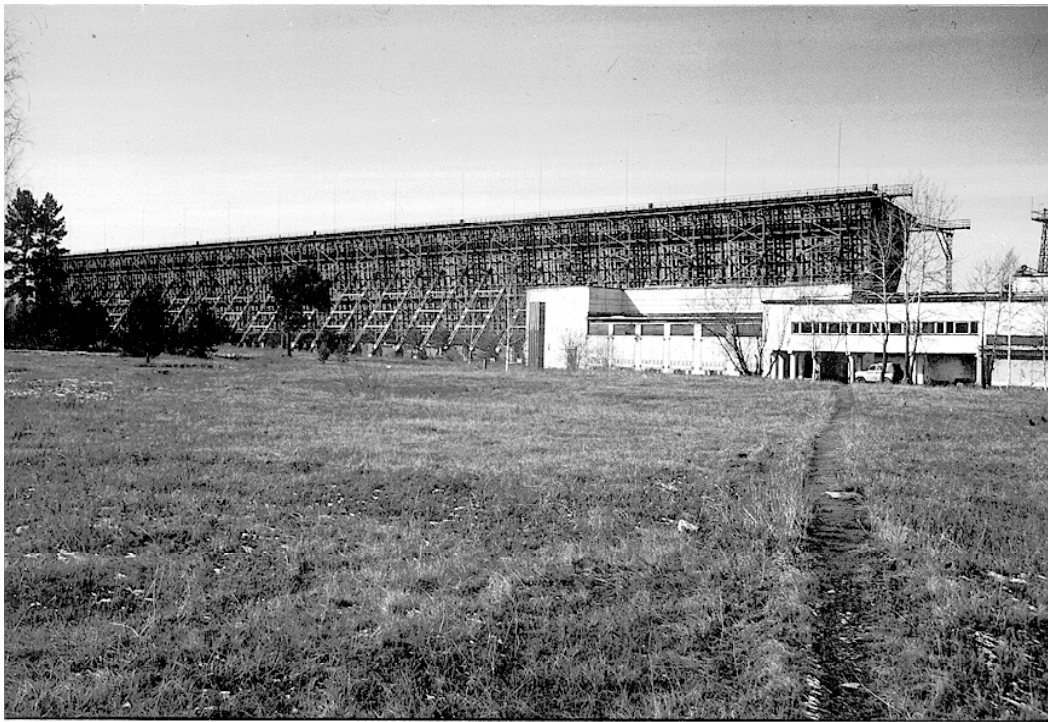


Рис. 1. Иркутский радар некогерентного рассеяния.

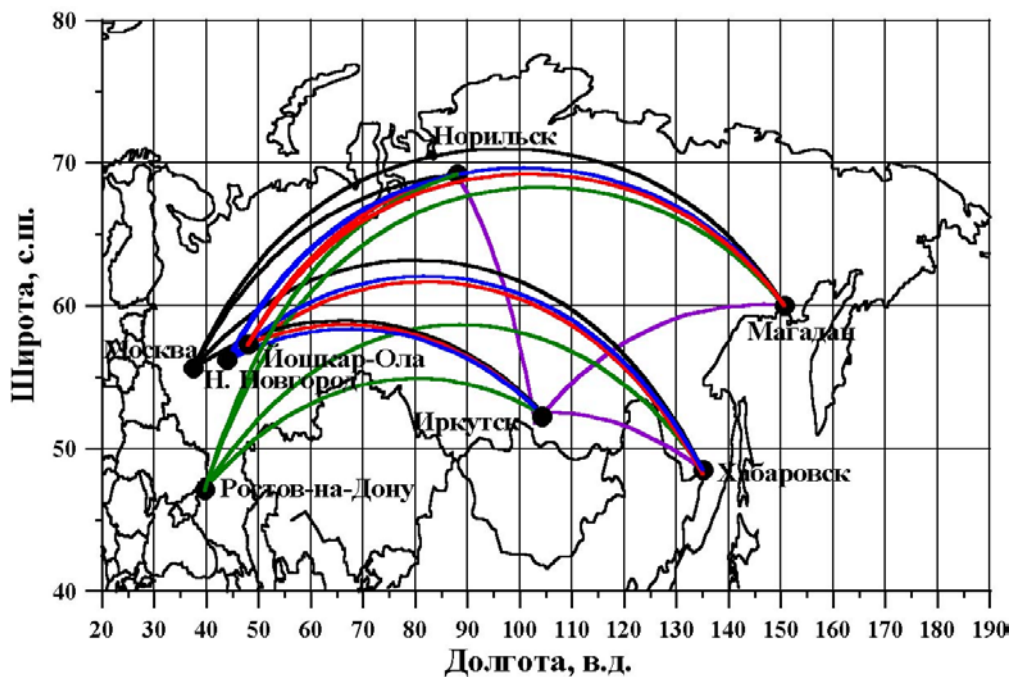


Рис. 2. Карта Российской сети ЛЧМ-ионозондов.

тектировать полезный ионосферный сигнал на фоне когерентных эхо, генерируемых во время сильных магнитных бурь. Расширение полосы позволяет повысить пространственное разрешение радара при использовании сложных кодированных сигналов и корреляционного метода их обработки. Многоканальность приемника дает возможность управлять диаграммой направленности радара и обеспечить реализацию интерферометрических измерений.

Многопозиционная установка, использующая сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) [Иванов и др., 2003] ИСЗФ является опорной в российской сети ЛЧМ-ионозондов, так как включает в

себя 3 из 4-х ее передающих пунктов. С помощью этой сети проводится зондирование ионосферы в обширных регионах и исследования распространения КВ-сигналов на трассах протяженностью от 2200 км до 6600 км по территории России в различных геофизических условиях. Основной передающий пункт ЛЧМ-ионозонда ИСЗФ СО РАН совмещен с радаром НР (52.9° N, 103.3° E), приемный пункт находится вблизи п. Торы в ~95 км юго-западнее Иркутска (51.7° N, 103.1° E). ЛЧМ-ионозонд предназначен для наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы и может использоваться для слабонаклонного зондирования (длина трассы около



Рис. 3. Внешний вид основного блока и монитора дигизонда DPS-4.

120 км, средняя точка трассы – в ~75 км западнее Иркутска). Выносные передающие пункты ИСЗФ СО РАН в Норильске (69°N, 88°E), Магадане (60° N, 150.7° E) оснащены унифицированным оборудованием с использованием GPS-приемника для привязки к системе единого времени, цифрового синтезатора AD9854 ЛЧМ-сигналов и системы управления на базе современной вычислительной техники, что позволяет обеспечить регистрацию высококачественных ионограмм НЗ с погрешностью менее 10 мкс и повысить скорость регистрации ионограмм в пять раз.

Ниже приведены основные технические характеристики ЛЧМ-ионозонда:

- вид зондирования – ВЗ, НЗ, ВНЗ;
- частотный диапазон, МГц – 1÷30;
- скорость изменения частоты, кГц/сек – 10÷1000;
- число регистрируемых спектров – 600;
- число отсчетов в спектре – 512;
- регистрируемые параметры – амплитуда, время распространения, отношение сигнал/шум, доплеровский спектр;
- излучаемая мощность, В – 300÷2500.

В стандартном режиме координированных экспериментов зондирование осуществлялось в диапазоне частот 4–30 МГц. Скорость перестройки частоты составляла 100 кГц/с. Передатчики работали круглосуточно с интервалом 15 мин. Это позволяло регистрировать на каждом приемном пункте ионограммы НЗ на четырех различных радиотрассах каждые 15 мин. В 2004 г отработана и успешно прошла испытание методика зондирования со скоростью перестройки 500 кГц/с. Такой режим зондирования открывает возможность исследования динамики характеристик радиоканалов (и ионосферы) с дискретностью 5 мин.

Расположение пунктов российской сети ЛЧМ ионозондов позволяет исследовать влияние неоднородностей субполярной и среднеширотной ионосферы на характеристики КВ-сигналов на радиополосах в азиатском долготном секторе, проследить отклик ионосферы на геомагнитные возмущения. Одновременная регистрация на субавроральных (Норильск – Нижний Новгород, Магадан – Йошкар-Ола и

др.) и среднеширотных (Магадан-Иркутск, Иркутск – Йошкар-Ола, Хабаровск – Ростов-на-Дону, Хабаровск – Москва и др.) трассах ЛЧМ-зондирования позволяет детально исследовать динамику границ главного ионосферного провала в различных геофизических условиях и оценивать влияние градиентов ионизации и мелкомасштабной турбулентности на характеристики декаметровых радиосигналов.

В конце 2002 г. ионосферные обсерватории ИСЗФ СО РАН в Иркутске и Норильске были оборудованы дигизондами (DPS-4) изготовленными в Центре Атмосферных Исследований университета Лоуэлл, США [Reinisch et. al, 1997]. Дигизонды используются в режиме регулярного мониторинга ионосферы. Помимо восстановления высотного распределения электронной концентрации и определения приближения границы аврорального овала к месту расположения ионозонда, они позволяют регистрировать динамические характеристики ионосферы – направление и величину скорости дрейфа ионосферной плазмы.

Координированные наблюдения на системе радиотрасс наклонного ЛЧМ зондирования с привлечением передатчика в Хабаровске (48.3° N, 135.1° E) и сети дигизондов DPS-4 в Норильске, Жиганске (66.8° N, 123.4° E), Якутске (62° N, 129.6° E) позволяют исследовать динамику крупномасштабных ионосферных явлений на субполярных и средних широтах (рис. 4) северо-восточного региона России при различной геомагнитной возмущенности. Так например, аномальные сигналы, распространяющиеся на наклонных трассах вне дуги большого круга несут информацию о положении границ главного ионосферного провала при сильных геомагнитных возмущениях.

Некоторые результаты ионосферных исследований за 1998–2005 гг.

Специальные эксперименты, направленные на исследование отклика ионосферы на мощные геомагнитные возмущения проводились на основе предсказаний солнечной активности, во время ожи-

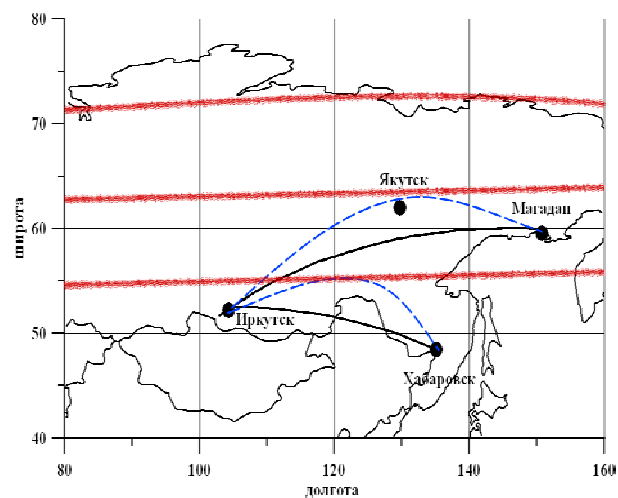


Рис. 4. Географическое положение экваториальной границы аврорального овала (жирная линия) и трасс распространения (вдоль дуги большого круга - сплошные линии, с боковыми отклонениями – штриховые линии).

даемых вспышек и выбросов корональной массы. С помощью радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН были исследованы самые значительные геомагнитные бури последних лет (25.09.1998, 15-16.07.2000, 20.03.2001, 17-20.4.2002, 27-30.05.2003, 29.10-01.11.2003, 9-12.11.2004 и 17-20.2005). Данные геомагнитные возмущения охватывают все сезоны года для высокой и умеренной солнечной активности, и позволяют исследовать общие закономерности и различия проявления сильных геомагнитных возмущений в среднеширотной ионосфере в различных геофизических условиях.

В качестве общего свойства всех указанных событий, следует указать резкое уменьшение электронной плотности на главной фазе бури, связанное с перестройкой структуры ионосферной конвекции от коротационного типа к конвекционному. Более низкие (до 2-х раз) значения N_e наблюдаются также в период восстановления. Индикаторами того, что область полярного овала во время данных событий распространяется на средние широты, является регистрация Иркутским радаром НР сигналов когерентного эха, наличие боковых отражений в ионограммах ЛЧМ-ионозонда на трассах Магадан-Иркутск и Хабаровск-Иркутск, появление спорадических образований аврорального типа в Е-слое по данным иркутского дигизонда. После возвращения системы дрейфов к коротационному типу на стадии восстановления в утренние и дневные часы, как правило, наблюдается положительное возмущение плотности N_e . В случае, когда главная фаза бури приходится на дневные часы, перед началом резкого уменьшения N_e наблюдается положительное возмущение. Значения электронной и ионной температур при уменьшении N_e на фазе восстановления являются повышенными в среднем на 300–500 К, особенно в утреннем секторе. Согласно предварительному морфологическому анализу сезонных особенностей реакции ионосферы на геомагнитные бури установлено [Pirig et al., 2005], что летом ионосферное возмущение имеет, в основном, отрицательный характер в течение всего периода бури, тогда как зимой в главную фазу бури преобладают возмущения положительного типа, а на ранней фазе восстановления – отрицательного типа. Сравнение с результатами моделирования показало, что указанные сезонно-широтные особенности реакции ионосферы могут быть обусловлены соответствующими вариациями нейтрального состава и термосферной циркуляции.

Наблюдения мощных бурь последних лет существенно расширили статистику по такому достаточно редкому явлению как среднеширотное когерентное эхо. Такие сигналы образуются при рассеянии на неоднородностях Е-слоя, вызванных неустойчивостями плазмы в области западного кольцевого электроджета. Когерентные эхо наблюдались практически во всех перечисленных событиях, что позволило установить ряд закономерностей их проявлений. Выявлено, что продолжительность наблюдения когерентных эхо составляет в среднем несколько часов в сутки, обычно в вечернее, ночное и утреннее время. Показано, что по продолжительности когерентное эхо можно разделить на непрерывное

(постоянно наблюдается свыше 1 ч) и фрагментарное (наблюдается интервалами не более 10 мин). Установлено, что непрерывное эхо имеет в основном теоретически ожидаемые «одногорбые» спектры. Ширина этих спектров превышает 300 Гц и соответствует, согласно общепринятой в настоящее время классификации, механизму их генерации двухпоточковой неустойчивостью. Показано, что смещение спектра достигает 500 Гц, и не наблюдается четкого разделения эхо по типам принятой классификации на основе величины доплеровского смещения частоты.

Сравнение ионосферного отклика на магнитную бурю 29–31 октября 2003 г. по данным различных инструментов радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН

Мощное геомагнитное возмущение октября 2003 г. стало суперпозицией двух больших магнитных бурь от солнечных вспышек 28.10(X17.2) и 29.10(X10.0). Во это время наблюдались следующие эффекты. Экваториальная граница аврорального овала достигала $\sim 46^\circ$ магнитной широты. Главный ионосферный провал ночью смещался до широт Иркутска, где наблюдались характерные для высоких широт большие продольные градиенты концентрации ($\sim 2 \times 10^5 \text{ см}^{-3}$ на 100 км). Относительная амплитуда отрицательных ионосферных возмущений концентрации достигала 60 %, при этом температуры электронов и ионов возрастали на 80 % и 70 % соответственно. На радаре НР наблюдались продолжительные мощные сигналы обратного рассеяния (радиоаврора), обусловленные неустойчивостями плазмы. Сравнение ионосферного отклика по данным одновременных измерений на дигизонде DPS-4, ЛЧМ-ионозонде и радаре НР позволяют сделать следующие выводы. В спокойных условиях 1 ноября и в перерыве между бурями 30 октября все три инструмента дают близкие профили электронной концентрации. Хорошо согласуются данные всех инструментов в начальной фазе первой бури и в главной фазе второй бури. Наибольшие отличия наблюдаются в начале фазы восстановления первой бури. На (рис. 5) приведены профили электронной концентрации N_e , пост-

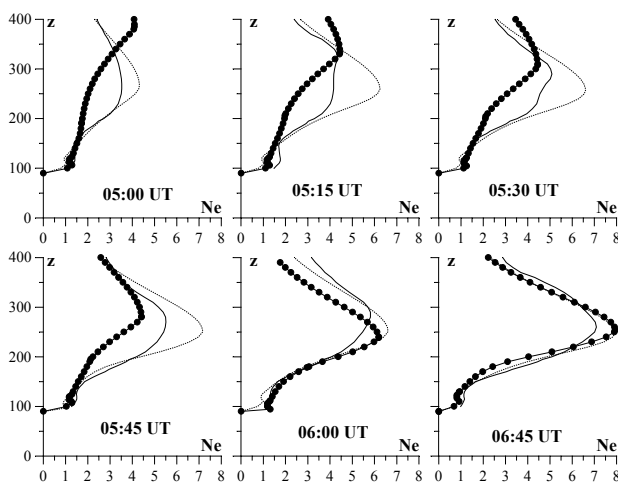


Рис. 5. Сравнение высотных профилей мощности, измеренных радаром НР, ЛЧМ-ионозондом и дигизондом во время бури 30 октября 2003 г.

роенные по данным трех инструментов (дигизонд – пунктирная линия, ЛЧМ-ионозонд – линия с кружками, радара НР – тонкая сплошная линия). Данные измерения показывают, что в 05:00, 05:15, 05:30, 05:45 UT три инструмента дают сильно отличающиеся результаты, в 06:00 – довольно близкие, в 06:45 профили дигизонда и ЛЧМ-ионозонда практически совпадают. В 05:15 и 05:30 радар НР и ЛЧМ-ионозонд дают близкие значения максимальной электронной концентрации, но значения N_e на высоте ~ 250 км различаются на $\sim 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, приблизительно настолько же различаются значения дигизонда и радара НР. Наблюдаемые отличия обусловлены сильной горизонтальной неоднородностью ионосферы. Взаимное расположение диагностических средств позволяет оценить пространственный градиент максимального значения электронной концентрации как величину порядка $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на 100 км.

Заключение

В Институте солнечно-земной физики СО РАН создан комплекс радиофизических инструментов для исследования верхней атмосферы северо-восточного региона России. Комплекс дает возможность проводить полномасштабные исследования верхней атмосферы на обширной территории северо-восточного региона России в долготном секторе от 90° E до 150° E от субполярных до средних широт (вплоть до 50° N) и оказывать наземную поддержку спутниковых наблюдений. В результате координированных исследований реакции ионосферы в северо-восточном регионе России ($90\text{--}160^\circ$ в.д.) на геомагнитные бури в период 1998–2005 гг. установлено, что во время сверхмощных бурь ($D_{st} < -300$ нТ, $K_p \approx 9$) наблюдался устойчивый сценарий развития возмущений: авроральный овал и главный ионосферный провал сильно смещались в область средних широт, где регистрировались диффузные E_s аврорального типа, широкий спектр неоднородностей и волнообразных возмущений в E- и F-областях, продолжительные сигналы радиоавроры, наблюдались сильные изменения профиля концентрации и разогрев плазмы. Таким образом, во время этих событий на средних широтах ионосфера по своим основным характеристикам приобрела свойства полярной ионосферы.

Результаты, изложенные в лекции, получены при поддержке гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Röttger J. Radar system in ionospheric research, in Modern radio science 1999, edited by M.A. Stuhly, Oxford University Press, 213-247, 1999.
2. Жеребцов Г.А., Заворин А.В., Медведев А.В., Носов В.Е., Потехин А.П., Шпынев Б.Г., Иркутский радар некогерентного рассеяния // Радиотехника и электроника, 47(11), 1-7, 2002
3. Shpynev B.G. Incoherent scatter Faraday rotation measurements on a radar with single linear polarization, Radio Sci., Vol. 39, No.3, 2003.
4. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Изв. ВУЗ, Радиофизика, Т.46, №.11, 919-952, 2003.
5. Reinisch, B.W., Haines, D.M., Bibl, K., et al. Ionospheric sounding support of OTH radar. Radio Science 32, 1681-1694, 1997.
6. Afraimovich E.L., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P. GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances. J. Atm. Terr. Phys, V. 60, No.12, 1205-1223, 1998.
7. Pirog O.M., Polekh N.M., Ratovsky K.G., Zherebtsov G.A., V.F.Smironov V.F., J.K.Shi, X.Wang Season variation of ionospheric effects of geomagnetic storm at different latitudes in East Asia. //Adv. Space Res., 2005 (in print) <http://www.cosis.net/abstracts/COSPAR04/01026/COSPAR04-A-01026.pdf>

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск