

А. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ВРЕМЕННОГО И ВЫСОТНОГО УСРЕДНЕНИЯ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Рассмотрены особенности временного и высотного усреднения автокорреляционных функций некогерентно рассеянного сигнала. Оценены сверху допустимые значения интервалов усреднения, при которых ещё не возникают существенные смещения оценок параметров ионосферной плазмы. Обоснована возможность временного усреднения данных на интервале до 60 минут. Показано, что при использовании простого длинного зондирующего радиоимпульса дополнительное высотное усреднение может привести к недопустимым искажениям высотно-временных вариаций параметров ионосферы.

Ключевые слова: ионосфера, метод некогерентного рассеяния, обработка данных, усреднение, трапецеидальное суммирование.

Введение. Необходимость получения достоверных оценок параметров ионосферной плазмы в условиях, характерных для измерений во внешней ионосфере (отношение сигнал/шум по мощности q около единицы и менее) приводит к необходимости дополнительного накопления полученных в отдельных сеансах измерений автокорреляционных функций (АКФ) некогерентно рассеянного (НР) сигнала [1]. В общем случае такое накопление может приводить к смещению оценок искомых параметров ионосферной плазмы.

Методики усреднения АКФ НР сигнала, применяющиеся на радаре НР обсерватории в Аресибо, достаточно подробно описаны в работе [2].

Для харьковского радара НР исследования, позволяющие оценить сверху допустимые значения интервалов временного и высотного усреднения АКФ, при которых ещё не возникают существенные смещения оценок температур заряженных частиц и ионного состава, до настоящего времени проведены не были.

Цель работы – оценить допустимые величины интервалов дополнительного усреднения АКФ НР сигнала путём численного моделирования решений прямой и обратной радиофизических задач.

Временное усреднение АКФ НР сигнала. Усреднение АКФ по времени наиболее эффективно, поскольку при этом происходит накопление независимых результатов эксперимента. Величина интервала времени ΔT , на котором проводится усреднение данных, с одной стороны, должна быть как можно большей (для уменьшения дисперсии оценок АКФ). С другой стороны, чрезмерно большая величина ΔT может привести к смещению оценок параметров плазмы (поскольку значения ионосферных параметров изменяются во времени, а связь между АКФ НР сигнала и значениями параметров плазмы существенно нелинейная). С учётом этого обстоятельства максимально возможное значение ΔT_{\max} должно выбираться очень аккуратно.

Оценим значение ΔT_{\max} , при котором ещё не будут возникать существенные смещения оценок характеристик ионного состава. В общем случае величина ΔT_{\max} может быть определена только по результатам моделирования. Суть проведенного моделирования заключалась в следующем.

Для модельных суточных вариаций параметров

плазмы с шагом по времени 1 мин (что соответствует длительности сеанса измерений для харьковского радара НР), взятых из международной справочной модели ионосферы IRI [3], рассчитывались значения АКФ, которые затем пропускались через модель измерительных преобразований

$$R^*(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\theta) R_p(\theta) R_F(\tau - \theta) d\theta, \quad (1)$$

где R – АКФ сигнала, некогерентно рассеянного на несущей частоте зондирующего радиоимпульса;

R_p – АКФ огибающей зондирующего радиоимпульса;

R_F – АКФ импульсной характеристики приёмного тракта радара.

После этого АКФ усреднялись на интервале времени с заданной величиной ΔT . Для усреднённых АКФ решалась обратная радиофизическая задача, и полученные оценки температур заряженных частиц и ионного состава сравнивались с исходными модельными значениями. Величина интервала ΔT увеличивалась до тех пор, пока не начинали проявляться заметные смещения оценок искомых параметров.

Результаты моделирования для ситуации, когда начали отмечаться смещения оценок температур ионов T_i и электронов T_e , а также относительного содержания ионов атомарного водорода $N[H^+]/N$ и относительного содержания ионов гелия $N[He^+]/N$ (это произошло при $\Delta T \approx 2$ ч) представлены на рис. 1. Левая панель соответствует условиям, когда лёгкие ионы не являются преобладающими, правая панель показывает результаты для случая ночного доминирования ионов H^+ и существенно больших значений параметра $N[He^+]/N$.

Из рисунка видно, что смещения параметров $N[H^+]/N$ и $N[He^+]/N$ невелики. Очевидно также, что при дальнейшем увеличении интервала ΔT значения смещений будут увеличиваться.

С учётом того, что по данным харьковского радара НР суточные вариации $N[H^+]/N$ менее монотонны по сравнению с использованными для моделирования вариациями (скорость изменения $N[H^+]/N$ во времени до 1,5 – 2 раз больше), для данных харьковского радара НР была выбрана предельно допустимая величина интервала усреднения $\Delta T_{\max} = 1$ ч.

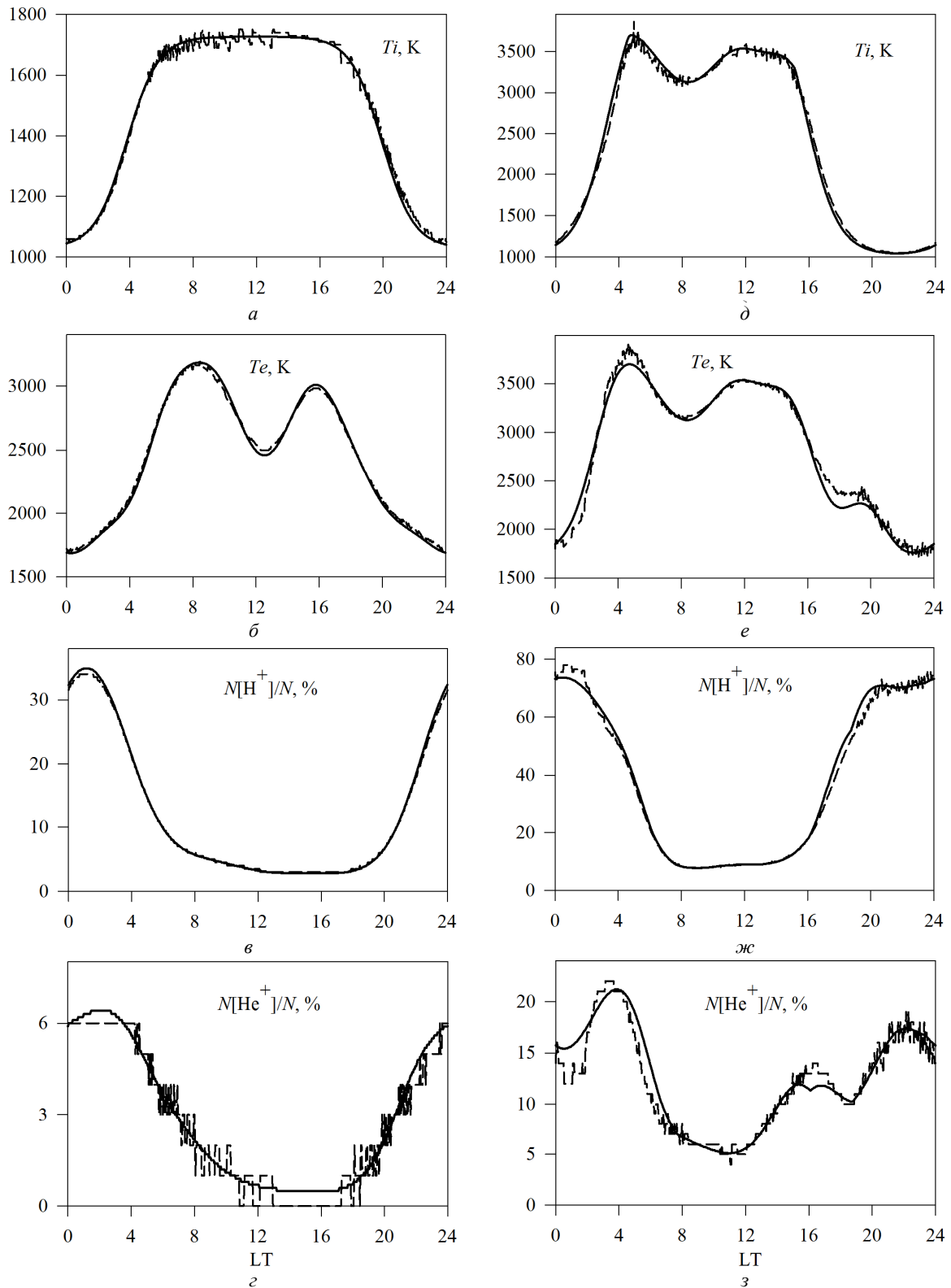


Рис. 1 – Используемые для синтеза вариаций АКФ модельные вариации параметров ионосферной плазмы: a – температура ионов T_i , $б$ – температура электронов T_e , $в$ – относительное содержание ионов атомарного водорода $N[H^+]/N$ и $д$ – относительное содержание ионов гелия $N[He^+]/N$ (сплошная линия); результаты решения обратной радиофизической задачи для усреднённых на интервале $\Delta T = 2$ ч АКФ (пунктир). Левая панель соответствует условиям, когда лёгкие ионы не являются преобладающими; правая панель – условиям доминирования ионов H^+ и существенно большего относительного содержания ионов гелия в ночное время.

Такой интервал усреднения, с одной стороны, обеспечивает значительное уменьшение статистического разброса АКФ (дисперсия АКФ уменьшается в 60 раз по сравнению с дисперсией для исходного одноминутного сеанса), а с другой стороны, гарантирует отсутствие существенных смещений оценок относительных концентраций ионов H^+ и He^+ .

Результаты обработки данных харьковского радара НР с помощью пакета программ UPRISE [4] подтвердили возможность усреднения на интервале $\Delta T = 1$ ч.

Дополнительное высотное усреднение автокорреляционных функций НР сигнала. Высотное суммирование АКФ НР сигнала проводится обычно в тех случаях, когда необходимо дополнительное уменьшение статистического разброса полученных оценок АКФ. При этом чаще всего используется так называемое трапецидальное суммирование [5]:

$$R_z(h, i\Delta\tau) = \frac{1}{1+2p+i} \left[\sum_{z=h-(i+p)\frac{c\Delta\tau}{2}}^{h+p\frac{c\Delta\tau}{2}} R(z, i\Delta\tau) \right],$$

где h – высота, на которой находится передний фронт зондирующего радиопульса;

$i = 0, 1, 2, \dots$ – номер задержки АКФ;

$\Delta\tau$ – шаг по задержке измеряемой АКФ (обычно равен шагу выборки сигнала на выходе приёмного тракта радара НР);

p – параметр трапецидального суммирования, который задаёт величину диапазона высотного усреднения (p может принимать значения $0, 1, 2, \dots$).

При $p = 0$ диапазон высотного усреднения для всех задержек АКФ соответствует длительности зондирующего импульса T и равен $cT/2$. При $p > 0$ диапазон высотного усреднения расширяется, что приводит к ухудшению высотной разрешающей способности. Таким образом, на практике необходимо внимательно следить за тем, чтобы увеличение параметра высотного суммирования p не привело к смещению оценок параметров ионосферной плазмы.

Было установлено, что даже при отсутствии дополнительного высотного усреднения АКФ НР сигнала ($p = 0$) могут возникать небольшие смещения оценок характеристик ионного состава. Можно ожидать, что при увеличении значения параметра p величина таких смещений будет возрастать. Это предположение было проверено с помощью дополнительного моделирования.

Для синтеза оценки измеренной функции $R^*(\tau)$ использовался набор функций $R(\tau, h)$, рассчитанных для каждого высотного участка $\Delta h = 1$ км внутри диапазона высот протяжённостью $Z = cT/2 + 2pc\Delta\tau/2$, где $\Delta\tau$ – величина интервалов времени, через которые производится запись измеренных оценок АКФ; в данном случае значение $\Delta\tau$ равно шагу по задержке для измеряемой АКФ. Для моделирования была выбрана величина параметра $p = 11$, что соответствует величине $Z \approx 200$ км. Суммирование с параметром

$p = 11$ являлось типичным для стандартного режима анализа данных харьковского радара НР при исследованиях во внешней ионосфере (в отдельных случаях высотное усреднение было ещё более значительным – величина Z достигала 300 км).

На рис. 2 и рис. 3 представлены результаты моделирования, которые показывают, что дополнительное высотное усреднение приводит к существенным смещениям оценок характеристик ионного состава.

Из рис. 2 видно, что при отсутствии дополнительного высотного усреднения АКФ НР сигнала результаты решения обратной радиофизической задачи хорошо согласуются с исходными профилями параметров ионосферной плазмы. Систематические смещения, заметные на рис. 2, в и рис. 2, з, связаны с тем, что для синтеза оценки измеренной функции $R^*(\tau)$ использовалась не одна функция $R(\tau)$, а набор функций $R(\tau, h)$, рассчитанных для каждого высотного участка $\Delta h = 1$ км внутри диапазона высот, занимаемого зондирующим радиопульсом. При этом суммарная функция $R^*(\tau)$ рассчитывалась с использованием двумерной функции неопределённости (ДФН) АКФ НР сигнала $W_{t_2-t_1}$ [5–7]:

$$R^*(t_2 - t_1) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} R(\theta, r) W_{t_2-t_1}(\theta, r) d\theta dr.$$

ДФН рассчитывается по формуле:

$$W_{t_2-t_1}(\theta, r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_{t_1}(s, r) W_{t_2}(s + \theta, r) ds dr,$$

где $W_t(s, r) = g(t-s)p\left(s - \frac{2r}{c}\right)$;

$p(s)$ – огибающая зондирующего радиопульса;

$g(s)$ – импульсная характеристика приёмного тракта радара НР.

Решение обратной задачи для уменьшения времени моделирования проводилось с использованием одномерной модели измерительных преобразований с использованием формулы (1). Величина смещений, связанных с таким упрощением, невелика и не приводит к существенным ошибкам. Так, максимальная величина смещения оценки параметра $N[H^+]/N$ не превышает 4,5 % при значении $N[H^+]/N = 74$ %, а максимальная величина смещения оценки параметра $N[He^+]/N$ составила 3,0 % при $N[He^+]/N = 20$ %.

Из рис. 3 видно, что дополнительное высотное усреднение привело к существенным смещениям оценок характеристик ионного состава. Так, в нижней части диапазона рассматриваемых высот прослеживается систематическое завышение параметра $N[H^+]/N$, достигающее 5 %. При значительных относительных концентрациях лёгких ионов величина смещения растёт. Например, при $N[H^+]/N \approx 74$ % полученная оценка относительной концентрации ионов H^+ составила 94 %.

Наиболее значительные смещения характерны для оценок параметра $N[\text{He}^+]/N$. Так, при $N[\text{He}^+]/N \approx 21\%$ в присутствии значительного количества ионов H^+ ($N[\text{H}^+]/N \approx 74\%$) оценка параметра $N[\text{He}^+]/N$ составила всего 2%.

Более того, форма высотного профиля $N[\text{He}^+]/N$ может быть недопустимо сильно искажена: по результатам анализа виден ярко выраженный максимум $N[\text{He}^+]/N$ вблизи высоты 1000 км, тогда как в действительности во всем диапазоне рассматриваемых высот происходит плавное увеличение относительной концентрации ионов гелия.

С результатами моделирования хорошо согласуется картина, полученная при анализе экспериментальных данных. Измеренные АКФ НР сигнала усреднялись по высоте (значение p также было равно 11). Результаты решения обратной радиофизической задачи показаны на рис. 4.

Видно, что при больших значениях $N[\text{H}^+]/N$ появляются заметные смещения оценок параметра $N[\text{H}^+]/N$, а смещение оценок параметра $N[\text{He}^+]/N$ не просто недопустимо велико, но приводит к существенному искажению формы суточных вариаций $N[\text{He}^+]/N$, фактически не позволяя проводить наблюдения вариаций концентрации ионов He^+ в вечерние и ночные часы.

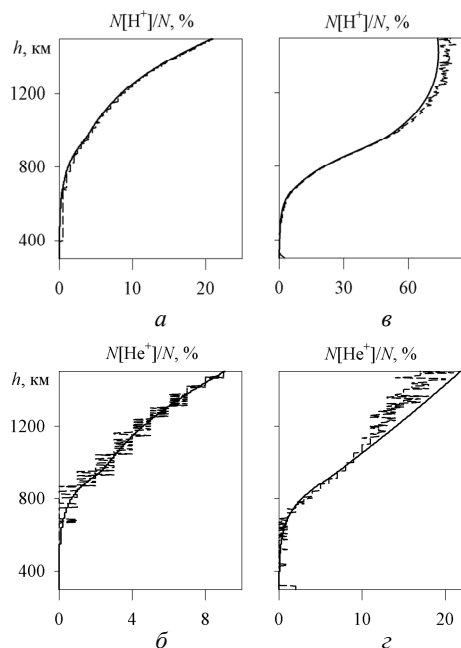


Рис. 2 – Модельные вариации параметров $N[\text{H}^+]/N$ и $N[\text{He}^+]/N$ (сплошная линия), использованные для синтеза вариаций АКФ с помощью ДФН с учётом высотного изменения параметров ионосферной плазмы, и результаты решения обратной радиофизической задачи, полученные без учёта высотных изменений параметров ионосферной плазмы при отсутствии дополнительного высотного усреднения АКФ (пунктир). a, b – вариации относительного содержания ионов H^+ ; b, z – вариации относительного содержания ионов He^+ .

Выводы. Впервые для харьковского радара НР оценены допустимые пределы дополнительного временного и высотного усреднения экспериментальных данных. Показано, что значение

интервала временного усреднения может достигать 1 ч и более. В то же время, устоявшееся мнение о допустимости существенного высотного усреднения для данных, полученных во внешней ионосфере, признано не соответствующим действительному положению вещей.

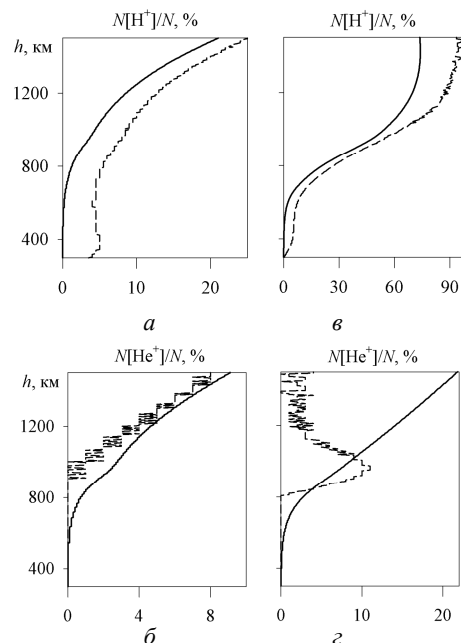


Рис. 3 – Модельные вариации параметров $N[\text{H}^+]/N$ и $N[\text{He}^+]/N$ (сплошная линия), использованные для синтеза вариаций АКФ с помощью ДФН с учётом высотного изменения параметров ионосферной плазмы при наличии дополнительного высотного усреднения АКФ (итоговая разрешающая способность 200 км), и результаты решения обратной радиофизической задачи, полученные без учёта высотных изменений параметров ионосферной плазмы (пунктир). a, b – вариации относительного содержания ионов H^+ ; b, z – вариации относительного содержания ионов He^+ .

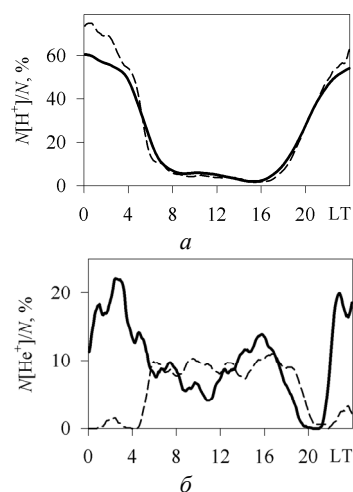


Рис. 4 – Результаты анализа данных харьковского радара НР при отсутствии дополнительного высотного усреднения АКФ (разрешающая способность около 100 км) (сплошная линия) и при использовании дополнительного высотного усреднения АКФ (итоговая разрешающая способность около 200 км) (пунктир). a – относительное содержание ионов H^+ , b – относительное содержание ионов He^+ .

В целом можно заключить, что при использовании простого длинного зондирующего радиоимпульса (длительностью 650 мкс и более, что соответствует высотному разрешению около 100 км и хуже) любое дополнительное высотное усреднение может привести к недопустимым искажениям высотно-временных вариаций таких параметров ионосферной плазмы как температуры ионов T_i и электронов T_e , а также относительные концентрации ионов водорода $M[\text{H}^+]/N$ и гелия $M[\text{He}^+]/N$.

Такое заключение заставило пересмотреть подходы к анализу данных харьковского радара НР.

Главным практическим результатом проведенных исследований стала отмена использования существенного (до 300 км) высотного усреднения даже при анализе данных радара выше максимума ионизации.

Вторым по важности результатом стала обособленная возможность расширения интервала временного усреднения данных (до 60 минут по сравнению с использовавшимся 15-минутным усреднением). Это позволяет до четырёх раз уменьшить дисперсию АКФ, используемых для расчёта оценок параметров ионосферной плазмы, а значит, снизить величину статистических погрешностей этих оценок.

Список литературы: 1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175. 2. Zhou Q. H., Q. N. Zhou, J. D. Mathews // Arithmetic average, geometric average, and ranking: Application to incoherent scatter radar data processing / Q. H. Zhou, Q. N. Zhou, J. D. Mathews // Radio Science. – 1999. – Vol. 34, № 5. – P. 1227–1237. 3. 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. 4. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37. 5. Holt J. M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J. M. Holt, D. A. Rhoda, D. Tetenbaum, A. P. Eyken // Radio Sci. – 1992. – V. 27. – № 3. – P. 435–447. 6. Hysell D. L. Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca / D. L. Hysell, F. S. Rodrigues, J. L. Chau, J. D. Huba // Ann. Geophys. – 2008. – № 26. – P. 59–75. 7. Сюсюк М. Н. Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк, Д. В. Котов, А. В. Богомаз // Вестник НТУ «ХПИ». Радиофизика и ионосфера. – Харьков. – 2011. – № 44 – С. 81–84.

Bibliography (transliterated): 1. Evans, Dzh. V. “Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom nekogerentnogo rassejaniya radiovoln.” *TIIEr*. 8.4 (1969): 139–175. Print. 2. Zhou, Q. H., Q. N. Zhou and J. D. Mathews. “Arithmetic average, geometric average, and ranking: Application to incoherent scatter radar data processing.” *Radio Science*. 34.5 (1999): 1227–1237. Print. 3. Bilitza, D., B. W. Reinisch. “International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters.” *Advances in Space Research*. 42.4 (2008): 599–609. Print. 4. Bogomaz, A. V., D. V. Kotov. “Paket programm novogo pokolenija dlja obrabotki dannyh radarov nekogerentnogo rassejaniya Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE).” *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta «Har'kovskij politehničeskij institut»*. Serija: «Radiofizika i ionosfera». 28.1001 (2013): 29–37. Print. 5. Holt, J. M., D. A. Rhoda, D. Tetenbaum and A. P. Eyken “Optimal analysis of incoherent scatter radar data.” *Radio Sci.* 27.3 (1992): 435–447. Print. 6. Hysell, D. L., F. S. Rodrigues, J. L. Chau and J. D. Huba. “Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca”. *Ann. Geophys.* 26 (2008): 59–75. Print. 7. Sjusjuk M. N., D. V. Kotov, A. V. Bogomaz. “Modelirovanie dvumernoj funkcii neopredelennosti radara nekogerentnogo rassejaniya” *Vestnik NTU «HPI»*. *Radiofizika i ionosfera*. 44 (2011): 81–84. Print.

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богомаз Олександр Вікторович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут іоносфери, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: albom85@yandex.ru.

Богомаз Александр Викторович – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт ионосферы, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: albom85@yandex.ru.

Bogomaz Oleksandr Viktorovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Research scientist, Institute of ionosphere, Kharkiv; tel.: (057) 707-65-27; e-mail: albom85@yandex.ru.

Котов Дмитро Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник, Інститут іоносфери, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com.

Котов Дмитрий Владимирович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт ионосферы, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com.

Kotov Dmytro Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Research scientist, Institute of ionosphere, Kharkiv; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: dmitrykotoff@gmail.com.