

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. В. БОГОМАЗ, И. М. КАСЫМОВ

## КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В результате проведенного для широкого диапазона высот и различного состояния космической погоды анализа спектральных характеристик некогерентно рассеянного (НР) ионосферой сигнала обоснована необходимость квазиоптимальной фильтрации полезного сигнала. Разработано устройство для квазиоптимальной фильтрации НР сигналов, предназначенное для работы в составе радара НР для повышения отношения сигнал/шум с минимальными искажениями спектра полезного сигнала.

**Ключевые слова:** ионосфера, радар некогерентного рассеяния, фильтрация случайных сигналов, спектр случайного сигнала, устройство квазиоптимальной фильтрации.

**Введение.** Сигнал, некогерентно рассеянный ионосферой, образующийся при зондировании ионосферы радиопульсами радара НР, является шумоподобным с нормальным законом распределения. Вид его спектра определяется параметрами рассеивающей области пространства, т.е. параметрами плазмы в объеме, занимаемом зондирующим импульсом [1]. Очевидно, что ширина энергетического спектра при этом зависит от высоты рассеивающей области, поскольку параметры ионосферной плазмы изменяются с высотой.

Необходимо отметить, что полезный НР сигнал принимается на фоне широкополосного шума (космического и аппаратного). Шум считается стационарным, статистически независимым от НР сигнала и имеющим равномерный спектр в диапазоне частот, который заполняет полезный сигнал. При этом отношение сигнал/шум изменяется от нуля до нескольких единиц (при высокой концентрации электронов в ионосфере – десятков).

Изменения спектральных и энергетических характеристик полезного сигнала и стационарность шумовых составляющих принятого сигнала подтверждаются в результате приема и обработки НР сигнала на измерительном комплексе Института ионосферы НАН и МОН Украины [2]. Однако, несмотря на то, что вопросы, связанные с приемом слабых НР сигналов, рассматривались рядом авторов [1, 3–7], одной из актуальных задач, требующих решения для обеспечения близкого к максимальному отношения сигнал/шум при минимальных искажениях характеристик НР сигнала, используемых для определения параметров ионосферы, является квазиоптимальная фильтрация полезного шумоподобного сигнала [8].

**Целью** данной работы является анализ характеристик сигнала некогерентного рассеяния в различных гелиогеофизических условиях и разработка на основе этого анализа устройства для квазиоптимальной фильтрации полезного сигнала.

**1. Особенности приема и обработки НР сигнала.** Статистические погрешности параметров НР сигнала и, следовательно, погрешности определяемых по ним параметров ионосферы, зависят от времени накопления (длительности сеанса измерения) и отношения сигнал/шум. Так, среднеквадратическая погрешность определения мощности НР сигнала равна

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{2}{N_p} \left( 1 + \frac{2}{q} + \frac{M+1}{Mq^2} \right)},$$

где  $N_p$  – количество реализаций;

$q$  – отношение сигнал/шум;

$M$  – количество участков радиолокационной развертки, на которых определяется средняя мощность шума.

Из формулы видно, что среднеквадратическая погрешность уменьшается при увеличении  $N$  и  $q$

В соответствии с уравнением радиолокации для радара с параболической антенной, направленной в зенит, [1], отношение мощности НР сигнала, рассеянного объемом плазмы с центром на высоте  $h$ , к мощности шума равно

$$q(h) = \frac{0,76 P_n \eta c \tau_n A}{16 \pi k T_{\text{сист}} \Delta F} \cdot \frac{\sigma N_e(h)}{h^2},$$

где  $P_n$  – импульсная мощность передатчика;

$\eta$  – к.п.д. антенно-фидерного тракта;

$c$  – скорость света;

$\tau_n$  – длительность зондирующего импульса;

$A$  – эффективная площадь антенны;

$\sigma$  – эффективное сечение рассеяния;

$N_e$  – концентрация электронов;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T_{\text{сист}}$  – эффективная шумовая температура приемной системы;

$\Delta F$  – эффективная ширина полосы пропускания приемника.

Видно, что отношение  $q$  тем больше, чем меньше  $\Delta F$ . Наша задача состояла в том, чтобы максимально уменьшить  $\Delta F$  и при этом не исказить сигнал.

Спектр НР сигнала зависит от ряда параметров ионосферы, таких как температура ионов, температура электронов и ионный состав, которые изменяются с высотой и зависят от космической погоды.

Для того, чтобы оптимизировать фильтрацию НР сигнала, была поставлена задача проанализировать состояние ионосферы при различных условиях.

**2. Космическая погода.** На рис. 1 приведены вариации индекса солнечной активности (СА) F10,7 в период с 2000 по 2015 гг., представленные на сайте прогнозирования космической погоды Национального управления океанических и атмосферных исследований (США) [9].

Для анализа высотных вариаций ионосферных параметров мы выбрали даты при максимальной СА в 2002 г. и при минимальной СА в 2010 г.

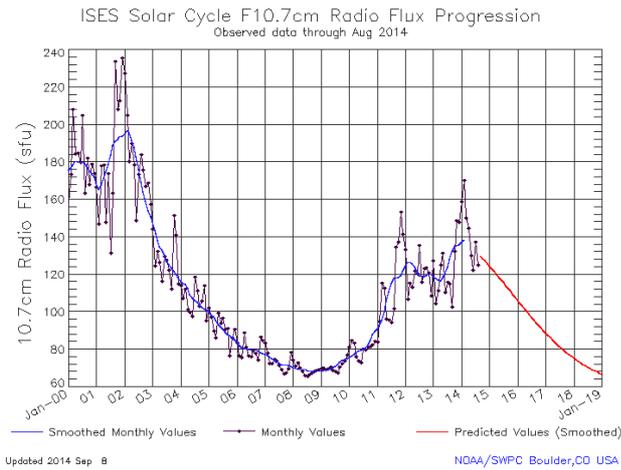


Рис. 1 – Временные вариации индекса солнечной активности F10,7

**3. Расчет и анализ параметров ионосферы и сигнала с использованием международной модели ионосферы IRI-2007.** На рис. 2 и рис. 3 приведены высотные зависимости параметров ионосферы (температур ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$  и относительного содержания ионов атомарного кислорода  $O^+$ , атомарного водорода  $H^+$  и гелия  $He^+$ ) в периоды летнего и зимнего солнцестояния при высокой и низкой CA днем и ночью, полученные из расчетов с помощью международной модели IRI-2007 [10].

Видно, что параметры ионосферы изменяются по высоте, а также зависят от условий измерений (летнего и зимнего солнцестояния, при высокой и низкой CA, днем и ночью). Наиболее сильно параметры ионосферы изменяются зимой, ночью, при низкой CA.

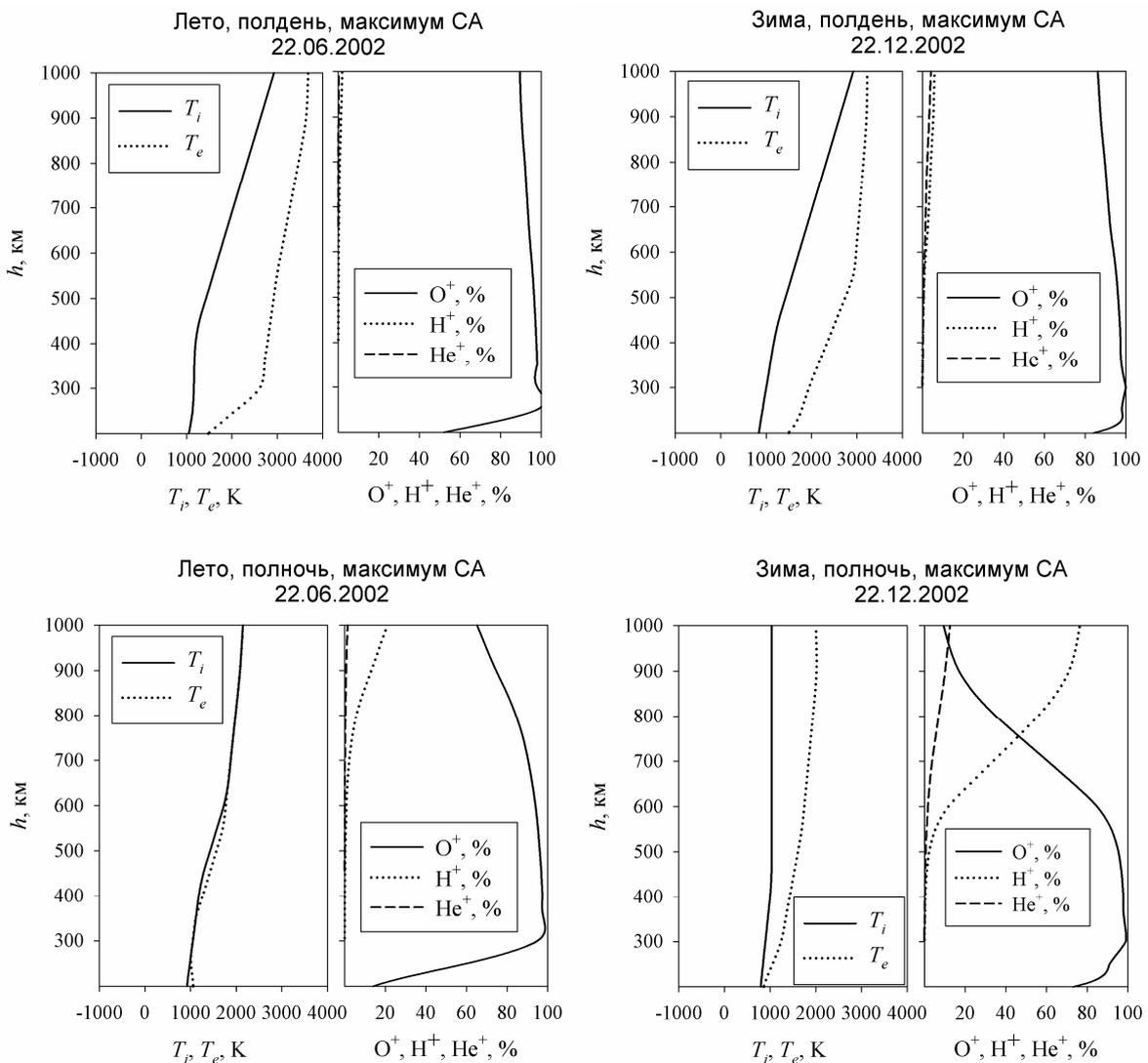


Рис. 2 – Высотные зависимости параметров ионосферы, рассчитанные по модели IRI-2007 для условий высокой солнечной активности

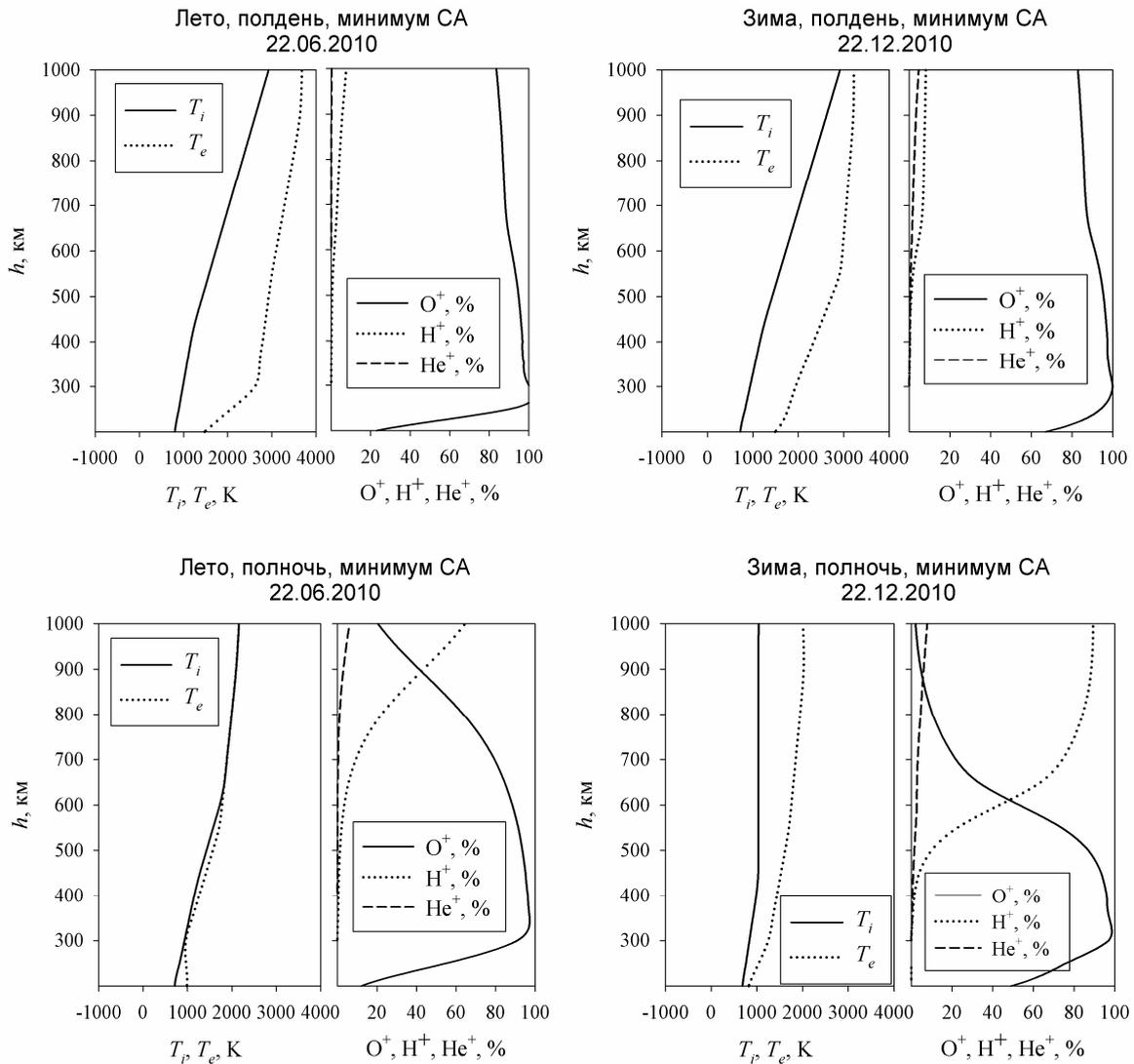


Рис. 3 – Высотные зависимости параметров ионосферы, рассчитанные по модели IRI-2007 для условий низкой солнечной активности

На рис. 4 приведены результаты расчета спектра НР сигнала для различных сочетаний параметров ионосферы, вычисленных с помощью ионосферной модели IRI-2007 (с учетом зондирующего радиоимпульса длительностью 650 мкс – импульсы такой длительностью в настоящее время применяются на радаре НР Института ионосферы в основном режиме работы [2]).

Расчет спектров проводился с использованием выражений ([11–13]):

$$S(\Delta F) = S_{IS}(\Delta F) \otimes S_P(\Delta F),$$

где  $S(\Delta F)$  – спектр НР сигнала с учетом импульсного зондирования;

$S_P(\Delta F)$  – спектральная функция огибающей радиоимпульса;

$S_{IS}(\Delta F)$  – спектральная функция рассеяния, определяемая из

$$S_{IS}(\Delta F) = \frac{(1+\beta)^2 \sum_{n=1}^N \gamma_n \sqrt{\frac{m_n}{m_1}} e^{-\frac{m_n}{m_1} (2\pi\alpha\Delta F)^2}}{\left[ 1 + \beta \left( 1 - \sum_{n=1}^N \gamma_n \Phi \left( 2\pi\alpha\Delta F \sqrt{\frac{m_n}{m_1}} \right) \right) \right]^2 + \pi\beta^2 (2\pi\alpha\Delta F)^2 \left( \sum_{n=1}^N \gamma_n \sqrt{\frac{m_n}{m_1}} \cdot e^{-\frac{m_n}{m_1} (2\pi\alpha\Delta F)^2} \right)^2},$$

где  $\beta = T_e / T_i$  – отношение температур;

$N$  – количество сортов ионов, которыми представлена плазма;

$\gamma_n$  – относительное содержание ионов массой  $m_n$ ;

$$\alpha = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{\frac{m_1}{2kT_i}};$$

$\lambda_0$  – длина волны, соответствующая частоте зондирования;

$$\varphi(\theta) = 2\theta e^{-\theta^2} \int_0^\theta e^{x^2} dx .$$

Из рис. 4 и рис. 5 видно, что на высотах, где появляются ионы водорода (см. рис. 2 и рис. 3 соответственно), спектр значительно расширяется, и это необходимо учитывать при использовании фильтров нижних частот (ФНЧ) в радиоприемном устройстве. Также видно, что наибольшее изменение спектра с высотой имеет место при низкой СА, зимой, вблизи полночи.

**4. Анализ параметров ионосферы и сигнала по результатам измерений на радаре НР Института ионосферы НАН и МОН Украины.** Анализ параметров ионосферы и сигнала на радаре НР Института ионосферы показал аналогичные результаты, хотя отдельные отличия от данных модели IRI имеют место, поскольку она была получена в основном по данным станций американского континента.

На рис. 6 приведены высотные зависимости измеренных автокорреляционных функций, спектров НР сигнала и вычисленных по ним параметров ионосферной плазмы в периоды зимнего и летнего солнцестояния при низкой СА днем и ночью. Также указаны дата и время проведения измерений, длительность сеанса ( $T=15$  мин), номер сеанса ( $N$ ), критическая частота слоя F2 ионосферы ( $F_{кр}$ ) и численные значения отношения сигнал/шум ( $q$ ).

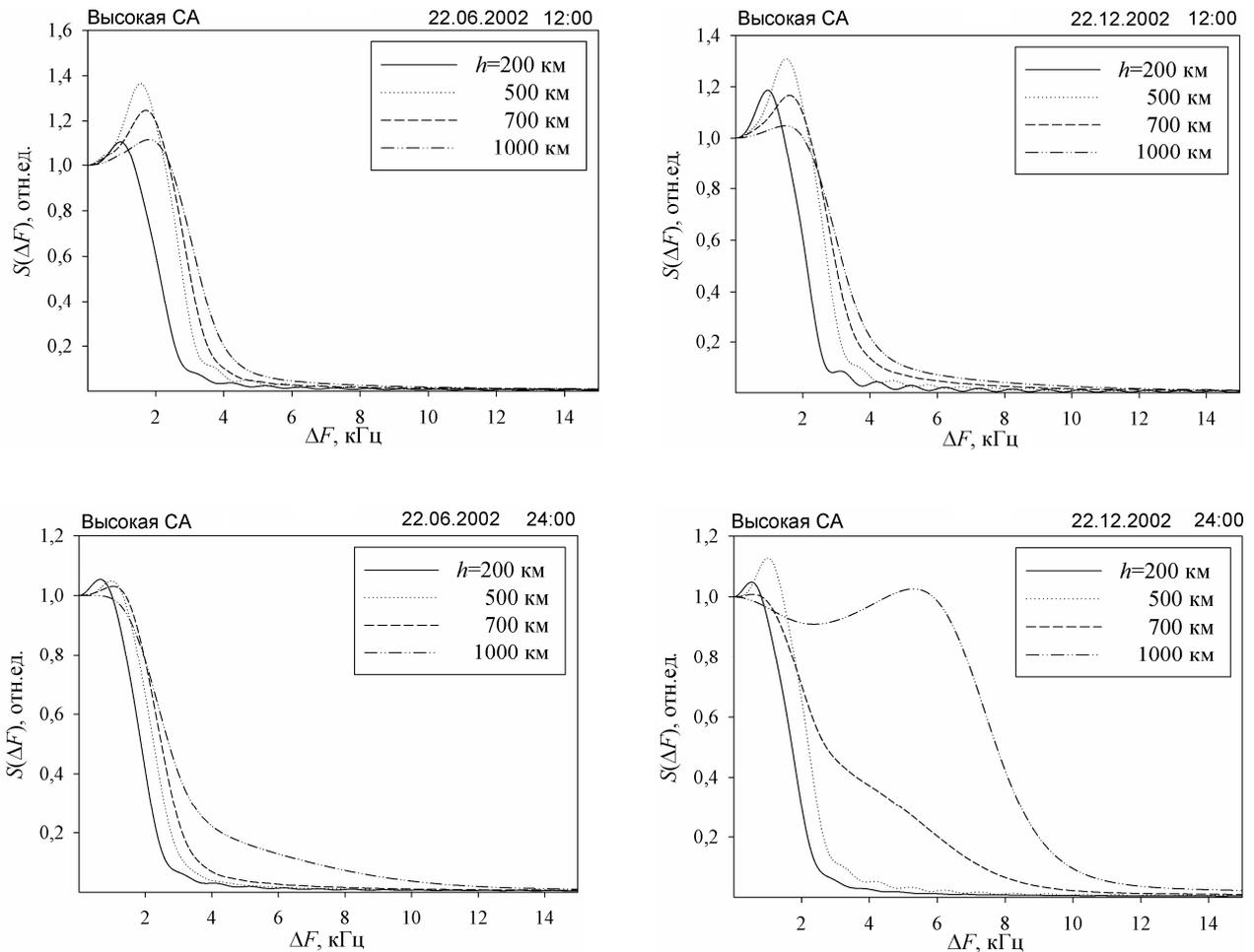


Рис. 4 – Результаты расчета спектра НР сигнала с использованием модели IRI-2007 для условий высокой солнечной активности

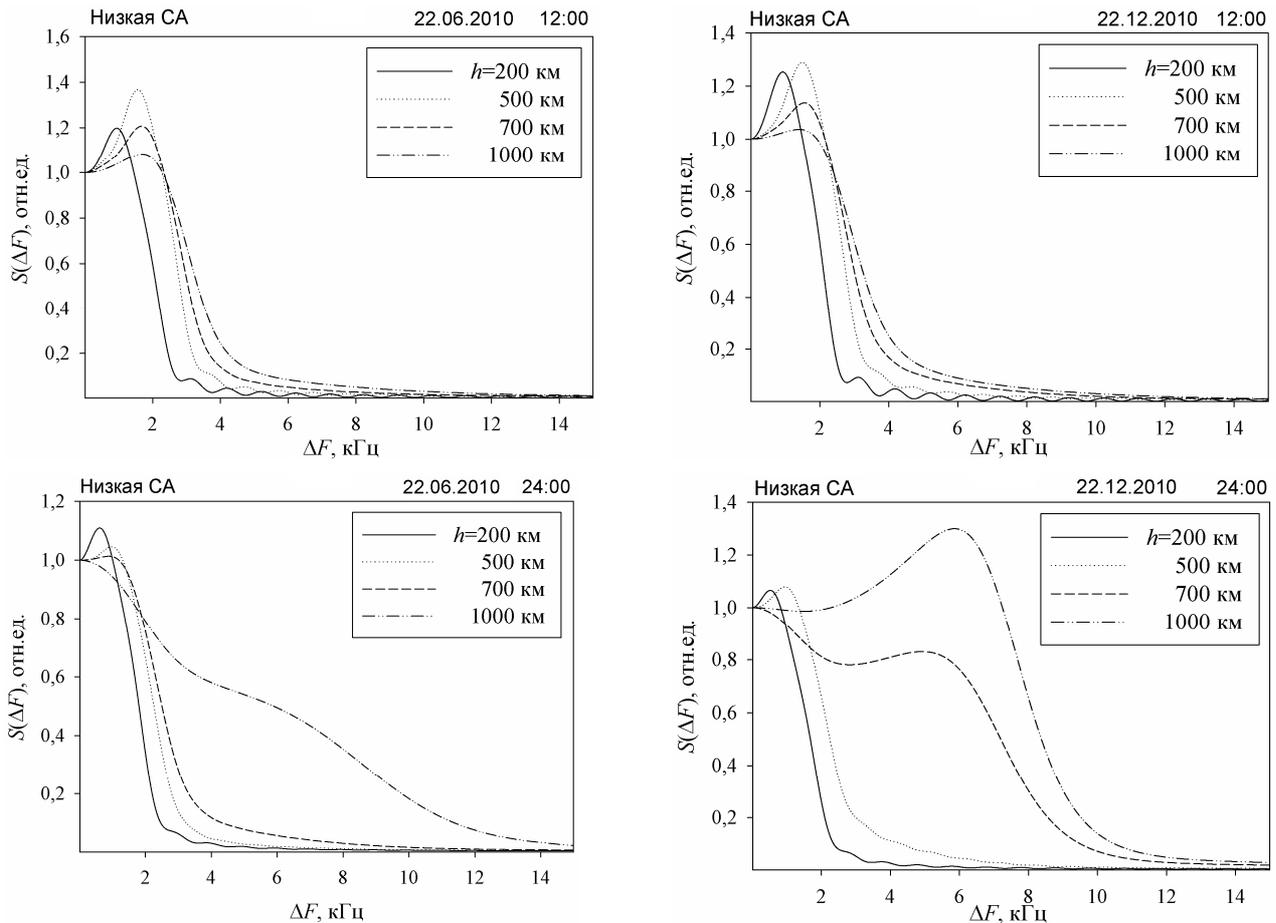


Рис. 5 – Результаты расчета спектра НР сигнала с использованием модели IRI-2007 для условий низкой солнечной активности

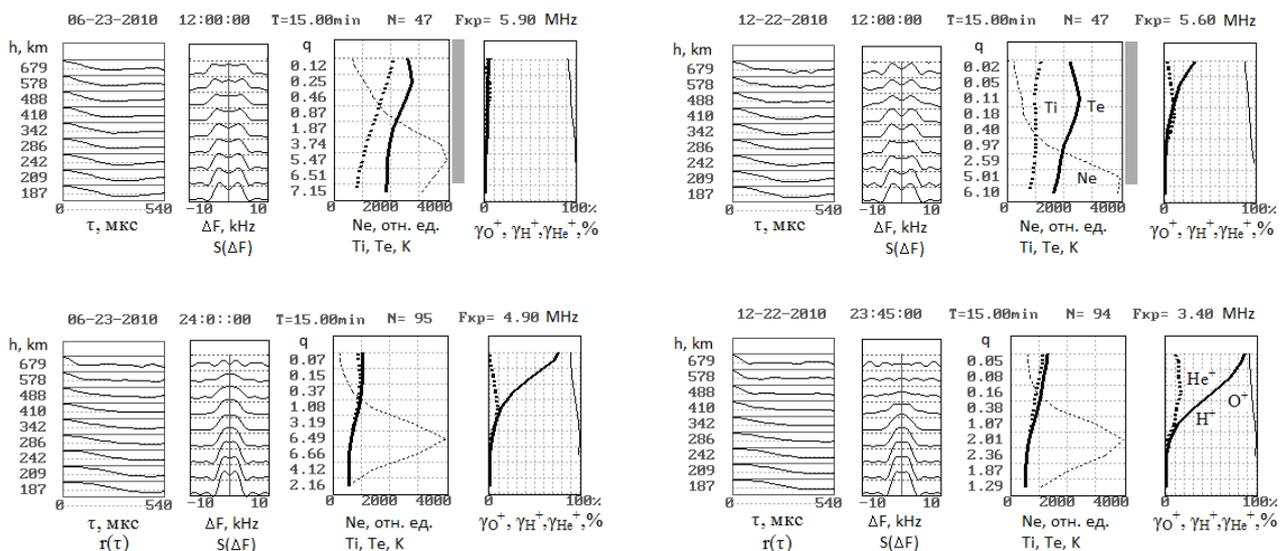


Рис. 6 – Высотные зависимости измеренных АКФ и спектров НР сигнала и вычисленных по ним параметров ионосферной плазмы

Видно, что при увеличении высоты спектры расширяются. Значительное расширение наблюдается на больших высотах ионосферы при появлении ионов водорода.

На рис. 7 приведены результаты расчета спектра НР сигнала для различных сочетаний параметров ионосферы по данным измерений на радаре НР (с учетом зондирующего радиопульса длительностью 650 мкс).

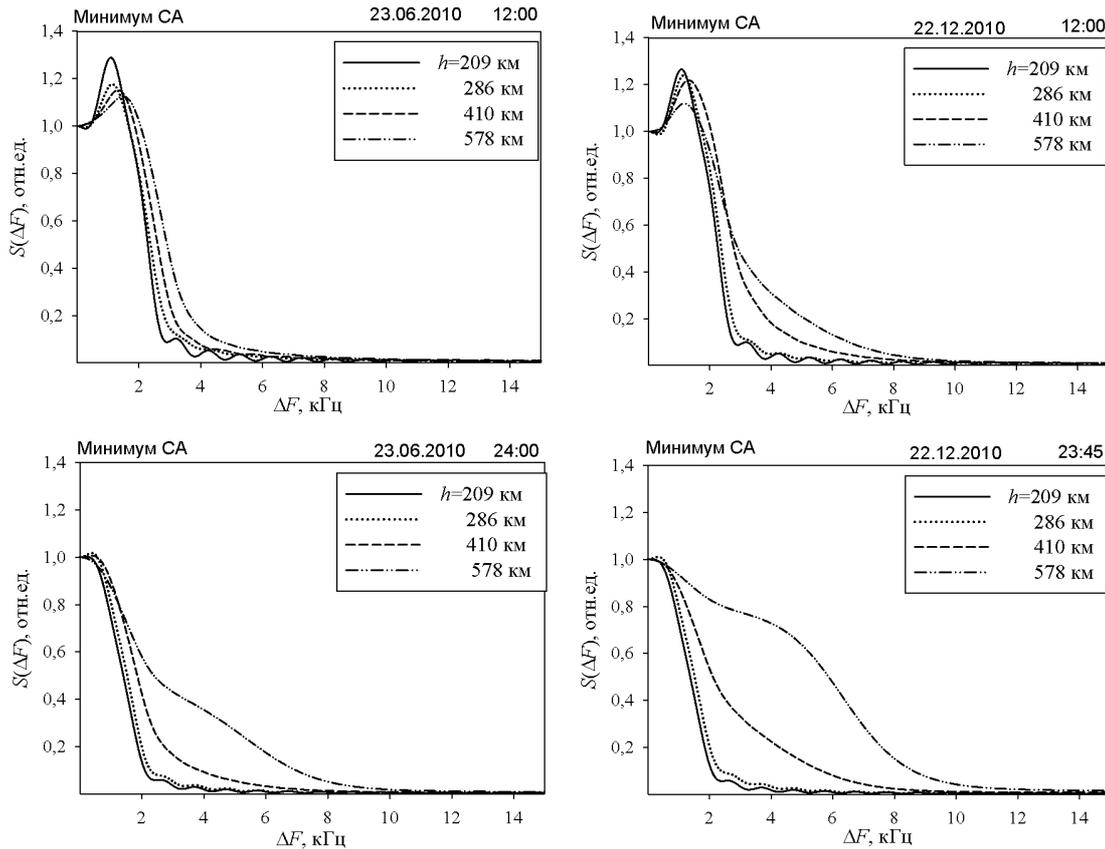


Рис. 7 – Спектры НР сигнала по данным измерений на радаре Института ионосферы

Видно, так же как и при данных по модели IRI, что на больших высотах спектр расширяется. Наиболее широкий спектр – зимой, ночью.

В связи с вышесказанным, мы пришли к выводу о необходимости применения ФНЧ с различными характеристиками для фильтрации НР сигналов с разных высотных диапазонов. В качестве иллюстрации на рис. 8 приведены спектры сигналов, некогерентно рассеянных объемами плазмы с центрами на высотах  $h_1, h_2, h_3$  и квадраты амплитудно-частотных характеристик ФНЧ  $K_p(\Delta F)$ , наиболее подходящие для фильтрации этих сигналов.

**4. Квазиоптимальная фильтрация НР сигналов.**

Варианты реализации такой фильтрации и эпюры сигналов, поясняющие работу приведенных схем, показаны на рис. 9.

Квазиоптимальную фильтрацию сигнала, поступающего от синхронного детектора (СД) радиоприемного устройства, можно осуществлять путем использования одновременно трех ФНЧ, буферных усилителей и трех устройств обработки (УО 1–3) (рис. 9, а). Информация от каждого из них поступает на общее устройство обработки (УО), где она анализируется и выбирается определенный диапазон высот для соответствующего фильтра.

На рис. 9, б показана структурная схема устройства квазиоптимальной фильтрации при наличии одного устройства обработки. Здесь используются те же ФНЧ, а также быстродействующий электронный коммутатор (ЭК), осуществляющий переключение выходов фильтров, буферный усилитель и схема

управления электронным коммутатором. Поскольку мощность (и корреляционная функция) сигнала определяется в виде разности мощности (корреляционной функции) смеси «сигнал+шум» и усредненной мощности (корреляционной функции) шума в конце радиолокационной развертки дальности, необходимо дважды получать на выходе данные: сначала о параметрах смеси «сигнал+шум» на рабочих участках развертки, а затем – шума на участках развертки, где полезный сигнал отсутствует, для того чтобы определять параметры сигнала (рис. 9, в).

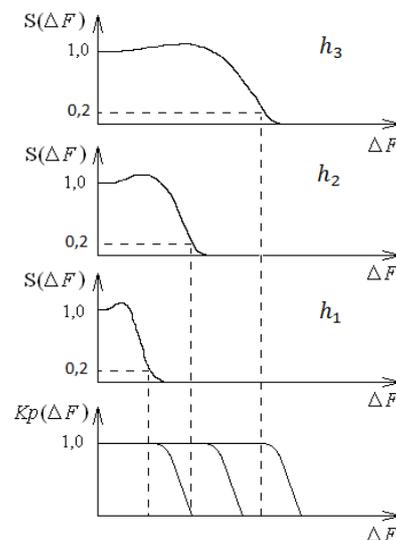


Рис. 8 – Иллюстрация спектров НР сигналов, принятых с высот ионосферы  $h_1, h_2, h_3$  и квадратов АЧХ трех ФНЧ

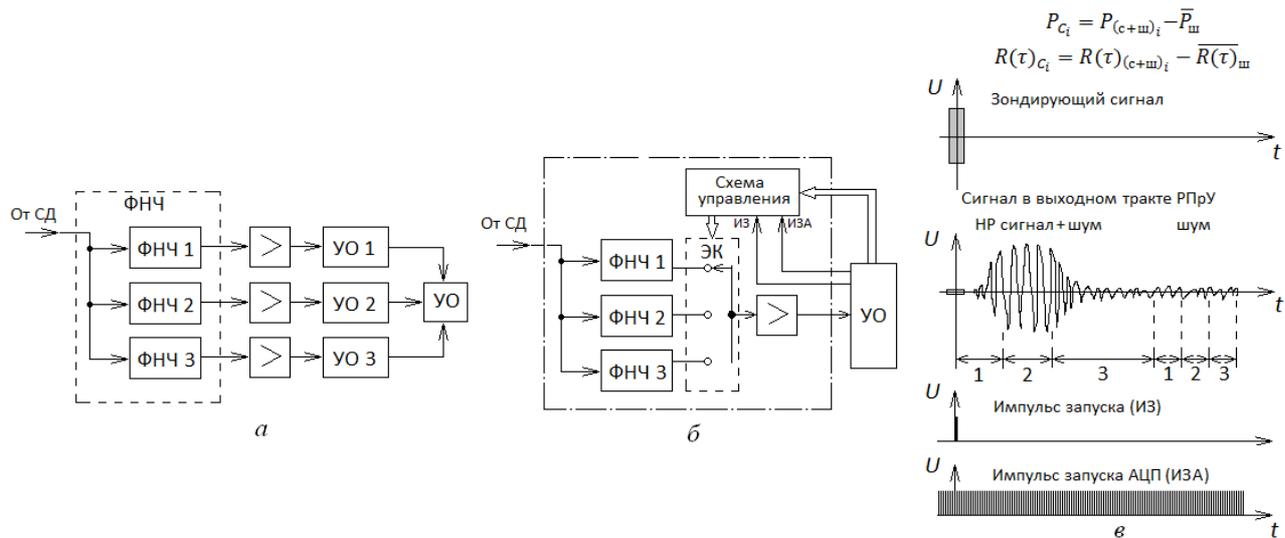


Рис. 9 – Структурная схема квазиоптимальной фильтрации: *a* – с тремя устройствами обработки; *б* – при наличии одного устройства обработки; *в* – эпюры сигналов: радиопередатчика, на выходе радиоприемного устройства и управления

Схема работает следующим образом. В промежутке времени «1» радиолокационной развертки (см. рис. 9, *в*) используется фильтр ФНЧ 1, в промежутке «2» – ФНЧ 2 и в промежутке «3» – ФНЧ 3. При определении параметров шума аналогично последовательно используются ФНЧ 1, ФНЧ 2 и ФНЧ 3. Электронный коммутатор представляет собой набор электронных ключей на МОП-транзисторах. Управление коммутатором осуществляется с помощью сигналов от схемы управления, которая содержит счетчики импульсов, компараторы, RS-триггеры и пульт для ручной установки кодов высоты. Импульс запуска (ИЗ), подаваемый от устройства обработки на схему управления в момент начала радиолокационной развертки, устанавливает в «0» счетчики. При этом на выходе коммутатора появляется сигнал от ФНЧ 1. Импульсы запуска АЦП (ИЗА), по которым в АЦП устройства обработки осуществляются выборки сигнала, управляют работой счетчиков. С помощью компараторов осуществляется сравнение кодов на выходах счетчиков с кодами, установленными с помощью пульта (в случае ручной установки кодов высоты) или кодами сигналов от УО (при автоматической установке кодов в УО на основании текущего анализа параметров НР сигнала во время ионосферных измерений). При совпадении кодов подается сигнал на соответствующий ключ ЭК для переключения фильтров. Период следования импульсов ИЗА равен около 30 мкс, что соответствует шагу по высоте  $\Delta h \approx 4,5$  км. Импульсы запуска подаются с частотой 24,4 Гц, равной частоте посылок.

В качестве фильтров целесообразно использовать фильтры типа Кауэра 6–7 порядка с амплитудно-частотной характеристикой, близкой к прямоугольной [14]. Поскольку в составе аппаратуры харьковского радара НР уже есть три ФНЧ с частотами среза 3, 5 и 9 кГц, целесообразно (на основании проведенного анализа) добавить дополнительно два ФНЧ с частотами среза 7 и 8 кГц. В зависимости от условий измерений ионосферных параметров из пяти фильтров выбираются три ФНЧ,

наиболее подходящие для данных условий. В ряде случаев (например, летом в дневное время) достаточно использовать два или один ФНЧ. Выбор границ высотных диапазонов для каждого ФНЧ также обуславливается конкретными условиями измерений параметров ионосферы.

Таким образом, осуществляется фильтрация сигнала на выходе приемника с отношением сигнал/шум, близким к максимально возможному, при минимуме искажений полезного сигнала.

**Выводы.** 1. На основании анализа вариаций параметров ионосферы при различных гелиофизических условиях и соответствующих характеристик сигнала некогерентного рассеяния подтверждено, что спектр НР сигнала зависит от времени суток, сезона и уровня СА, и выяснено, при каких условиях ширина спектра сигнала значительно изменяется с высотой.

2. Определены пределы изменения ширины спектра НР сигнала в условиях минимума и максимума СА с использованием вычисленных параметров ионосферы из международной модели ионосферы IRI-2007 и данных радара НР Института ионосферы. В наибольших пределах ширина спектра изменяется при низкой СА в ночное время.

3. На основании полученных результатов было принято решение о необходимости квазиоптимальной фильтрации полезного шумоподобного НР сигнала из шума (аппаратурного и космического) для трех (и меньше) высотных диапазонов измерений ионосферных параметров. Выбор количества и границ высотных диапазонов обуславливается конкретными условиями измерений параметров ионосферы.

4. Разработано устройство для квазиоптимальной фильтрации сигналов некогерентного рассеяния. Устройство позволяет увеличить отношение сигнал/шум (тем самым уменьшить статистические погрешности определения параметров ионосферы), выделяя с наименьшими искажениями спектр НР сигнала и эффективно подавляя спектральные компоненты мешающего шума.

**Список литературы:** 1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139–175. 2. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42. 3. Holt J.M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J.M. Holt, D.A. Rhoda, D. Tetenbaum, A.P. van Eyken // Radio Sci. – 1992. – Vol. 27, No. 3. – P. 435–447. 4. Капустян А. М. Учет влияния аппаратуры на форму флуктуационного спектра среды и их автокорреляционной функции / А. М. Капустян // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 31. – С. 69–75. 5. Емельянов Л. Я. Влияние характеристик зондирующего сигнала и радиоприемного тракта на точность измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Физические аспекты современных технологий. Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 103. – С. 34–38. 6. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин; Нац. акад. наук Украины, Ин-т ионосферы, Нац. техн. ун-т «Харьк. политехн. ин-т». – Х.: НТУ «ХПИ», – 2011. – 239 с. 7. Emel'yanov L.Ya. Incoherent Scatter Measurement of the Electron Density Altitude Profiles / L.Ya. Emel'yanov // Geomagnetism and Aeronomy. – 2002. – V. 42, N 1. – P. 109–113. 8. Васильев К. К. Теория электрической связи: учебное пособие / К. К. Васильев, В. А. Глушков, А. В. Дормидонтов, А. Г. Нестеренко; под общ. ред. К. К. Васильева. – Ульяновск: УлГТУ, 2008. – 452 с. 9. <http://www.swpc.noaa.gov/communities/space-weather-enthusiasts> 10. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / D. Bilitza, B. W. Reinisch // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 42, Iss. 4. – P. 599–609. 11. Гринченко С. В. Оптимальный алгоритм многократных вычислений теоретических характеристик некогерентно рассеянного сигнала / С. В. Гринченко // Сборник научных трудов ХГПУ. – 1999. – Вып. 7. – С. 331–336. 12. Пуляев В. А. Особенности решения прямой задачи рассеяния при расчете параметров ионосферной плазмы / В. А. Пуляев, Е. И. Сокол, А. В. Богомаз [и др.] // Всеукр. межведомств. научно-технич. сб. «Радиотехника». Харьков: ХНУРЭ. – 2010. – № 160. – С. 280–285. 13. Богомаз А. В. Влияние ширины спектра зондирующего радиоимпульса на точность расчета параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн / А. В. Богомаз // Всеукр. межведомств. научно-технич. сб. «Радиотехника». Харьков: ХНУРЭ. – 2013. – № 173 – С. 27–31. 14. Емельянов Л. Я. Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов // Вестн. Харьк. гос.

политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 108–112.

**Bibliography (transliterated):** 1. Jevans, Dzh. V. “Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln.” *TIIEr*. 8.4 (1969): 139–175. Print. 2. Domnin, I. F., Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.]. “Kharkiv Incoherent Scatter Facility.” *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere*. 47.1089 (2014): 28–42. Print. 3. Holt, J. M., D. A. Rhoda, D. Tetenbaum, A. P. van Eyken. “Optimal analysis of incoherent scatter radar data.” *Radio Sci*. 27.3 (1992): 435–447. Print. 4. Kapustjan, A. M. “Uchet vlijanija apparatury na formu fluktuacionnogo spektra sredi i ih avtokorreljacionnoj funkcii.” *Vestn. Har'k. gos. politehn. un-ta. Sb. nauchn. tr.* 31 (1999): 69–75. Print. 5. Emel'janov, L. Ja. “Vlijanie harakteristik zondirujushhego signala i radiopriemnogo trakta na tochnost' izmerenija skorosti drejfa ionosfernoj plazmy metodom nekogerentnogo rassejanija.” *Vestn. Har'k. gos. politehn. un-ta. Fizicheskie aspekty sovrememyh tehnologij. Sb. nauchn. tr.* 103 (2000): 34–38. Print. 6. Puljaev, V. A., D. A. Dzjubanov, I. F. Domnin. *Opreделение parametrov ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln: monografija*. Kharkiv: NTU «HPI», 2011. Print. 7. Emel'yanov, L. Ya. “Incoherent Scatter Measurement of the Electron Density Altitude Profiles.” *Geomagnetism and Aeronomy*. 42.1 (2002): 109–113. Print. 8. Vasil'ev, K. K., V. A. Glushkov, A. V. Dormidontov, A. G. Nesterenko. *Teorija jelektricheskoj svjazi : uchebnoe posobie*. Ul'janovsk: UIGTU, 2008. Print. 9. National Oceanic and Atmospheric Administration. Space Weather Prediction Center. <http://www.swpc.noaa.gov/>. 11 August 2015. Web. 11 August 2015. <<http://www.swpc.noaa.gov/communities/space-weather-enthusiasts>>. 10. Bilitza, D., B. W. Reinisch. “International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters.” *Advances in Space Research*. 42.4 (2008): 599–609. Print. 11. Grinchenko, S. V. “Optimal'nyj algoritm mnogokratnyh vychislenij teoreticheskikh harakteristik nekogerentno rassejannogo signala.” *Sbornik nauchnyh trudov HGPU*. 7 (1999): 331–336. 12. Puljaev, V. A., E. I. Sokol, A. V. Bogomaz [et al.]. “Osobennosti reshenija prjamoj zadachi rassejanija pri raschete parametrov ionosfernoj plazmy.” *Vseukrainskij mezhdvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik «Radiotehnika»*. 160 (2010): 280–285. Print. 13. Bogomaz, A. V. “Vlijanie shiriny spektra zondirujushhego radioimpul'sa na tochnost' rascheta parametrov ionosfernoj plazmy v metode nekogerentnogo rassejanija radiovoln.” *Vseukrainskij mezhdvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik «Radiotehnika»*. 173 (2013): 27–31. Print. 14. Emel'janov, L. Ja. “Radiopriemnoe ustrojstvo radara nekogerentnogo rassejanija.” *Vestn. Har'k. gos. politehn. un-ta. Sb. nauchn. tr.* 31 (1999): 108–112. Print.

Поступила (received) 12.08.2015

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

**Ємельянов Леонід Якович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, завідувач відділу, м. Харків, тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Ємельянов Леонид Яковлевич** – кандидат фізико-математических наук, старший научный сотрудник, Інститут іоносфери, заведуючий відделом, г. Харьков, тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Emelyanov Leonid Yakovlevich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Head of Department, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

**Богомаз Олександр Вікторович** – кандидат технічних наук, Інститут іоносфери, науковий співробітник, м. Харків, тел.: 706-22-87; тел.: 706-22-87; e-mail: albom85@yandex.ru.

**Богомаз Александр Викторович** – кандидат технических наук, Інститут іоносфери, научный сотрудник, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: albom85@yandex.ru.

**Bogomaz Oleksandr Viktorovich** – Candidate of Technical Sciences, Institute of Ionosphere, Researcher, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: albom85@yandex.ru.

**Касимов Ідріс Магсимович** – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, кафедра “Радіоелектроніка”, магістр; тел. (063) 438-34-40; e-mail: id7777@inbox.ru.

**Касымов Идрис Магсимович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра «Радиоэлектроника», магистр; тел. (063) 438-34-40; e-mail: id7777@inbox.ru.

**Kasymov Idris Magsimovich** – National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Department “Radio Electronics”, Master; tel. (063) 438-34-40; e-mail: id7777@inbox.ru.