

УДК 519.2

**А. О. ЩИРЫЙ**

**РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО НАЗЕМНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

В роботі дається опис основних архітектурних принципів і структури програмного забезпечення обробки експериментальних даних радіозондування іоносфери, основну увагу приділено підсистемі вторинної обробки. Приведено огляд її розвитку і показано приклади розв'язання задач. Коротко описано основні типи триманих даних.

**Ключові слова:** радіозондування іоносфери, автоматизація вимірювань, автоматизація експерименту.

В работе дается описание основных архитектурных принципов и структуры программного обеспечения обработки экспериментальных данных радиозондирования ионосферы, основное внимание уделено подсистеме вторичной обработки. Дан обзор её развития и показаны примеры решаемых задач. Кратко описаны основные типы получаемых экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** радиозондирование ионосферы, автоматизация измерений, вторичная обработка данных.

The paper describes the basic architectural principles and structure of the chirp sounding data processing software, focuses on secondary processing subsystem. A review of its development and examples of tasks are given. Briefly describe the main types of experimental data.

**Keywords:** chirpsounding, sounding of ionosphere, measurement automation, post-real-time data processing.

**Введение.** По данным радиозондирования ионосферы коротковолновыми сигналами (КВ) можно получить информацию о процессах в ионосферной плазме, о ее структуре и состоянии. Эти данные также крайне важны для систем КВ радиосвязи и загоризонтной радиолокации, для решения задач компенсации искажений, вносимых ионосферной средой распространения КВ. Наиболее перспективным является выбор сигнала с линейно-

частотной модуляцией (ЛЧМ) в качестве зондирующего.

При непосредственном участии автора созданы несколько поколений комплексов радиозондирования ионосферы [1-4], разработаны методики и алгоритмы обработки ионограмм [1-11] и программное обеспечение (ПО) [1-4, 11-13].

**Аппаратура комплекса.** На рис. 1 показана общая структура комплекса зондирования ионосферы.

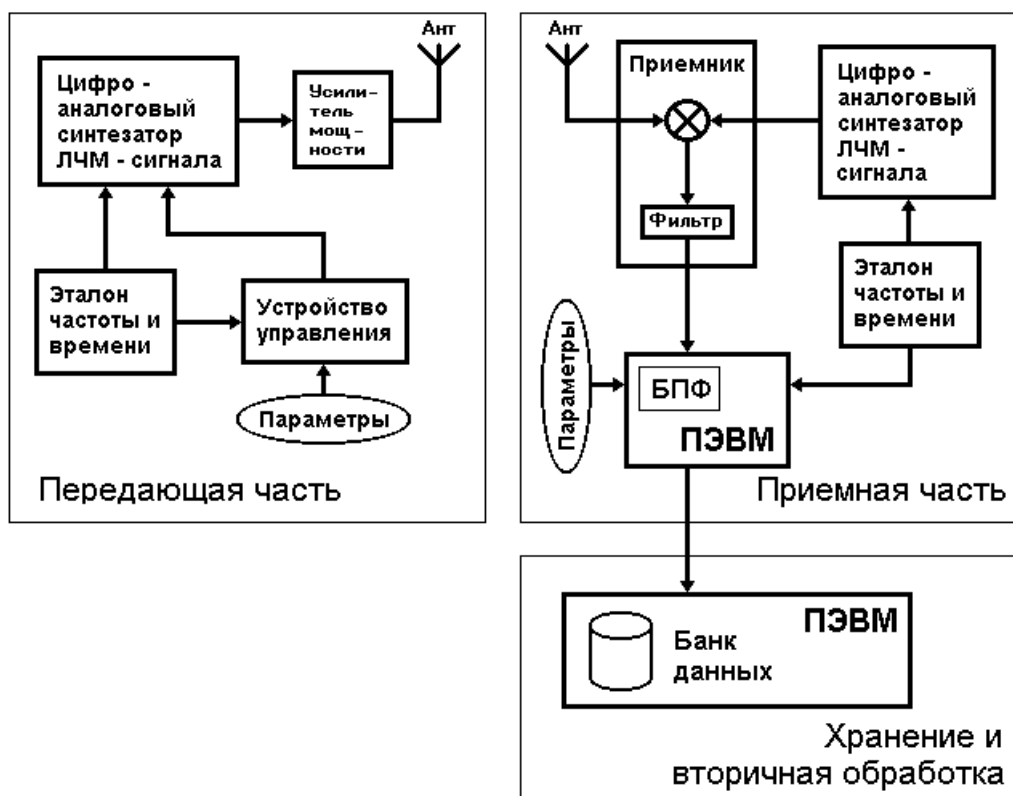


Рис. 1 – Общая структура комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы

В случае наклонного зондирования приемная и передающая части комплекса пространственно

разнесены, как правило на тысячи километров. В случае вертикального зондирования — не разнесены.

Передатчик излучает ЛЧМ сигнал, с параметрами заданными расписанием. После прохождения через ионосферную среду, принимаемый ЛЧМ сигнал, попадая в приемник, обрабатывается методом сжатия в частотной области. Суть этого метода заключается в перемножении принимаемого сигнала с сигналом, когерентным излучаемому ЛЧМ сигналу, и в

последующем выделении низкочастотного разностного сигнала. Разностный сигнал подвергается различной дальнейшей обработке, включая спектральную – как правило, посредством быстрого преобразования Фурье (БПФ). Вся эта дальнейшая обработка производится программными средствами на ПЭВМ общего назначения, о чем речь пойдет ниже.

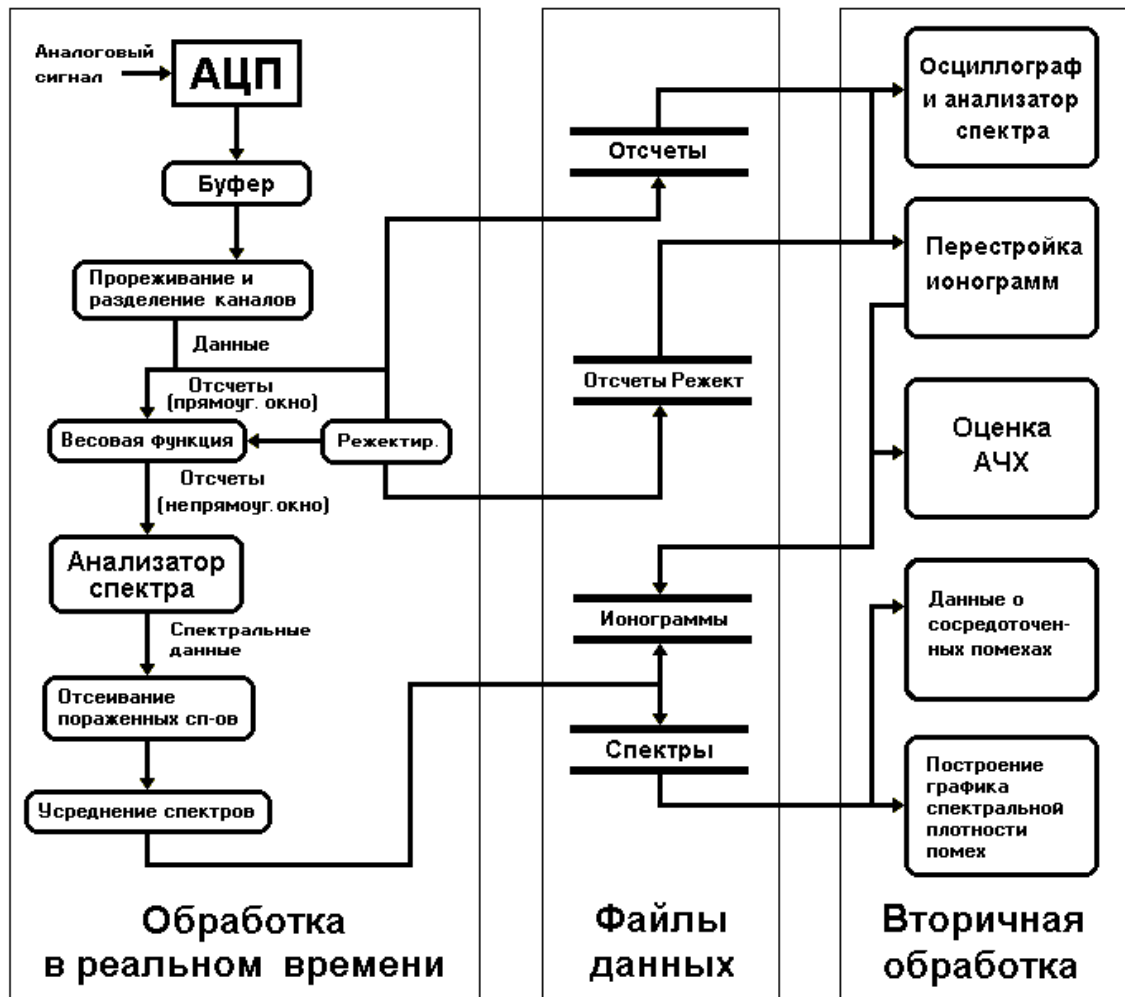


Рис. 2 – Общая структура ПО комплекса радиозондирования

**Общая архитектура ПО.** Изначально было принято важное решение о разделении ПО всех поколений комплексов радиозондирования на подсистемы первичной и вторичной обработки. Под первичной обработкой понимается автоматическая регистрация и сохранение полученных данных в реальном времени; вторичной – последующий анализ полученных данных, в т.ч. пакетная обработка большого массива данных с целью вычисления статистических характеристик и просмотр данных.

В зависимости от состава аппаратуры и требований конкретного исполнения, ПО первичной обработки было реализовано для двух операционных систем (ОС): Linux и MS Windows. Связь подсистем первичной и вторичной обработки – осуществляется через файлы данных, подробнее о которых будет сказано ниже. Важнейшими типами данных являются

ионограмма и временной ряд оцифрованного сигнала с выхода приемного устройства. ПО вторичной обработки реализовано для ОС MS Windows. Так как оно работает с файлами данных, то является общим для всех реализаций комплекса, поскольку соблюдается совместимость форматов данных.

На рис.2 показана общая структура ПО комплекса радиозондирования; видно, что часть обработки данных может осуществляться в реальном времени в подсистеме первичной обработки, но «сырые» данные всё равно сохраняются в файлах.

**ПО вторичной обработки.** Проектирование, создание и развитие ПО вторичной обработки шло следующими двумя основными направлениями, которые условно неформально можно определить как развитие возможностей по работе с данными «вглубь» и «вширь».

Под развитием "вглубь" понимаются средства выявления "тонких" эффектов (при повышенном разрешении спектрального анализа или путем других алгоритмов обработки), выделение слабых сигналов скрытых в помехах, и др.

Под развитием "вширь" понимаются средства для оперирования большими массивами данных, в том числе поиска скрытых зависимостей (здесь неизбежно подход методически противоположен направлению "вглубь", так как необходимо прибегать к упрощениям, к вычислению обобщающих характеристик). Накопленные таким образом данные статистики имеют самостоятельную ценность (целесообразно было создать унифицированных

для подробного детального просмотра и обработки, форматы статистических данных полученных по результатам обработки больших объемов ионограмм), в том числе, потому что их можно использовать для прогнозирования соответствующих характеристик ионосферы и ионосферных радиолиний.

Вместе с тем, важно отметить, что указанные два направления не ведут к созданию обособленных программных средств, наоборот – всё ПО вторичной обработки глубоко интегрировано. Кроме всего прочего, такой программный комплекс обеспечивает программную инфраструктуру для реализации, отладки и апробации новых алгоритмов обработки данных зондирования.

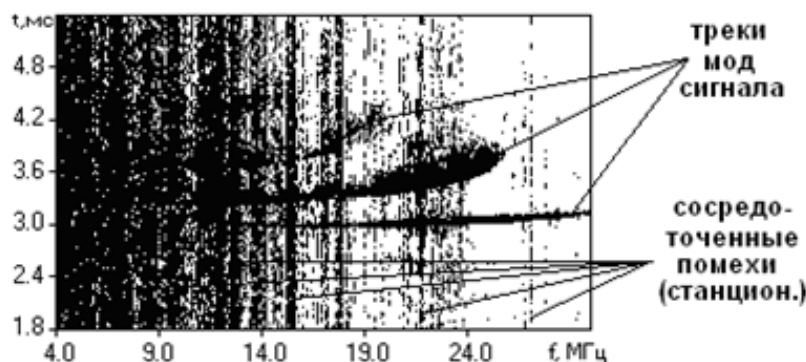


Рис. 3 – Пример ионограммы наклонного зондирования

Основным типом экспериментальных данных является ионограмма наклонного зондирования ионосферы (НЗИ), представляющая собой трехмерное изображение зависимости амплитуды принятого сигнала от рабочей частоты и времени группового запаздывания (см. рис. 3). Ионограмма содержит практически полную информацию о многолучевом распространении КВ радиосигнала в ионосфере и различных видах помех.

К настоящему моменту уже накоплен большой объем экспериментальных данных; и в ходе регулярных экспериментов объем данных продолжает увеличиваться. Дальнейшая обработка этих экспериментальных данных (первичных данных) приводит к еще большему росту объемов и разнообразия данных. Производные данные образуют иерархию, для пояснения этого факта введем понятие уровня экспериментальных данных. Данные большего по номеру уровня получают из данных меньшего уровня; данные меньшего по номеру уровня не могут быть получены из данных большего по номеру уровня. Имеются следующие данные (по уровням): 1 – оцифрованный сигнал (отсчеты) с выхода приемника ионозонда; 2 – ионограммы, спектры помех; 3 – треки мод, спектр фонового шума, характеристики стационарных помех; 4 – амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) КВ радиолиний, модели многолучевости, оптимальные рабочие частоты, отношение сигнал/шум, и др.; 5 – статистика вариаций данных уровня 4. Поэтому решалась задача создания (в рамках подсистемы вторичной обработки)

функционала ПО для работы с иерархией экспериментальных данных, включая возможности регенерации производных данных и возможности просмотра имеющихся данных.

На примере ионограммы направления «вширь» и «вглубь» выглядят следующим образом: для одних задач на стандартной ионограмме информации слишком много (поэтому требуются средства вычисления "макрохарактеристик"), для других – слишком мало, поэтому требуется перестроить ионограмму с высоким разрешением.

По мере накопления экспериментальных данных возникают задачи не только физического хранения все возрастающих объемов данных, но и рационального их размещения с возможностью выборки данных в нужных информационных срезах (т.е. для заданных условий), а также задача их систематизации по некоторым критериям. В последнем случае речь идет также о получении неких макрохарактеристик, позволяющих сократить на порядки объем информации о результатах одного сеанса радиозондирования (традиционно представленных ионограммой).

Организация хранения обеспечивает и доступ к максимально «сырым» экспериментальным данным (в нашем случае это оцифрованный сигнал с выхода приемника ионозонда) для решения задач противоположной направленности («вглубь») – получения более «тонкой» информации, чем традиционная классическая ионограмма.

Такое ПО также разработано автором и используется для получения новых радиофизических данных, в том числе для исследования диффузной многолучевости, эффектов магнитоионного расщепления КВ радиоволн, рассеяния КВ радиоволн на ионосферных неоднородностях и других исследований, требующих, подобно перечисленным исследованиям, достижения высокого разрешения по частоте и времени группового запаздывания

радиоволн, а также требующих возможностей оперирования большими объемами разнообразных экспериментальных данных.

Указанные задачи систематизации и получения макрохарактеристик вызваны, прежде всего, потребностями прогноза. Реализация этого подхода позволяет получать, среднестатистическую ионограмму для заданных условий (дата, время, радиотрасса, гелио- и геофизические условия).

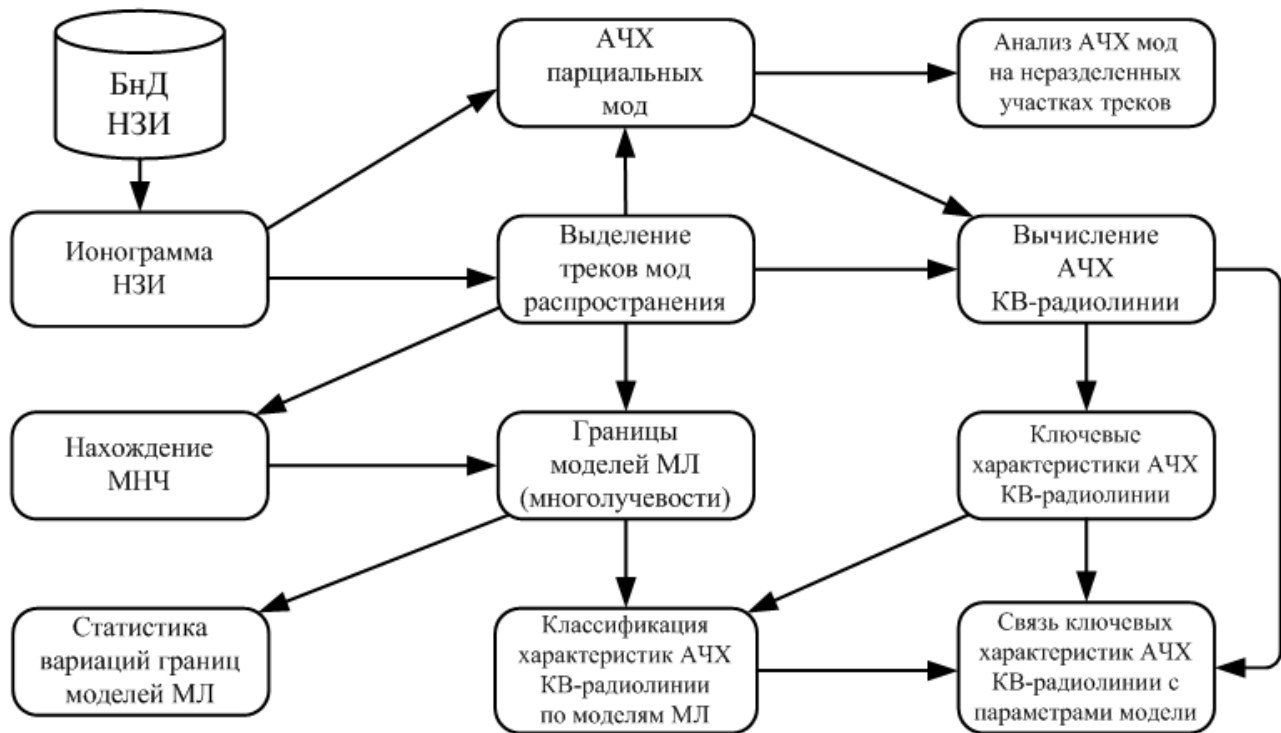


Рис. 4 – Информационная диаграмма исследования характеристик моделей многолучевости

В качестве примера методики получения макрохарактеристик можно назвать методику классификации фрагментов ионограмм по эмпирическим моделям многолучевости (МЛ) [14], когда диапазон распространения КВ разбивается на интервалы по числу и типам мод распространения радиосигнала. Ионограмма, извлекаемая из банка данных (БНД) НЗИ, может предварительно обрабатываться по алгоритму подавления сосредоточенных помех [5,8,9], затем происходит выделение треков мод полезного сигнала, а далее по выделенным трекам вычисляются характеристики распространения КВ (см. рис. 4).

Результаты автоматической обработки ионограмм, на ряде этапов (например, выделения треков мод сигнала) в случае необходимости могут быть скорректированы оператором.

**Направления дальнейших исследований.** Направлением дальнейших исследований является приложение аппарата теории обучения машин для решения задач кластеризации (выделения на ионограмме треков мод распространения сигнала), классификации (типов треков) и прогноза.

**Заключение.** Принципы, заложенные в архитектуре ПО аппаратно-программного комплекса, обеспечивают гибкость и модульность, прозрачное использование большей части ПО во всех поколениях аппаратной части комплекса и доступ ко всем ранее накопленным экспериментальным данным. ПО вторичной обработки позволяет как оперировать большими объемами накопленных данных, так и производить детальную тонкую обработку.

#### Список литературы

1. Щирый А. О. Программное обеспечение управления базовой станцией ионосферного мониторинга / А. О. Щирый // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(20)/1. – С. 204–207.
2. Щирый А. О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолоний: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: Спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. – СПб., 2007. – 19 с.
3. Щирый А. О. Разработка алгоритмов для повышения точности измерения и расширения возможностей традиционного применения наклонного ионозонда / А. О. Щирый // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 1.1(27). – С. 202–204.

4. Колчев А. А. Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн / А. А. Колчев, В. В. Шумаев, А. О. Щирый // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 12. – С. 73–78.
5. Колчев А. А. Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ зондировании ионосферы / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2006. – Т. XLIX, № 9. – С. 751–759.
6. Колчев А. А. Оценивание параметров сосредоточенных по спектру помех на выходе приемника ЛЧМ ионозонда / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2007. – № 5. – С. 54–61.
7. Колчев А. А. Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ ионозонда / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 7. – С. 627–630.
8. Колчев А. А. Использование критерия обнаружения промахов при подавлении сосредоточенных по спектру помех / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2006. – Т. 13, в. 4. – С. 654–655.
9. Патент РФ на изобретение №2290756. Способ подавления сосредоточенных помех при приеме непрерывного линейно-частотно-модулированного сигнала / А. А. Колчев, А. О. Щирый; Мари́йский гос. ун-т. № 2005115593/09; Заявл. 23.05.2005; Опубл. 27.12.2006. Бюл. №36. (Исправл. опубл. 10.06.2007. Бюл. № 16.)
10. Колчев А. А. Модель для вычисления амплитудно-частотных характеристик КВ радиолиний в геометрооптическом приближении по данным наклонного зондирования ионосферы / А. А. Колчев, А. О. Щирый // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – 2011. – № 44. – С. 85–90.
11. Щирый А. О. Математическое и программное обеспечение комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы / А. О. Щирый, А. Е. Недопекин // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. Серия: Радиофизика и ионосфера. – 2012. – № 57 (963). – С. 49–56.
12. Щирый А. О. Гибкая перестройка ионограмм наклонного радиозондирования ионосферы в процессе вторичной обработки / А. О. Щирый // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2011. – №14. – С. 138–140.
13. Щирый А. О. Развитие средств автоматизации наземного радиозондирования ионосферы / А. О. Щирый // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2014. – Т. 14, № 5. – С. 170–173.
14. Хмельницкий Е. А. Оценка реальной помехозащищенности приема сигналов в ДКМ диапазоне / Е. А. Хмельницкий. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
2. Shchiryi A. O. Razrabotka i modelirovanie algoritmov avtomaticheskogo izmereniya charakteristik ionosfernich korotkovolnovnih radiolinii: Autoref. dis. ... kand. tech. nauk: Spec. 05.12.04; Sankt-Peterburgskiy gos. un-t telekommunikacy im. prof. M.A. Bonch-Bruevicha, SPb., 2007, 19 p.
3. Shchiryi A. O. Razrabotka algoritmov dlya povysheniya tochnosti izmereniya i rasshireniya vozmozhnostej traditsionnogo primeneniya naklonnogo ionozonda. *Sistemy upravleniya i informacionnye tekhnologii*, 2007, No 1.1(27), pp. 202–204.
4. Kolchev A. A., Shumaev V. V., Shiriy A. O. Equipment for research of HF ionospheric multipath propagation effects. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2008, vol. 51, № 12, pp. 73–78.
5. Kolchev A. A., Shiriy A. O. Rejection of spectrally lumped noise during chirp sounding of the ionosphere. *Journal Radiophysics and Quantum Electronics*, 2006, vol. 49, №9/Sept., pp. 675–682.
6. Kolchev A. A., Shchiryi A. O. Estimation of parameters of interference concentrated in spectrum at the output of LFM ionoprobe receiver. *Radioelectronics and Communications Systems*, 2007, vol. 50, No. 5, pp. 269–274.
7. Kolchev A. A., Shiriy A. O. Reconstruction of the frequency dependence of the complex reflection coefficient from data of the oblique LFM ionosonde. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2007, vol. 20, No. 07, pp. 572–575.
8. Kolchev A. A., Shchiryi A. O. Spol'zovanie kriteriya obnaruzheniya promahov pri podavlenii sosredotochennykh po spektru pomekh. *Obzrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki*, 2006, No. 13, v. 4, pp. 654–655.
9. Patent RF na izobretenie №2290756. Sposob podavleniya sosredotochennykh pomekh pri prieme nepreryvnogo linejno-chastotno-modulirovannogo signala / Kolchev A. A., Shchiryi A. O.; Marijskij gos. un-t. № 2005115593/09; Zayavl. 23.05.2005; Opubl. 27.12.2006. Byul. №36. (Ispravl. opubl. 10.06.2007. Byul. № 16.)
10. Kolchev A. A., Shchiryi A. O. Model' dlya vychisleniya amplitudno-chastotnykh harakteristik KV radiolinij v geometroopticheskom priblizhenii po dannym naklonnogo zondirovaniya ionosfery. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Har'kovskij politekhnicheskij institut"*. Tematicheskij vypusk: Radiofizika i ionosfera, 2011, No. 44, pp. 85–90.
11. Shchiryi A. O., Nedopekin A. E. Matematicheskoe i programnoe obespechenie kompleksa LCHM-zondirovaniya ionosfery. *Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta "Har'kovskij politekhnicheskij institut"*. Seriya: Radiofizika i ionosfera, 2012, no. 57 (963), pp. 49–56.
12. Shchiryi A. O. Gibkaya perestrojka ionogramm naklonnogo radiozondirovaniya ionosfery v processe vtorignoy obrabotki. *Novye informacionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemah*, 2011, № 14, pp. 138–140.
13. Shchiryi A. O. Razvitie sredstv avtomatizacii nazemnogo radiozondirovaniya ionosfery. *Fundamentalnye problemy radioelektronnogo priborostroeniya*, 2014, vol. 14, № 5, pp. 170–173.
14. Khmelnickij E. A. *Ocenka real'noj pomekhozashchishchennosti priema signalov v DKM diapazone*, M.: Svyaz', 1975, 232 p.

## References (transliterated)

1. Shchiryi A. O. Programmnoe obespechenie upravleniya basovoy stanciey ionosfernogo monitoring. *Izvestiya Belorusskoy inzhenernoy akademii*, 2005, № 2(20)/1, pp. 204–207.

Поступила (received) 30.05.2016

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Розвиток програмного забезпечення вторинної обробки даних дистанційного наземного радіозондування іоносфери / А. О. Щирый // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 78 – 83. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2078-9998.**

**Развитие программного обеспечения вторичной обработки данных дистанционного наземного радиозондирования ионосферы / А. О. Щирый // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 78 – 83. Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2078-9998.**

**Ionospheric remote sounding data post-realtime processing software evolution / A. O. Shchiryi // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 78 – 83. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2078-9998.**

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Щирий Андрій Олегович** – кандидат технічних наук, НІЗ ВШЕ, м. Москва; e-mail: andreyschiriy@gmail.com.

**Щирий Андрей Олегович** – кандидат технических наук, НИУ ВШЭ, г. Москва; e-mail: andreyschiriy@gmail.com.

**Shchiriy Andrey Olegovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), NRU HSE, Moscow; e-mail: andreyschiriy@gmail.com.