

## МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛЧМ ИОНОЗОНД ДЛЯ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

А.В. Подлесный<sup>1</sup>, И.Г. Брынько<sup>1</sup>, В.И. Куркин<sup>1</sup>,  
В.А. Березовский<sup>2</sup>, А.М. Киселев<sup>2</sup>, Е.В. Петухов<sup>2</sup>

*1- ИСЗФ РАН, Россия, Иркутск*

*2- ФГУП ОНИИП, Россия, Омск*

В работе представлена совместная разработка ИСЗФ СО РАН (Иркутск) и ФГУП ОНИИП (Омск) – многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы.

Главными отличительными особенностями нового ионозонда – реализация возможности параллельной регистрации сигналов вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами, высокая электромагнитная совместимость, компактность и низкое энергопотребление. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд может являться базовым элементом системы мониторинга состояния ионосферы и каналов связи на территории России.

Ключевые слова: ионозонд, ионосферное распространение радиоволн, вертикальное, наклонное и возвратно-наклонное зондирование, непрерывный ЛЧМ сигнал.

### ВВЕДЕНИЕ

Применение КВ сигналов с линейной модуляцией частоты (ЛЧМ) в ионосферных исследованиях насчитывает более чем полувековую историю [см. напр. 1-3 и цитируемую там литературу]. Для проведения прикладных исследований за рубежом были разработаны высокоэффективные специализированные системы с использованием непрерывных ЛЧМ сигналов [4-6]. Такие сигналы традиционно применяются для проведения наклонного зондирования трасс большой протяжённости и возвратно-наклонного зондирования, при котором преимущества применения сигналов с большой базой реализовывались в полной мере. Высокие потребительские качества ЛЧМ сигналов привели к широкому использованию их в военной радиолокации и вспомогательных системах [6-8], в коммерческих и военных системах связи [9-11], что ограничивало распространение технологических и конструктивных особенностей ЛЧМ ионозондов для научных исследований. В частности, в США фирма Barry Research произ-

водит такие устройства в течение многих лет [12-16], однако ни места расположения их, ни данных зондирования в открытом доступе нет. Отдельные примеры создания на их базе модифицированных устройств для исследования тонких ионосферных эффектов при распространении КВ радиосигналов реализованы в ЮАР [17, 18], Великобритании [19, 20] и США [21,22].

В России разработка ЛЧМ ионозондов ведется независимо от зарубежных аналогов с 80-х годов прошлого столетия [см. 3 и цитируемую там литературу] усилиями сотрудников образовательных (МарГТУ, НИРФИ, РГУ) и академических организаций (ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН). Наряду с решением технологических вопросов, проводились интенсивные координированные исследования наклонного распространения КВ на трассах различной протяженности, вплоть до кругосветных [3, 23-25]. В последние годы развивается сеть наклонных ЛЧМ радиотрасс Росгидромета [26].

Целью настоящего сообщения является изложение современного состояния проблемы

Подлесный Алексей Витальевич, м.н.с., ИСЗФ СО РАН, (3952) 428265, e-mail: pav@iszf.irk.ru

Брынько Иван Георгиевич, гл. инженер ГФО «Торь», (3952) 428265, ИСЗФ СО РАН, e-mail: big@iszf.irk.ru

Куркин Владимир Иванович, зам. дир. по научной работе, ИСЗФ СО РАН, (3952) 428265, e-mail: kurkin@iszf.irk.ru

Березовский Владимир Александрович, ген. директор ОАО «ОНИИП», (3812)363264, e-mail: info@oniip.ru

Киселёв Александр Миронович, с.н.с. ОАО «ОНИИП», (3812)514969, e-mail: info@oniip.ru

Петухов Евгений Валерьевич, нач. отдела, ОАО «ОНИИП», (3812)514969, e-mail: info@oniip.ru

разработки многофункционального ионозонда для вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования (ВЗ, НЗ и ВНЗ) ионосферы с использованием непрерывного ЛЧМ сигнала.

### МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЛЧМ ИОНОЗОНД

Применение непрерывных сигналов с ЛЧМ при ВЗ ограничивалось из-за необходимости

непрерывной работы передатчика и просачивания прямого сигнала в приёмный тракт [27]. Одним из возможных вариантов решения этой проблемы является использование коммутации псевдослучайной последовательностью [23, 28]. Известно о существовании зарубежных исследовательских сетей ионозондов вертикального и наклонного ЛЧМ зондирования в южно-азиатском и австралийском регионах земного шара, реализующих эту идею (рис. 1) [29, 30].

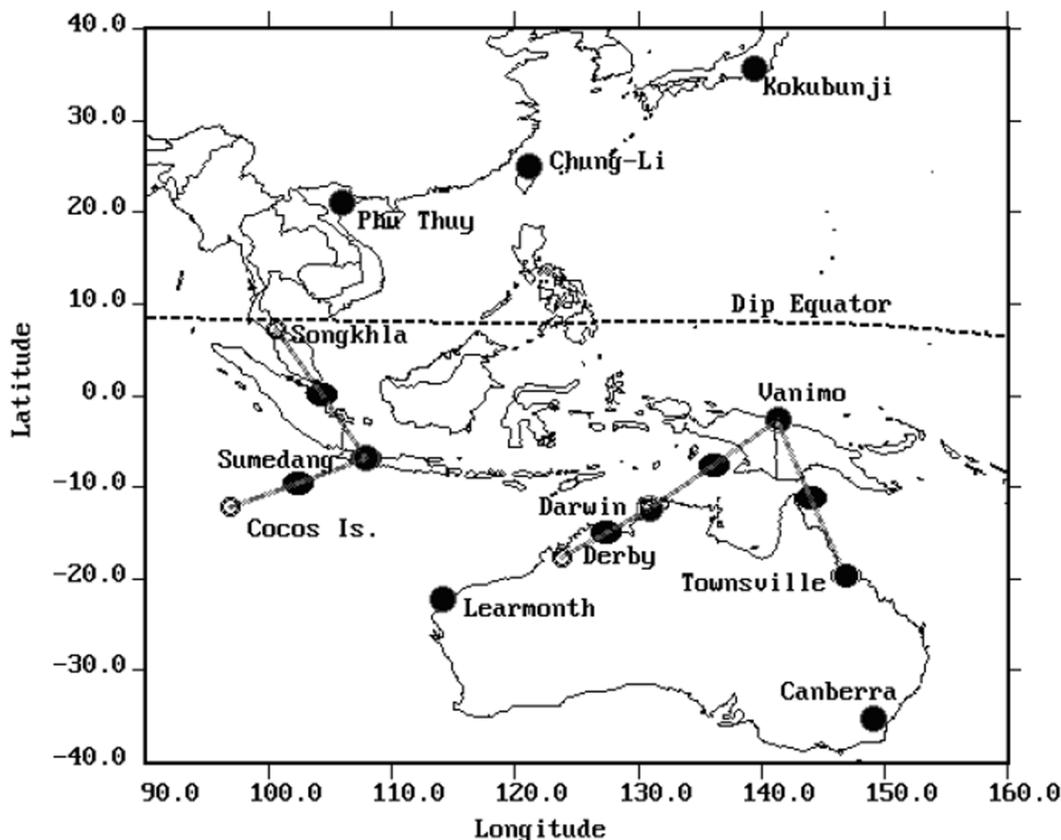


Рис. 1. Сети ЛЧМ зондирования в южно-азиатском и австралийском регионах земного шара.

Однако, в настоящее время, проблема электромагнитной совместимости приемной и передающей частей ионозонда при использовании непрерывного ЛЧМ сигнала может быть решена путем применения цифровых приёмников с большим динамическим диапазоном [31] и разнеса передающей и приемной антенн [32, 33]. Среди всех сигналов с большим значением произведения длительности на полосу частот, которые были предложены для радиолокации, ЛЧМ сигналы нашли наиболее широкое применение. В отличие от импульсных ионозондов, ЛЧМ ионозонд не излучает последовательность импульсов на различных частотах и не использует коммутацию антенн для решения проблемы перегрузки приёмника во время ра-

боты передатчика. Данный ионозонд за счёт использования цифровой обработки сигнала и непрерывных сигналов со сложной фазовой модуляцией имеет излучаемую мощность порядка десяти ватт, что позволяет добиться более высокой электромагнитной совместимости по сравнению с другими типами ионозондов (минимальная мощность передатчиков импульсных ионозондов составляет порядка сотен ватт). На рисунке 2 приведен внешний вид специализированного ЛЧМ ионозонда ППИ-МД (децимальный номер УИЯД.464511.037), разработка которого завершена в 2011 году совместно ОНИИП и ИСЗФ СО РАН в рамках ОКР.



обработки сигналов. Приёмный тракт с прямой оцифровкой несущей частоты 16 бит 100 МГц, цифровое гетеродинирование и прореживание сигнала обеспечивает подавление внеполосных составляющих более 90 дБ. Достоинство цифровой обработки – лёгкость смены алгоритма.

Например, для перехода от приёма на фиксированной частоте к приёму ЛЧМ сигналов, достаточно перейти на другую ветвь универсальной программы.

В таблице 1 приведены основные характеристики ЛЧМ ионозонда ИСЗФ СО РАН.

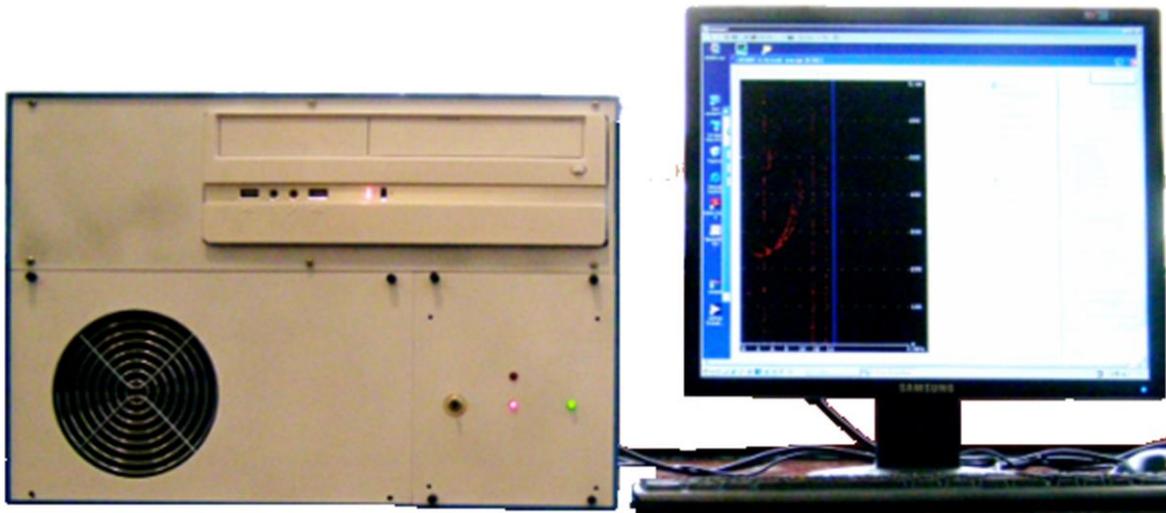


Рис 4. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд ИСЗФ СО РАН

Таблица 1. Характеристики ЛЧМ ионозонда

Передатчик		Приёмник	
Диапазон рабочих частот	1-30 МГц	Диапазон рабочих частот	1-170 МГц
Скорость перестройки частоты	50-4000 кГц/с	Скорость перестройки частоты	0, 50-4000 КГц/с
Точность привязки к шкале мирового времени	Не хуже 1 мкс	Режимы работы	ВЗ, НЗ, ВНЗ, доплеровские измерения
Максимальная мощность излучения	30 Вт	Ширина полосы пропускания	8-80 кГц
Динамический диапазон	62,7 дБ	Формат выходных данных	wav, dat, sbf
Графический интерфейс	Есть	Чувствительность в рабочем диапазоне	Не хуже 0,3 мкВ
Шаг перестройки по частоте	1 Гц	Количество каналов приёма	4(16)

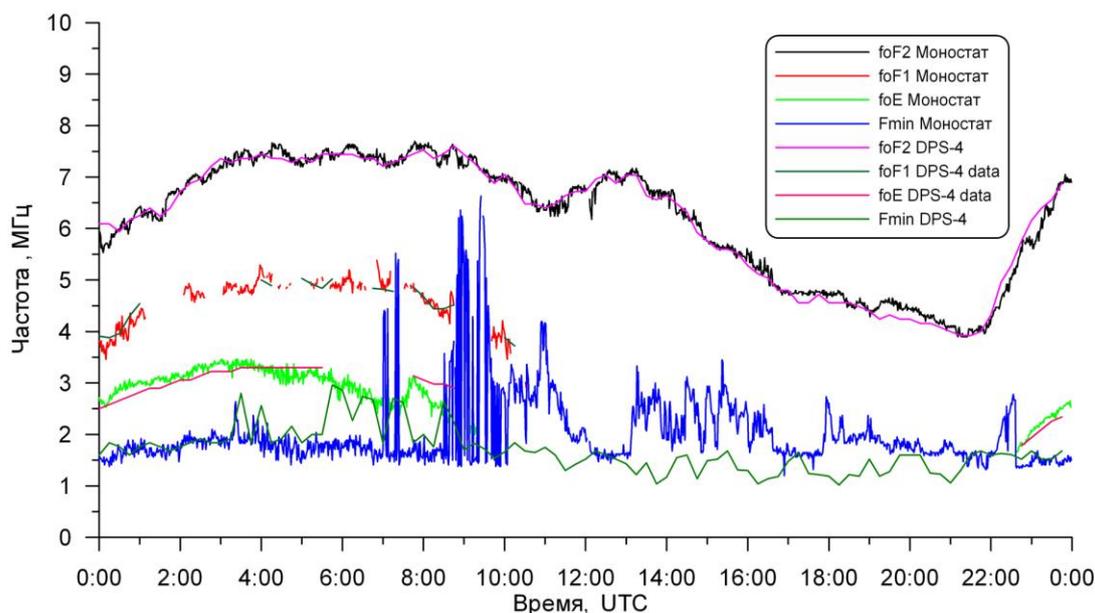


Рис. 5. Результаты ВЗ DPS-4 (Иркутск) и ЛЧМ ионозонда (Моно стат) (Торы, Бурятия)

В штатном режиме зондирования ведутся ежеминутные измерения ВЗ в диапазоне от 1,3 до 10 МГц, со скоростью перестройки частоты 500 кГц/с и пиковой мощностью излучения 8 Вт. Одновременно с ВЗ приёмник ионозонда принимает сигнал ежеминутного НЗ от ЛЧМ передатчика мощностью 100 Вт, расположенного вблизи города Усолье-Сибирское на расстоянии 120 км от приёмного пункта и работающего в диапазоне от 1,5 до 10 МГц со скоростью перестройки 400 кГц/с. Во время проведения координированных наблюдений ионозонд также принимает сигналы НЗ от передатчиков, расположенных в Норильске, Хабаровске и Магадане. Возможность получения ионограмм ВЗ в формате SBF была использована для проведения сравнения результатов, получаемых на DPS-4 [34], расположенном в Иркутске, и ЛЧМ ионозондом, расположенном на расстоянии 100 км от г. Иркутска.

Существенным отличием в работе ионозондов являлась скважность зондирования. Стандартная скважность зондирования дигизонда 15 минут, ЛЧМ ионозонда – 1 минута. Видно (рис. 5), что значения параметров ионосферных отражений, полученные на инструментах близки друг к другу, отклонение между данными существенно меньше, чем значения характеристик.

Различия, по всей видимости, обусловлены пространственным разнесением инструментов, и их анализ требует отдельных исследований.

Также очевидно, что работа с 15-минутным интервалом зондирования не отражает многих деталей гораздо более быстрой динамики ионосферных параметров. Рассматриваемый день характеризовался появлением спорадических слоёв, частично экранирующих отражения от более высоких регулярных слоёв. Поэтому можно заметить, что ЛЧМ ионозонд гораздо чаще позволяет определить параметры отражений в условиях частичного поглощения, что говорит о превышении энергетического потенциала ЛЧМ ионозонда над потенциалом дигизонда, несмотря на то, что мощность передатчика ЛЧМ ионозонда (8Вт) почти на 2 порядка меньше мощности передатчика DPS-4 (300 Вт).

Новый ионозонд имеет развитую систему фильтрации и первичной обработки данных зондирования. Квадратурная обработка позволяет использовать фазовую информацию, содержащуюся в сигнале, для детектирования помех и эффективного их подавления во временной области. В последующем, для получения ионограммы, производится вычисление оконного БПФ для получения спектра сигнала. В спектральной области проводится дополнительная компенсация коэффициента усиления антенны и вторая стадия подавления стационарных помех. Результаты работы системы очистки данных ЛЧМ зондирования демонстрирует рис. 6.

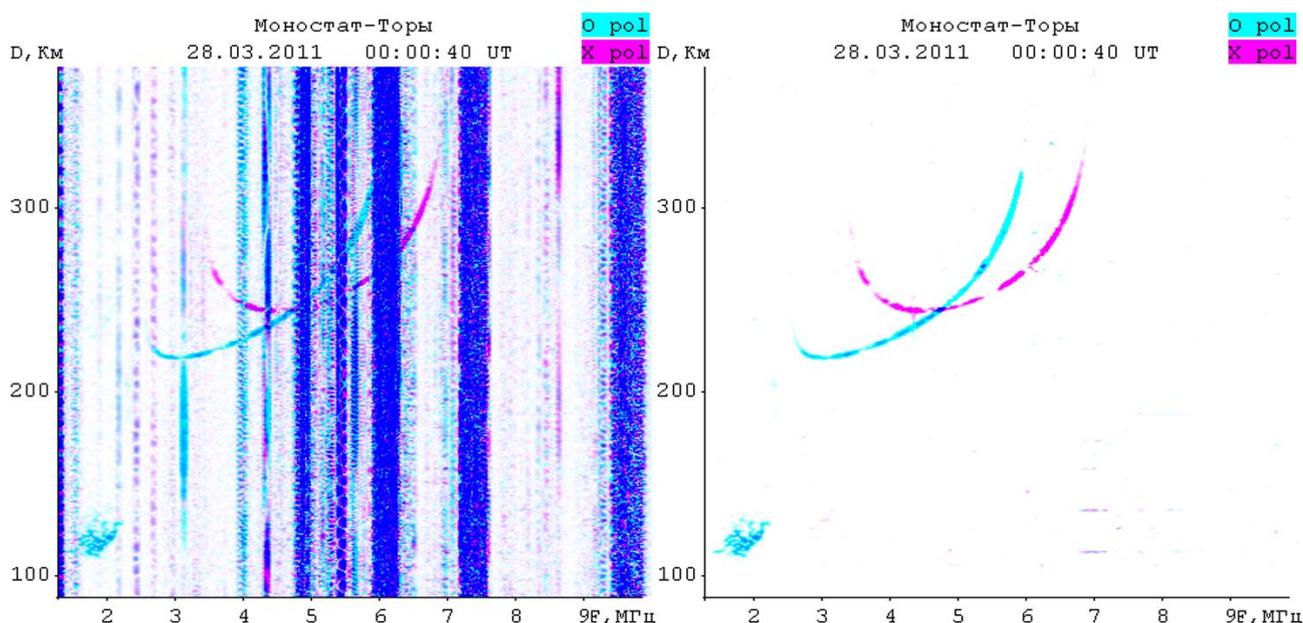


Рис. 6. Ионограмма ВЗ. Слева – до очистки помех, справа – после очистки

Возможность получения полноценной ионограммы за короткое время и работы без пауз между сеансами позволяет проводить исследования быстротекущих процессов в ионосфере. В последние годы существенно возрос интерес исследователей к нерегулярным проявлениям ионосферного слоя E. В работах, проводимых в ИСЗФ СО РАН, отмечается наличие короткоживущих (несколько минут и менее) спорадических образований с достаточно высокими электронными концентрациями [35, 36]. Повышение скважности ВЗ позволит провести более подробное изучение динамики поведения таких образований.

Координированные наблюдения с использованием сети инструментов ЛЧМ зондирования и возможность одновременного съёма ионограмм в нескольких точках позволяет исследовать характеристики перемещающихся пространственных неоднородностей ионосферы (ПИВ). Причинами появления ПИВ обычно являются различные атмосферные или ионосферные возмущения, обычно это атмосферные гравитационные волны. Наиболее ярко такие возмущения проявляются в F-области, являясь причиной вариаций высот и концентраций ионосферных слоёв. Для получения информации о характеристиках распространения ПИВ требуется сопоставление наблюдений, проводимых несколькими разнесёнными ионозондами, работающими с периодичностью, достаточной для определения вариаций, вызванных ПИВ, которые обычно имеют характерные периоды от нескольких минут в области E-слоя до десятков минут в области F-слоя. Регуляр-

ное проведение долговременных координированных наблюдений на сети ЛЧМ зондирования ИСЗФ СО РАН обусловило накопление большого количества данных о поведении ионосферы в обширном регионе и создало предпосылки для их изучения [38-40] и развития методик определения параметров возмущений [41]. Также имеются работы по совместному использованию данных, полученных на различных инструментах, для уточнения параметров распространения ПИВ [42].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом работ по использованию цифровой обработки на передающей и приёмной части оборудования станций сети ЛЧМ зондирования стало создание идеологии унифицированных систем диагностики ионосферы в режимах ВЗ, НЗ и ВНЗ на базе цифрового ЛЧМ ионозонда.

Высокая электромагнитная совместимость, малые габариты и энергопотребление являются визитной карточкой ЛЧМ ионозонда. Низкая излучаемая мощность, возможность работы в широком диапазоне скоростей зондирования и малое время необходимое для получения ионограммы существенно упрощают задачу уменьшения взаимного влияния работы ионозонда на близкорасположенные средства диагностики за счёт временного и частотного разнесения.

Использование современных спецпроцессоров для генерации и приёма ЛЧМ сигналов и применение полупроводниковых твердотельных усилителей низкой мощности обуславли-

вают относительно невысокую цену ЛЧМ ионозонда по сравнению с существующими импульсными ионозондами.

ЛЧМ ионозонд может являться базовым элементом при разработке оптимальной системы ионосферного мониторинга, состоящей из нескольких передающих пунктов – ЛЧМ ионозондов с мощностью излучения ~100 Вт для НЗ и достаточно плотной сети ЛЧМ ионозондов ВЗ (с излучаемой мощностью ~10 Вт), обладаю-

щих полной сигнальной совместимостью и временной синхронизацией с ионозондами НЗ.

Работа подготовлена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Государственный контракт № 14.518.11.7065 и соглашение № 8388) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-05-00892)

A.V. Podlesnyi, I.G. Brynko, V.I. Kurkin, V.A. Berezovsky, A.M. Kiselev, E.V. Petuchov

In this paper the joint development of the ISTP SB RAS (Irkutsk) and ONIP (Omsk) - multifunctional chirp ionosonde.

The main features of the new ionosonde - the possibility of parallel implementation of signal recording vertical, back-scatter and oblique sounding of the ionosphere continuous chirp signals, high electromagnetic compatibility and low power consumption. Multifunctional chirp ionosonde may be a basic element of the ionosphere and communication channels monitoring in Russia.

KEYWORDS: IONOSONDE, IONOSPHERIC PROPAGATION OF RADIO WAVES, VERTICAL AND BACK-SCATTER SOUNDING, CONTINUOUS CHIRP SIGNAL.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Titheridge J.E. // J.Atm.Terr.Phys. 1962, V.24, P.269.
2. Fenwick R.B. and Barry G.H. Step by step to a linear frequency sweep //Electronics, v.38, July 1965, p.66.
3. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Известия Вузов. Радиофизика. – 2003. –Т.46, № 11. – С.919-952.
4. G.H. Barry and R.B. Fenwick. Extraterrestrial and ionospheric sounding with synthesized frequency sweeps. Hewlett-Packard J., 16, 8-12, 1965.
5. Croft T.A. //Reviews of Geophysics and Space Physics. 1972, V.10, No 1, P. 73.
6. Sweney L.E. //Rept. SEL-70-034 ( TR No. 155), Stanford Electronics Laboratories, Stanford, Calif., June 1970.
7. Barnum J.R. The Effect of Polarization Rotation on the Amplitude of Ionospherically Propagated Sea Backscatter. //Technical report No. 157, Radioscience laboratories, Stanford, Calif., 1970.
8. Earl G.F., Ward B.D. //Radio Sci. 1987, V.22, No 2, P. 275.
9. Lynn K.J.W. "Oblique Sounding in Australia" //INAG 62, 1998, pp. 14-18.
10. Goodman J.M., Ballard J.W., Sharp E. D., and Trung Luong. //Proceedings of Session G5 at the XXVth GA URSI, Published WDC-A, Boulder, 1998, pp. 64-70.
11. Bröms M., Lundborg B. //Annali di Geofisica, 1994, No. 2, P. 145.
12. The new VOS-1 vertical/ oblique sounder. //Prospect " Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1970.
13. Chirpsounder Receiver Systems. //Prospect " Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1972.
14. Ionospheric Chirpsounder Transmitter TCS-4. //Prospect " Barry Research" Palo Alto, Calif., USA, 1973.
15. HF Chirpsounder Receiver Model RCS-5. //Prospect " BR Communications", USA, 1985.
16. HF Chirpsounder Transmitter Model TCS-5. //Prospect "BR Communications", USA, 1990.
17. Poole A.W.V. and Evans G.P. //Radio Sci. 1985,V. 20, No. 6, P. 1617.
18. Poole A.W.V. "Rhodes University Chirp sounding research"// INAG 47, 1986 p. 4
19. Arthur, P.C., Lissimore, M., Cannon, P.S., and Davies, N.C. //Seventh Int. Conf. on HF Radio Systems and Techniques, 1997, IEE Conf. Pub., 441, pp. 135-139.
20. Arthur P.C. and Cannon P.S. //Annali di Geofisica, 1994, vol. XXXVII, No. 2, P.135.
21. Sherill W.M., Green T.C., and Martin P.E. //Radio Sci., 1972, V.7, No 2, P.251.
22. Black Q.R., Wood J.F., Jr., Sonstebly A.G., and Sherrill W.M. //Radio Sci., 1993, V. 28, No 5, P. 795.
23. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В. Развитие радиофизических методов диагностики ионосферы и каналов КВ-связи с использованием цифровых ЛЧМ-сигналов // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 23-26 мая 2011 года. Йошкар-Ола. МарГТУ. - 2011. – Т.1. - С. 20-30.
24. Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, В. Г. Вертоградов, Е. Г. Вертоградова, С. В. Кубатко, В.А. Валов Многофункциональный комплекс для наклонного зондирования на базе ионозонда радиопеленгатора // ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ №12, 2010
25. Подлесный А.В., Куркин В.И., Ратовский К.Г., Брынько И.Г. Использование непрерывных

- ЛЧМ - сигналов для вертикального зондирования ионосферы // Распространение радиоволн. XXIII Всеросс. науч. конф. Йошкар-Ола, 23-26 мая 2011 г.: сб. докл. в 3-х тт. Йошкар-Ола: МарГТУ. 2011. Т.1. С.259-262.
26. <http://www.aari.ru/clgmi/geophys/lfm.php>
  27. Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М. и др. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиница, 1991. 288 с.
  28. Pezzopane, M., Zucheretti, E., Abadi, P., de Abreu, A. J., de Jesus, R., Fagundes, P. R., Supnithi, P., Rungraengwajjake, S., Nagatsuma, T., Tsugawa, T., Cabrera, M. A., and Ezquer, R. G.: Low-latitude equinoctial spread-F occurrence at different longitude sectors under low solar activity, *Ann. Geophys.*, 31, 153-162, doi:10.5194/angeo-31-153-2013, 2013.
  29. Lynn, K.J.W.; Sjarifudin, M.; Harris, T.J.; Le Huy, M. Combined TOPEX/Poseidon TEC and ionosonde observations of negative low-latitude ionospheric storms//*Annales Geophysicae* 22 (8), pp. 2837-2847, 2004
  30. Ha Duyen Chau, Le Truong Thanh, Nguyen Thanh Dung, 2011. Ionospheric studies in Vietnam. Proceeding of SEALION Symposium 2011 (International Southeast Asia Low-Latitude Ionospheric Observation Network), Bangkok, Thailand, 27-28/01/2011.
  31. Медведев А.В., Брынько И.Г., Ким А.Г., Куркин В.И., Литовкин Г.И., Орлов А.И., Подлесный А.В. Новые возможности цифрового ЛЧМ-иозонда // Труды XXII Всероссийской научной конференции "Распространение радиоволн". – 2008. – Т.1 – С. 37-40.
  32. Куркин В.И., Литовкин Г.И., Медведев А.В., Орлов А.И., Подлесный А.В. Способ обеспечения электромагнитной совместимости однопозиционного иозонда // патент РФ № 2411540. 2011.
  33. T. Ulich, T. Turunen, E. Turunen, "The new Sondankula ionosonde," 38th COSPAR Scientific Assembly, Bremen, Germany, 2010.
  34. D.M. Haines, and B.W. Reinisch, "Digisonde Portable Sounder System Manual," University of Massachusetts Lowell Center for Atmospheric Research, 1995.
  35. Куркин В.И., Пирог О.М., Иванова В.А., Чистякова Л.В., Пежемская М.Д., Брынько И.Г., Орлов А.И., Поддельский И.Н. Исследование морфологических особенностей спорадического слоя Es по данным наклонного и слабонаклонного зондирования // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 23-26 мая 2011 года. Йошкар-Ола. МарГТУ. - 2011. – Т.1. - С. 227-230.
  36. Ivanova V.A., Kurkin V.I., Pirog O.M., Chistyakova L.V., Pezhemskaya M.D., Bryn'ko I.G., Orlov A.I., Poddel'sky I.N. Investigating morphological peculiarities of the sporadic layer Es using high frequency radio sounding data //Proceedings of XXX General Assembly, URSI, Istanbul, Turkey, 2011. GP1.25.
  37. Polekh N.M., Vergasova G.V., Kazimirovsky E.S., Perevalova N.P., Kurkin V.I., Chernigovskaya M.A. Planetary Wave Activity in Temperatures of the Stratosphere, Mesosphere and in Critical Frequencies of Ionospheric F2 layer // *International Journal of Geophysics*. 2011. Vol. 2011, Article ID 341935, 7 pages, doi:10.1155/2011/341935.
  38. Ivanova V.A., Kurkin V.I., Polekh N.M., Chistyakova L.V., Brynko I.G., Chuyev V.V., Dumbrava Z.F., Poddelsky I.N. Studying Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances according to the Data of Oblique-Incidence Sounding // *Geomagnetism and Aeronomy*. – 2011. – V. 51, No 8. – P. 1101-1104.
  39. Ivanova V., Kurkin V., Polekh N., Chistyakova L., Ivanov D., Bryn'ko I., Dumbrava Z., Poddel'sky I. Investigation of large-scale wave-like ionospheric disturbances over Siberian region of Russia using oblique-incidence sounding data //Proceedings of XXX General Assembly, URSI, Istanbul, Turkey, 2011. GP2.24.
  40. Иванова В.А., Куркин В.И., Полех Н.М., Иванов Д.В., Чистякова Л.В., Брынько И.Г., Думбрава З.Ф., Поддельский И.Н. Регистрация крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений в спокойных геомагнитных условиях // Труды XXIII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 23-26 мая 2011 года. Йошкар-Ола. МарГТУ. - 2011. – Т.1. - С. 212-215.
  41. Ларюнин О.А., Куркин В.И. Восстановление параметров ионосферных возмущений по динамике серпообразных особенностей на ионограммах // *Солнечно - земная физика*. - 2011. - No19. - С. 107-115.
  42. Oinats A.V., Kurkin V.I., Kutelev K.A. Nishitani N., Tolstikov M.V. Study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the data of SuperDARN Hokkaido radar and Russian chirp sounding network //Proceedings of XXX General Assembly, URSI, Istanbul, Turkey, 2011. GP2.25.