

А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков

**ПАКЕТ ПРОГРАММ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ
ДАННЫХ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ *UNIFIED
PROCESSING OF THE RESULTS OF INCOHERENT SCATTER
EXPERIMENTS (UPRISE)***

В статье представлены разработанные оптимальные методики анализа данных некогерентного рассеяния и пакет программ анализа данных UPRISE.

Ключевые слова: метод некогерентного рассеяния, анализ данных, система обработки данных.

У статті представлено розроблені оптимальні методики аналізу даних некогерентного розсіяння та пакет програм аналізу даних UPRISE.

Ключові слова: метод некогерентного розсіяння, аналіз даних, система обробки даних.

In the paper the developed optimal techniques of incoherent scatter data analysis and UPRISE package are presented.

Keywords: incoherent scatter radar technique, data analysis, data processing system.

Введение. На достоверность получаемых с помощью метода некогерентного рассеяния (НР) оценок параметров ионосферной плазмы влияют не только характеристики и режимы работы аппаратуры радара, но и, в значительной степени, оптимальность используемого анализа экспериментальных данных и соответствующего программного обеспечения.

Целью статьи является представление разработанных оптимальных методик анализа данных метода НР, а также реализующего эти методики пакета программ UPRISE (Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments).

Обзор существующих программ анализа данных НР. Для анализа получаемых на радарх НР EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) данных используется разработанный М. Lehtinein и А. Huuskonen пакет программ GUISDAP – Grand Unified Incoherent Scatter Design and Analysis Package [1] (на момент написания этой статьи актуальной является версия GUISDAP-8.7). Для запуска GUISDAP требуется пакет Matlab для операционной системы (ОС) Linux или Windows. Программа имеет широкие возможности анализа данных, получаемых с помощью метода НР, однако её применение для анализа данных радара Института ионосферы невозможно.

До настоящего времени в Институте ионосферы для анализа данных НР использовался разработанный в 90-е годы прошлого века В.Н. Лысенко и В.А. Пуляевым пакет программ “Кентавр” [2]. Он написан на Turbo BASIC и

работает в ОС DOS. Помимо того, что “Кентавр” не использует возможности современных персональных компьютеров и не может работать с данными, получаемыми на новой системе первичной обработки данных радара НР Института ионосферы (многоканальном корреляторе [3]), данный пакет программ основан на устаревшей методической базе. Поэтому проблема разработки новых методик анализа данных и внедрения их в процесс обработки экспериментальных результатов в виде современной программы анализа данных является весьма актуальной.

Анализ данных НР. Последовательность обработки данных радара НР, предполагающую выполнение предложенных оптимальных алгоритмов, целесообразно разбить на логически завершённые, выполняющиеся друг за другом этапы [4]:

- фильтрация данных (устранение помех различной природы);
- заполнение участков данных, соответствующих вырезанным помехам;
- расчёт автокорреляционной функции (АКФ) шума и получение АКФ НР сигнала;
- учёт аппаратурных характеристик радара;
- временное усреднение АКФ НР сигнала;
- коррекция высотного профиля мощности НР сигнала;
- высотное усреднение АКФ НР сигнала;
- определение параметров ионосферной плазмы (температуры ионов и электронов, ионного состава, скорости движения плазмы).

Автоматизированная пороговая *фильтрация данных* с целью устранения когерентных помех (отражений от искусственных спутников Земли и космического мусора, попавших в диаграмму направленности антенны радара) легко реализуется для временных зависимостей значений АКФ принятого и перенесенного на низкую частоту сигнала [5–6]. Другие виды помех, которые могут присутствовать в принятом радаром сигнале, – импульсные помехи и резкие скачки уровня сигнала [7] – идентифицировать сложнее, поэтому они должны дополнительно фильтроваться вручную.

Заполнение вырезанных участков данных производится в два этапа. Сначала участки с вырезанными данными интерполируются гладкими функциями – *B*-сплайнами третьей степени (для этого формируются одномерные массивы, содержащие временной ход значений каждой задержки АКФ принятого сигнала). Затем накладывается шум, имеющий нормальное распределение и среднеквадратичное отклонение, соответствующее средней дисперсии данных слева и справа от рассматриваемого участка.

Так как сигнал, поступающий на вход аналого-цифрового преобразователя системы обработки радара НР, содержит кроме полезного НР сигнала шумы различной природы (космическое радиоизлучение галактик, звёзд и планет, радиотепловое излучение земной поверхности, шумы усилительных каскадов радиоприёмного устройства), то получаемые в системе обработки АКФ являются суммой АКФ сигнала НР и АКФ шума.

Чтобы определить АКФ шума, необходимо усреднить АКФ принятого сигнала в конце развёртки дальности (т.е. там, где полезный сигнал отсутствует).

Одна из *процедур учёта аппаратурных характеристик радара* – учёт передаточной характеристики разрядников, входящих в состав антенного коммутатора радара.

Временное усреднение данных целесообразно выполнять путём скользящего сглаживания [8]. Обычно усреднение производится по 5, 15, 30, 45, 60 мин с шагом 1, 2, 3, 5, 15 мин. Дополнительное усреднение по времени может не проводиться.

Необходимость *коррекции высотного профиля мощности НР сигнала* связана с применением зондирующего импульса большой длительности ($T_{\text{и}} = 663$ мкс) [9]. Суть алгоритма коррекции заключается в подборе такого теоретического распределения мощности, которое, будучи пропущенным через математическую модель измерительного канала, даст результат, наилучшим образом согласующийся с экспериментальными результатами. Математическая модель измерительного канала должна учитывать как специфику процесса НР, так и все существенные аппаратурные характеристики (формы импульсной характеристики радиоприёмного устройства и огибающей зондирующего сигнала). Учёт математической модели заключается в свёртке профиля мощности НР сигнала с двумерной функцией неопределённости радара НР [9–16].

Высотное усреднение АКФ НР сигнала, так же как и временное усреднение, позволяет уменьшить разброс значений задержек АКФ. Кроме того на этом этапе производится коррекция значений задержек АКФ [17]. Известно, что при импульсном зондировании для каждой последующей задержки уменьшается объём плазмы, участвующий в формировании соответствующей оценки АКФ, и происходит пространственное смещение результирующего рассеивающего объёма. Коррекция может производиться путём перемещения данных с нижних высот, трапецеидального суммирования данных, аппроксимации профилей гладкими функциями с последующим сдвигом [17–18].

Определение таких параметров ионосферы, как температуры ионов и электронов и относительное содержание ионов различных сортов, заключается в поиске такой теоретической АКФ (с учётом аппаратурных особенностей радара – формы огибающей зондирующего радиоимпульса, а также импульсной характеристики фильтра радиоприёмного устройства), которая обеспечивает наилучшее по выбранному критерию согласие с экспериментальной АКФ. Значения параметров плазмы, для которых была рассчитана эта теоретическая АКФ, можно считать оценками параметров ионосферной плазмы [19]. Скорость движения плазмы можно рассчитать, используя методику, описанную в [20].

За последние годы выполнен целый ряд системных модельных

исследований (в том числе, с использованием экспериментальных данных радара Института ионосферы), направленных на повышение достоверности и качественное улучшение информативности результатов оценивания параметров ионосферной плазмы [21–25]. Результаты этих исследований были воплощены в пакете анализа данных UPRISE.

Пакет программ анализа данных UPRISE. Пакет программ UPRISE написан на языках C и FreeBASIC и работает в ОС Windows на локальном компьютере пользователя (в отличие от разрабатываемой программы обработки данных HP, работающей на стороне сервера [26–27]). Работа алгоритмов программ проверена с помощью модели системы обработки данных радара HP [28].

Для установки пакета UPRISE достаточно распаковать архив с программой на жёсткий диск компьютера. Абсолютный путь установки не важен. Возможно использование (в том числе и одновременное) нескольких копий пакета.

Кроме программ и вспомогательных файлов пакета, входящего в установочный архив, для работы UPRISE требуется наличие библиотек теоретических АКФ HP сигнала. Файлы библиотек АКФ могут устанавливаться на любой диск, имеющий достаточно свободного пространства (около 70 Гбайт). Библиотеки АКФ рассчитаны для квазиоптимальных шагов поиска параметров: шаг по относительному содержанию ионов гелия $N(\text{He}^+)/N - 1\%$ (в интервале от 0 до 40%), шаг по относительному содержанию ионов водорода – 0,5% (в интервале от 0 до $100 - N(\text{He}^+)/N$, %), шаг по температурам ионов и электронов – 10 К (в интервале от 500 до 4000 К) [21, 29]. Для разных копий пакета UPRISE достаточно одной копии библиотек АКФ. Путь к ним задаётся при настройке пакета.

Пакет программ UPRISE настраивается путём редактирования содержимого конфигурационного текстового файла, который может быть открыт любым редактором.

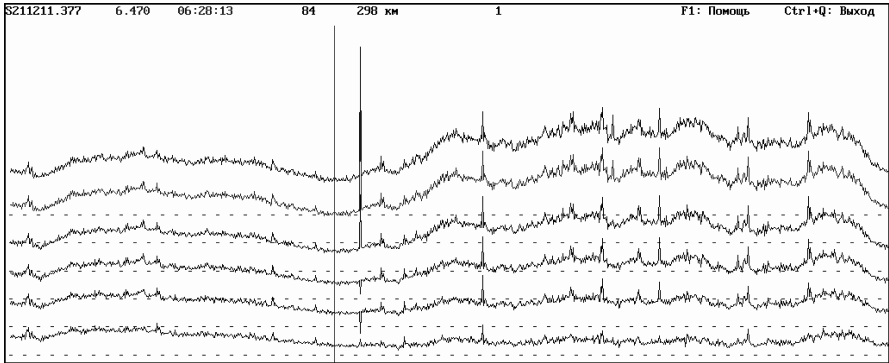
В состав пакета UPRISE входит набор программ, которые реализуют основные этапы обработки.

01_UPRISE_view.exe – программа просмотра и фильтрации данных. Внешний вид части окна программы показан на рис. 1а и 1б (до и после фильтрации). Данные представлены как временные зависимости значений АКФ принятого и перенесенного на низкую частоту сигнала.

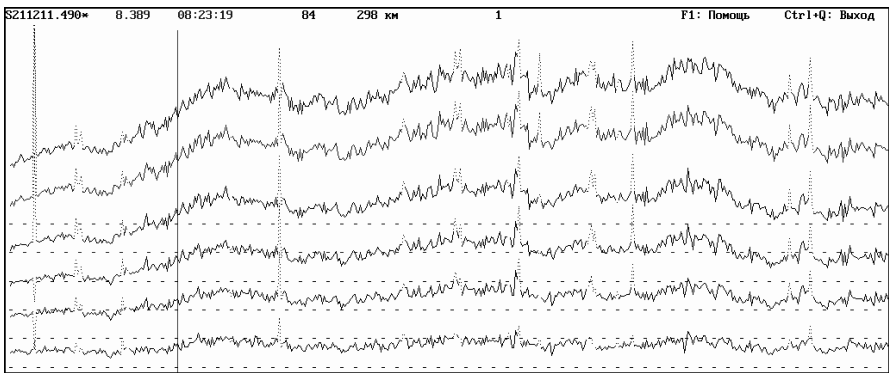
02_UPRISE_spline.exe – программа заполнения отфильтрованных данных, расчёта АКФ шума и вычисления АКФ HP сигнала.

03_UPRISE_integrate.exe – программа временного усреднения. Пользователь может указать время усреднения и шаг перемещения окна, в котором производится усреднение. В этой же программе после временного усреднения производится коррекция высотного профиля мощности HP сигнала.

Высотное усреднение и коррекция АКФ НР сигнала производится либо в программе *04_UPRISE_approximate_trapezoidal.exe* (трапецидальное суммирование), либо в программе *04_UPRISE_approximate_polynomial.exe* (коррекция путём применения кусочно полиномиальной функции со скользящим окном) [17].



a



б

Рис. 1 – Вид окон программы просмотра данных:
a – до фильтрации помех, *б* – после фильтрации

Оценка температуры ионов и электронов и ионного состава плазмы осуществляется в программе *05_UPRISE_estimate.exe*, а оценка скорости движения плазмы – в программе *05_UPRISE_velocity.exe*.

На рис. 2 показана часть окна программы *05_UPRISE_estimate.exe*. На панелях сверху вниз представлены временные зависимости значений минимума функции невязки, температуры электронов, относительного

содержания ионов водорода, относительного содержания ионов гелия, температуры ионов.

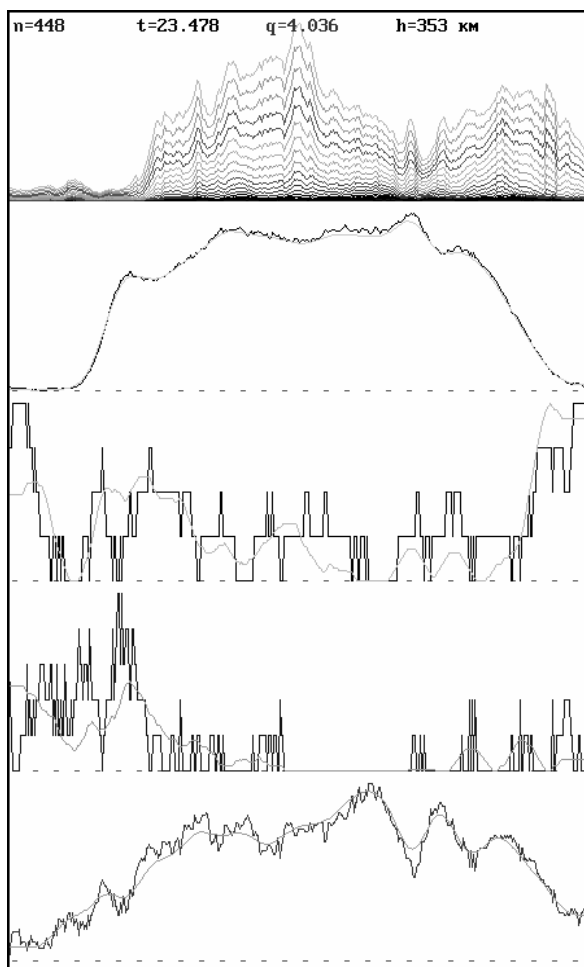


Рис. 2 – Вид окна программы оценки параметров ионосферной плазмы

Для запуска программ, импорта данных и экспорта результатов анализа используется оболочка *UPRISE.exe*, внешний вид окна которой показан на рис. 3.

Также пакет UPRISE содержит файл справки, в котором приведено подробное описание работы программ.

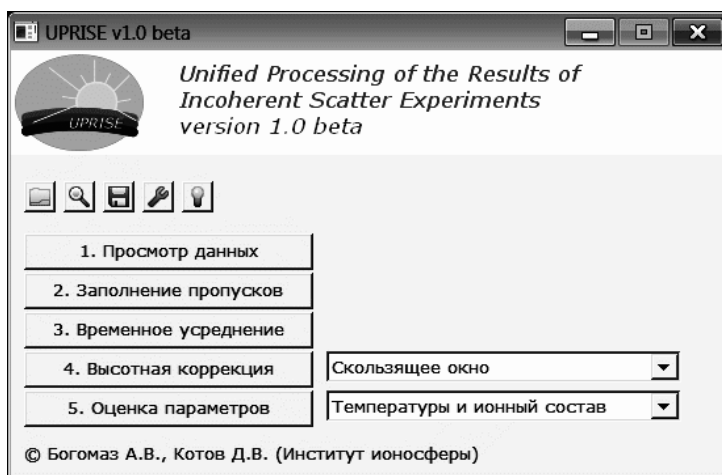


Рис. 3 – Вид окна программы-оболочки пакета анализа данных HP UPRISE

Выводы. Основные результаты, полученные в процессе работы над пакетом UPRISE, следующие.

1. По результатам комплексных теоретических, модельных и экспериментальных исследований создан пакет для анализа данных метода HP нового поколения. Пакет программ отличается универсальностью, существенно улучшенной функциональностью, гибкостью, простотой установки и использования.

2. Пакет UPRISE является оригинальным программным продуктом, реализующим современную методическую базу метода HP, в том числе, оригинальные авторские разработки, наиболее оптимальные именно для данных радара HP Института ионосферы.

3. Оптимальные методики, внедрённые в пакете UPRISE, позволили получить ряд качественно новых уникальных результатов (среди которых надёжные данные о пространственно-временных вариациях абсолютных и относительных концентраций ионов гелия) и наблюдать тонкие эффекты в вариациях параметров геокосмической плазмы, ранее недоступные для исследований.

Список литературы: 1. *Lehtinen M.S.* General incoherent scatter analysis and GUISDAP / *M.S. Lehtinen, A. Huuskonen* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – Vol. 58, № 1-4. – P. 435-452. 2. *Пуляев В.А.* Обработка и представление данных некогерентного рассеяния / *В.А. Пуляев* // *Вестник ХГПУ.* – 1999. – Вып.31. – С. 84-86. 3. *Лысенко В.Н.* Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния / *В.Н. Лысенко, А.Ф. Кононенко, Ю.В. Черняк* // *Вестник НТУ “ХПИ”.* Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2004. – № 23. – С. 49-62. 4. *Богомаз А.В.* Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз* // *Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2012)”* (Харьков, Украина, 18 – 20 апреля 2012 г.). Сборник тезисов. – 2012. – С. 7. 5. *Богомаз А.В.* Оптимизация

параметров фильтрации когерентных помех при анализе данных некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз* // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій “РТ-2011”: Матеріали 7-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, Севастополь 11–15 квітня 2011 р. / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Севастопольський національний технічний університет – Севастополь: СевНТУ, 2011. – С. 315. **6. Богомаз А.В.** Идентификация когерентных отражений градиентным методом / *А.В. Богомаз, М.Н. Сюсюк* // Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2012)” (Харьков, Украина, 18–20 апреля 2012 г.). Сборник тезисов. – 2012. – С. 15. **7. Панасенко С.В.** Фильтрация временных вариаций мощности некогерентного рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоях аппаратуры / *С.В. Панасенко* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2011. – № 44 – С. 40-44. **8. Богомаз А.В.** Особенности процедуры накопления ионосферных данных, полученных с помощью многоканального коррелятора / *А.В. Богомаз* // Програма XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я». Секція 17. Навколосферний простір. Радіофізика та іоносфера. – 2011. – С. 184. **9. Котов Д.В.** Корреляционная функция некогерентного рассеянного сигнала: результаты моделирования. Методические погрешности определения параметров ионосферной плазмы / *Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // IX Харківська конференція молодих науковців “Радіофізика, електроніка, фотоніка та біофізика”. 1–3 грудня 2009 р. Збірник анотацій. – 2009. – С. 33. **10. Домнин И.Ф.** Корреляционная функция некогерентного рассеянного сигнала. 1. Моделирование вариаций. Методические погрешности определения параметров ионосферной плазмы / *И.Ф. Домнин, Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 3. – С. 160-179. **11. Котов Д.В.** Особенности моделирования корреляционной функции некогерентно рассеянного сигнала / *Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // I Конференция молодых ученых “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2010)” (Харьков, Украина, 12–15 апреля 2010 г.). Сборник тезисов. – 2010. – С. 45. **12. Котов Д.В.** Результаты моделирования методических погрешностей определения АКФ НР-сигнала и параметров ионосферной плазмы / *Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // I Конференция молодых ученых “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2010)”, 6–9 апреля 2010 г. Сборник тезисов. – 2010. – С. 46. **13. Котов Д.В.** Перспективный подход к обработке данных радара НР на основе интегральной АКФ / *Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // Конференция молодых ученых “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2011)” (Харьков, Украина, 12–15 апреля 2011 г.). Сборник тезисов. – 2011. – С. 33. **14. Богомаз А.В.** Восстановление профиля мощности сигнала некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз, Д.В. Котов, Е.И. Ярков* // Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2011)” (Харьков, Украина, 12–15 апреля 2011 г.). Сборник тезисов. – 2011. – С. 34. **15. Сюсюк М.Н.** Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния / *М.Н. Сюсюк, Д.В. Котов, А.В. Богомаз* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2011. – № 44 – С. 81-84. **16. Богомаз А.В.** Проверка алгоритма коррекции профиля мощности некогерентно рассеянного сигнала / *А.В. Богомаз, Д.В. Котов* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2011. – № 44 – С. 126-129. **17. Богомаз А.В.** Пространственная коррекция данных радара некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз, Д.В. Котов, М.Н. Сюсюк* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2012. – № 57 (963). – С. 35-42. **18. Сюсюк М.Н.** Аппроксимация высотных профилей мощности некогерентно рассеянного сигнала рядами Фурье / *М.Н. Сюсюк, А.В. Богомаз* // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій “РТ-2012”: Матеріали 8-ої міжнародної молодіжної науково-технічної конференції, Севастополь 23–27 квітня 2012 р. / Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України, Севастопольський національний технічний університет – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С. 324. **19. Пуляев В.А.** Особенности решения прямой задачи рассеяния при расчёте параметров ионосферной плазмы / *В.А. Пуляев, Е.И. Сокол, А.В. Богомаз, Д.П. Белозёров* // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник “Радіотехніка”. – 2010. – № 160. – С. 280-285. **20. Емельянов Л.Я.** Обоснование характеристик радара для определения скорости дрейфа плазмы методом некогерентного рассеяния / *Л.Я. Емельянов* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2004. – № 23. – С. 29-36. **21. Домнин И.Ф.** Оптимизация

определения параметров ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния / *И.Ф. Домнин, Д.В. Котов, Л.Ф. Черногор* // *Нелинейный мир.* – 2012. – № 6. – С. 380-386.

22. *Котов Д.В.* Временные вариации ионного состава во внешней ионосфере в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / *Д.В. Котов, В.А. Пуляев, Л.Ф. Черногор* // *Космічна наука і технологія.* – 2009. – Т. 15, № 5. – С. 34-42.

23. *Клейносов Ю.В.* Оцінювання похибок визначення параметрів іоносферної плазми, пов'язаних з неврахуванням наявності іонів гелію / *Ю.В. Клейносов, Д.В. Котов* // XVIII міжнародна науково-практична конференція MicroCad-2010. Секція №17. “Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера”. Збірка тез. – 2010. – С. 171.

24. *Котов Д.В.* Шляхи корекції результатів вимірювань параметрів іоносферної плазми методом некогерентного розсіяння / *Д.В. Котов* // XVIII міжнародна науково-практична конференція MicroCad-2010. Секція №17. “Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера”. Збірка тез. – 2010. – С. 174.

25. *Котов Д.В.* Коррекция результатов измерений параметров ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния / *Д.В. Котов* // X Українська конференція з космічних досліджень, м. Євпаторія, 30 серпня – 4 вересня 2010 р. Збірка тез. – 2010. – С. 88.

26. *Miroshnikov A.E.* Incoherent scatter radar data processing on a remote server [Электронный ресурс] / *А. Е. Miroshnikov, О. V. Bogomaz* // 12th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

27. *Богомаз А.В.* Преимущества обработки данных радаров НР на удаленном сервере / *А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников* // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины: материалы Науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–25 дек. 2012 г. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2012. – С. 27-28.

28. *Богомаз А.В.* Модель системы обработки данных радаров некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз* // Вестник НТУ «ХПИ». Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2012. – № 57 (963). – С. 25-28.

29. *Котов Д.В.* Особенности обработки сигнала при поиске малых возмущений параметров ионосферной плазмы / *Д.В. Котов, В.А. Пуляев* // XVI Международная научно-практическая конференция: Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сборник тезисов. – Х.: НТУ «ХПИ» – 2008. – С. 234.

Поступила в редколлегию 01.04.2013