

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Серія: Радіофізика та іоносфера

№ 28 (1001) 2013

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ “ХПІ”, 2013

ISSN 2078-9998

Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 28 (1001). – 100 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Збірник виходить українською та російською мовами.

Вісник Національного технічного університету “ХПІ” внесено до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук”, затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (голова);
К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (секретар);
А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;
Є.Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В.Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В.В. Спифанов, канд. техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В.І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П.Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю.В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;
Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

Редакційна колегія серії:

Відповідальний редактор:

В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар:

М.В. Ляшенко, канд. фіз.-мат. наук

Члени редколегії: Д.А. Дзюбанов, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
Ф.В. Ківва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.С. Мазманішвілі, д-р фіз.-мат. наук, проф.;
Є.В. Рогожкін, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В.І. Таран, д-р фіз.-мат. наук, проф.;
Г.С. Хрипунов, д-р техн. наук, проф.; Л.Ф. Чорногор, д-р фіз.-мат. наук, проф.;
І.В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету “ХПІ”, серія “Радіофізика та іоносфера”, включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich’s Periodicals Directory (New Jersey, USA).

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ “ХПІ”,
протокол № 5 від 4 червня 2013 р.**

Т.Г. ЖИВОЛУП, канд. физ.-мат. наук, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СЛОЯ F2 В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО РАВНОДЕНСТВИЯ 2012 Г. ПО ДАННЫМ РАДАРОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ХАРЬКОВА И EISCAT

Проведены исследования временных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2, ионной и электронной температур в средних и высоких широтах в период весеннего равноденствия. Выявлены особенности временных вариаций параметров слоя F2 в Харькове и Тромсё в период весеннего равноденствия. Установлено, что в период весеннего равноденствия температура электронов в Тромсё больше, а температура ионов меньше, чем в Харькове на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00 UT.

Ключевые слова: весеннее равноденствие, временные вариации параметров слоя F2 в средних и высоких широтах.

Проведено дослідження часових варіацій електронної концентрації в максимумі шару F2, іонної та електронної температур в середніх і високих широтах в період весняного рівнодення. Виявлено особливості часових варіацій параметрів шару F2 в Харкові і Тромсьо в період весняного рівнодення. Встановлено, що в період весняного рівнодення температура електронів в Тромсьо більше, а температура іонів менше, ніж у Харкові на всьому часовому інтервалі спільних спостережень з 09:00 до 19:00 UT.

Ключові слова: весняне рівнодення, часові варіації параметрів шару F2 в середніх і високих широтах.

The investigations of temporal variations of the electron density in the F2-layer maximum, ion and electron temperatures in the mid-and high latitudes during the spring equinox are conducted. The features of the temporal variations of the parameters of the F2-layer in Kharkov and Tromsø during the spring equinox are revealed. Found that during the spring equinox, the electron temperature in Tromsø more, and the ion temperature is lower than in Kharkov on the whole time interval of joint observations from 09:00 to 19:00 UT.

Keywords: the spring equinox, the temporal variations of the parameters of the F2-layer in middle and high latitudes.

Постановка задачи. Радар некогерентного рассеяния (НР) в Харькове и радары обсерватория EISCAT образуют европейскую цепочку радаров НР, которая позволяет получать знания о структуре ионосферы на средних и высоких широтах, а также создавать современные ионосферные и термосферные модели. Проведение сравнительного анализа временных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2, ионной и электронной температур в средних и высоких широтах для спокойного периода в разные сезоны позволяет совершенствовать теорию области F2 и термосферы. Создание надежной теоретической модели области F2 ионосферы для средних и высоких широт, учитывающей различные гелиогеофизические условия, представляет интерес как для развития теории

© Т.Г. Живолуп, 2013

ионосферы, так и для решения прикладных задач распространения радиоволн.

Анализ литературы. Исследования области F2 по различным международным программам проводятся регулярно на различных широтах. В работе [1] приведены результаты исследования сезонных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2 ($n_{em}F2$) на разных широтах. Было отмечено, что в летние месяцы $n_{em}F2$ достигает максимальных значений в период захода Солнца. В работе [2] приведены результаты исследования температур электронов и ионов для летнего, зимнего и равноденственного сезонов на разных широтах и при различных уровнях солнечной активности. Было отмечено, что дневные значения электронной температуры превышают ее средние ночные значения в 2.8 – 4.6 раза при переходе от минимума солнечной активности к ее максимуму, а дневные значения ионной температуры – в 1.2 – 2.2 раза.

При сильной конвекции, высокоширотная область F2 ионосферы существенно изменяется в течение суток, как во время зимы, так и лета [3]. Как правило, концентрация электронов в области F2 гораздо больше изменяется с высотой зимой, чем летом. Высокая скорость конвекции вызывает заметные сезонные колебания ионного состава в области F2, что приводит к гораздо большей концентрации молекулярных ионов вблизи максимума области F2 летом по сравнению с зимой.

В [4] исследовались вариации $n_{em}F2$ с помощью 13 станций вертикального зондирования, расположенных на различных широтах. Было отмечено, что при средней солнечной активности (индекс $F_{10.7}$ был равен 140) стандартные изменения $n_{em}F2$ составляют 20% днем и 33% ночью. Были отмечены сезонные изменения $n_{em}F2$, особенно, увеличение $n_{em}F2$ в период равноденствия.

Цель статьи – выявление особенностей временных вариаций электронной концентрации в максимуме слоя F2, ионной и электронной температур в средних и высоких широтах в период весеннего равноденствия при умеренной солнечной активности.

Гелиогеофизическая обстановка 29 марта 2012 года. Измерения на радарх НР в Харькове и Тромсё проведены в период с 29 по 30 марта 2012 г. согласно Международному геофизическому календарю.

В рассматриваемый период индекс солнечной активности $F_{10.7}$ имел значения 112 и 111 (т.е. солнечная активность была умеренной). Планетарный суточный индекс геомагнитной активности A_p 29 и 30 марта имел значения 3 и 5, а трехчасовой планетарный K_p -индекс имел значения, не превышающие 2 (в основном от 0 до 1), т. е. этот период времени был абсолютно спокойным.

Вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 29 марта 2012 г. по данным радаров Харькова и Тромсё. Особый интерес в изучении области F2 представляют временные вариации концентрации

электронов n_{em} в максимуме слоя F2 в средних и высоких широтах в разные сезоны. На рис. 1 показано сравнение временных вариаций $\lg n_{em}F2$ на временном интервале 11:00 – 19:00 (здесь и далее время UT) по данным радаров в Харькове и Тромсё. в спокойные сутки 29 марта 2012 года. Как видно из рис. 1 временной ход $\lg n_{em}F2$ для Харькова имеет два ярко выраженных локальных максимума в 12 и 16 часов, как и временной ход $\lg n_{em}F2$ для Тромсё с локальными максимумами в 12:00 и 14:00. В Тромсё $n_{em}F2$ медленно монотонно убывает после 14:00 до 17:00, и после 17:00 наблюдается более быстрое убывание электронной концентрации в максимуме слоя F2. Над Харьковом $n_{em}F2$ монотонно убывает после 12:00 до локального минимума в 14:00, потом возрастает до второго локального максимума в 16:00 и далее монотонно убывает, причем, убывание $n_{em}F2$ в Харькове более медленное по сравнению с Тромсё.

Из рис. 1 видно, что значения $\lg n_{em}F2$ для Харькова превышают значения $\lg n_{em}F2$ для Тромсё на всем временном интервале совместных наблюдений с 11:00 до 19:00. Значение первого локального максимума $n_{em}F2$ для Харькова превышает значение первого локального максимума $n_{em}F2$ для Тромсё на 48%, а значение второго локального максимума $n_{em}F2$ – на 50%. Значение локального минимума $n_{em}F2$ для Харькова превышает значение локального минимума $n_{em}F2$ для Тромсё на 32%. В 19:00 $n_{em}F2$ в Харькове превышает $n_{em}F2$ в Тромсё в 2,6 раза.

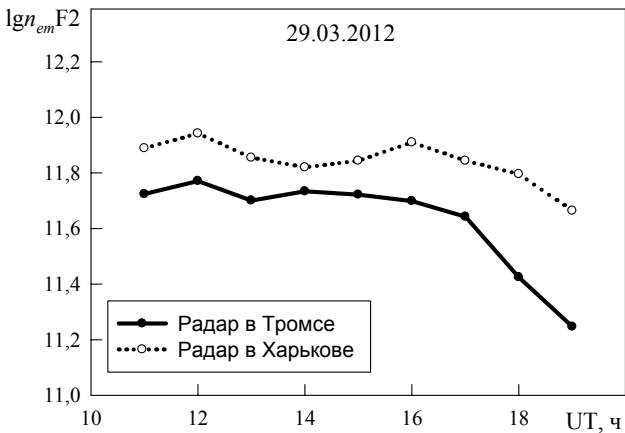


Рис. 1 – Временные вариации $\lg n_{em}F2$ по данным радаров в Харькове и Тромсё для 29.03.2012 г.

В Харькове после захода Солнца в 16:05 наблюдается монотонное уменьшение $n_{em}F2$, а в 16:00 – предзаходный максимум $n_{em}F2$. В Тромсё

наблюдается медленное монотонное уменьшение $n_{em}F2$ с 15:00 до 17:00, и после захода Солнца в 17:46 в Тромсё наблюдается более быстрое уменьшение $n_{em}F2$ по сравнению с вариациями $n_{em}F2$ после захода Солнца в Харькове. Следует отметить, что предзаходный максимум $n_{em}F2$ в Тромсё не наблюдается.

Таким образом, в период весеннего равноденствия $n_{em}F2$ в Харькове превышает $n_{em}F2$ в Тромсё на всем рассматриваемом временном интервале совместных наблюдений с 11:00 до 19:00. В Тромсё не наблюдается предзаходный максимум $n_{em}F2$, который наблюдается в Харькове. После захода Солнца в Тромсё наблюдается более быстрое уменьшение $n_{em}F2$ по сравнению с уменьшением $n_{em}F2$ после захода Солнца в Харькове.

Вариации температуры электронов 29 марта 2012 г. по данным радаров в Харькове и Тромсё. Вариации температуры электронов T_e 29 марта 2012 г. на высотах 342 и 344 км в Харькове и Тромсё показаны на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что температура электронов T_e в ионосфере над Тромсё больше температуры электронов в ионосфере над Харьковом на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00. Температура электронов в ионосфере над Харьковом, начиная с 09:00, плавно возрастает до своего максимального значения – 2345 К в 14:00.

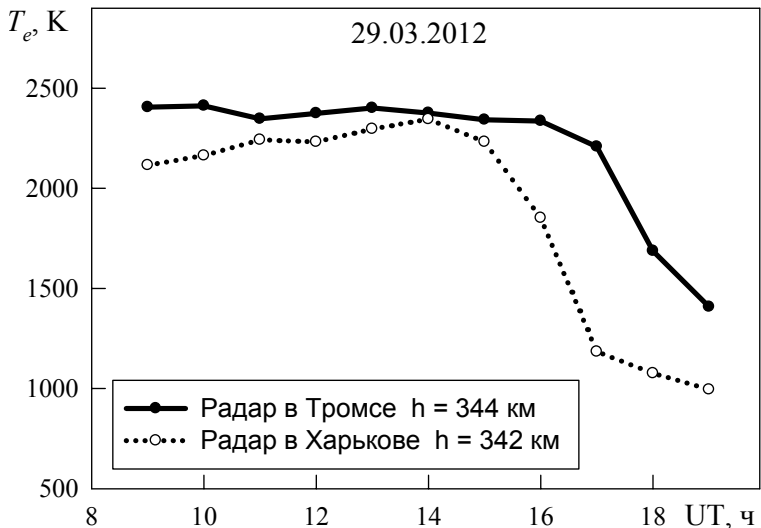


Рис. 2 – Временные вариации T_e по данным радаров в Харькове и Тромсё для 29.03.2012 г.

После 14:00 с заходом Солнца в магнитосопряженной с Харьковом точке (о. Мадагаскар) в 14:50 температура электронов плавно уменьшается, и с заходом Солнца в Харькове в 16:05 наблюдается более быстрое уменьшение T_e до ее минимального значения 995 К, которое она принимает в 19:00. Амплитуда изменения T_e , т.е. разность между максимальной и минимальной температурами электронов в ионосфере над Харьковом составляет 1350 К.

В ионосфере над Тромсё температура электронов возрастает до своего первого локального максимума 2412 К в 10:00, а второй локальный максимум T_e – 2401 К наблюдается в 13:00. После этого температура электронов плавно уменьшается до значения 2208 К, которое она принимает в 17:00, и с заходом Солнца в 17:46 T_e быстро уменьшается до значения 1408 К, которое она принимает в 19:00. Амплитуда изменения T_e в ионосфере над Тромсё составляет 1004 К, т.е. в ионосфере над Тромсё амплитуда изменения температуры электронов на временном интервале 09:00 – 19:00 в 1.34 раза меньше, чем в ионосфере над Харьковом. Температура электронов в ионосфере над Тромсё превышает температуру электронов в ионосфере над Харьковом: в интервале 09:00 – 14:00 – на 31– 290 К, в интервале 14:00 – 16:00 – на 31 – 484 К и в интервале 17:00 – 19:00 – на 1024 – 413 К.

Таким образом, в период весеннего равноденствия температура электронов в ионосфере над Тромсё превышает температуру электронов в ионосфере над Харьковом на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00. Температура электронов в ионосфере над Харьковом имеет явно выраженный максимум в 14:00 и начинает быстро убывать после захода Солнца в магнитосопряженной точке в 14:50. В ионосфере над Тромсё быстрое убывание температуры электронов наблюдается только после захода Солнца в Тромсё в 17:46. В ионосфере над Тромсё амплитуда изменения температуры электронов на временном интервале 09:00 – 19:00 в 1.34 раза меньше, чем в ионосфере над Харьковом. Это объясняется тем, что в Тромсё на высотах 300 км и более 29 марта 2012 г. Солнце не заходит, и на этих высотах господствует полярный день.

Вариации температуры ионов 29 марта 2012 г. по данным радаров в Харькове и Тромсё. Вариации температуры ионов T_i 29 марта 2012 г. на высотах 342 и 344 км в Харькове и Тромсё показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что температура ионов в ионосфере над Харьковом больше температуры ионов в ионосфере над Тромсё на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00.

В ионосфере над Харьковом температура ионов T_i имеет два локальных максимума в 10:00 и 14:00 и локальный минимум – в 12:00. После 14:00 температура ионов медленно убывает и после захода Солнца в Харькове в 16:05 температура ионов быстро убывает до значения 995 К, которое она принимает в 19:00. Амплитуда изменения T_i , т.е. разность между максимальной и минимальной температурами ионов в ионосфере над

Харьковом составляет 204 К.

В ионосфере над Тромсё температура ионов имеет два локальных максимума в 10:00 и 13:00 и локальный минимум – в 12:00. После 13:00 температура ионов медленно убывает до 17:00 и после захода Солнца в Тромсё в 17:46 температура ионов быстро убывает до значения 913 К, которое она принимает в 19:00. Амплитуда изменения T_i в ионосфере над Тромсё составляет 260 К, т.е. на 56 К больше, чем в ионосфере над Харьковом.

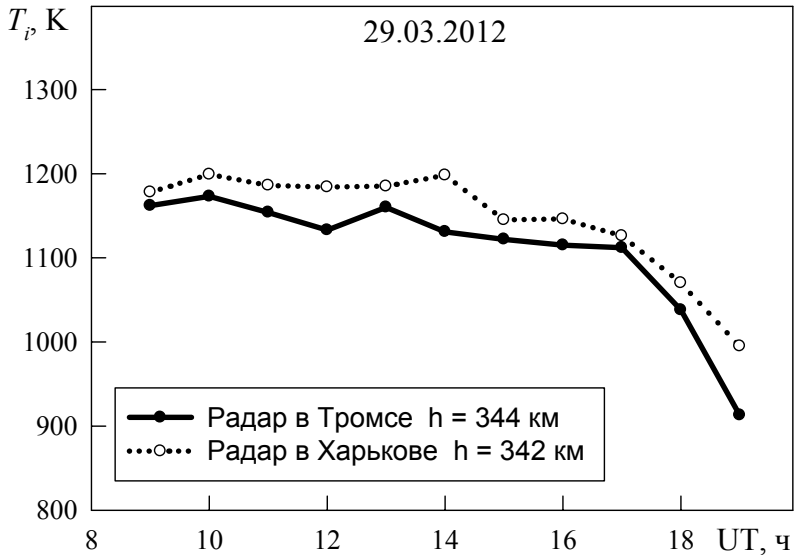


Рис. 3 – Временные вариации T_i по данным радаров в Харькове и Тромсё для 29.03.2012 г.

Температура ионов в ионосфере над Харьковом превышает температуру ионов в ионосфере над Тромсё: в интервале 09:00 – 14:00 – на 12 – 67 К и в интервале 15:00 – 19:00 – на 14 – 82 К.

Таким образом, в период весеннего равноденствия температура ионов в ионосфере над Харьковом превышает температуру ионов в ионосфере над Тромсё на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00. После захода Солнца в Харькове и Тромсё температура ионов в ионосфере быстро убывает до своего минимального значения. Амплитуда изменения T_i с 09:00 до 19:00 в ионосфере над Тромсё на 56 К больше, чем амплитуда изменения T_i в ионосфере над Харьковом.

Выводы. 1. В период весеннего равноденствия $n_{em}F2$ в Харькове превышает $n_{em}F2$ в Тромсё на всем временном интервале совместных наблюдений с 11:00 до 19:00.

2. В Тромсё не наблюдается предзаходный максимум $n_{em}F2$, который наблюдается в суточных вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы над Харьковом.

3. После захода Солнца в Тромсё наблюдается более быстрое уменьшение $n_{em}F2$ по сравнению с уменьшением $n_{em}F2$ после захода Солнца в Харькове.

4. В период весеннего равноденствия температура электронов в ионосфере над Тромсё превышает температуру электронов в ионосфере над Харьковом на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00.

5. В период весеннего равноденствия температура ионов в ионосфере над Харьковом превышает температуру ионов в ионосфере над Тромсё на всем временном интервале совместных наблюдений с 09:00 до 19:00.

6. Температура электронов в ионосфере над Харьковом начинает быстро убывать после захода Солнца в магнитосопряженной точке в 14:50, тогда как в Тромсё быстрое убывание температуры электронов наблюдается только после захода Солнца в 17:46. После захода Солнца в Харькове и Тромсё температура ионов в ионосфере быстро убывает до своего минимального значения.

Список литературы. 1. *Sardar N., Singh A.K., Nagar A., Mishra S.D., Vijay S.K.* Study of latitudinal variation of ionospheric parameters – A Detailed Report // J. Ind. Geophys. Union. – 2012. – Vol. 23, № 1. – P. 113-133. 2. *Sharma D.K., Sharma P.K., Rai J., Garg S.C.* Effect of solar activity on ionospheric temperatures in F2 region // Ind. J. Radio Space Phys. – 2008. – Vol. 37. – P. 319-325. 3. *Sojka J.J., Schunk R.W., Raitt W.J.* Seasonal variations of the high-latitude F region for strong convection // J. Geoph. Res. – 1982. – Vol. 87, № A1. – P. 187-198. 4. *Rishbeth H., Mendillo M.* Patterns of F2-layer variability // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2001. – Vol. 63. – P. 1661-1680.

Поступила в редколлегию 01.04.2013

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

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

М.Н. СЮСЮК, вед. инж.-электроник, Институт ионосферы, Харьков

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОЛУЧАЕМЫХ ОЦЕНОК КОНЦЕНТРАЦИИ ТЯЖЁЛЫХ ИОНОВ К НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМ ЗАДАВАЕМЫХ ТЕМПЕРАТУР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МЕТОДЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В результате моделирования решения обратной радиофизической задачи были оценены погрешности измерения относительной концентрации тяжёлых ионов, а также температур ионов и электронов. Сделаны выводы о характере смещения результатов расчёта параметров ионосферной плазмы при разных начальных условиях.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, обратная задача, оценивание параметров, погрешности измерения.

В результаті моделювання розв'язання зворотної радіофізичної задачі було оцінено похибки вимірювань відносної концентрації важких іонів, а також температур іонів та електронів. Зроблено висновки про характер зміщення результатів розрахунку параметрів іоносферної плазми за різних початкових умов.

Ключові слова: некогерентне розсіяння, зворотна задача, оцінювання параметрів, похибки вимірювань.

As a result of simulation of the inverse problem errors of the measurement of molecular ions fraction and ion and electron temperatures were estimated. The conclusions about character of bias of the ionosphere plasma parameters under different initial conditions were made.

Keywords: incoherent scatter, inverse problem, parameters estimation, errors of measurement.

Введение. При определении параметров ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния (НР) на высотах средней ионосферы из-за возникающих при решении обратной радиофизической задачи неоднозначностей невозможно точно определить температуры ионов и электронов, не зная ионного состава плазмы, или определить ионный состав, не зная значений температур. Таким образом, возникает вопрос, насколько изменяется решение обратной задачи при внесении известной неопределённости в значение задаваемого параметра.

Цель статьи – рассмотрение полученных для диапазона высот, соответствующего средней ионосфере, погрешностей решения обратной задачи, а также обсуждение преимуществ и недостатков методов оценки параметров с использованием фиксированных значений температур либо фиксированного ионного состава.

Алгоритм моделирования. Ионный состав на высотах средней

ионосферы является многокомпонентным. В плазме присутствуют три основных типа ионов – NO^+ , O_2^+ и O^+ . Метод НР не позволяет различить ионы NO^+ и O_2^+ в силу малого различия их масс. Поэтому, с точки зрения процесса исследования ионосферы методом НР, можно считать, что в плазме присутствуют два типа ионов – ионы атомарного кислорода O^+ и тяжёлые молекулярные ионы M^+ (их концентрация равна сумме концентраций ионов NO^+ и O_2^+) [1, 2].

Для проведения запланированного моделирования был разработан пакет программ и рассчитаны библиотеки теоретических автокорреляционных функций (АКФ) для оценивания параметров ионосферной плазмы в диапазоне средних высот.

При моделировании решения обратной задачи использовались два подхода. В первом случае задавались значения температур ионов T_i и электронов T_e , и производился расчёт концентрации тяжёлых ионов в ионосферной плазме при небольших изменениях значений температуры относительно заданных. Во втором случае, задаваясь относительной концентрацией ионов атомарного кислорода $N(\text{O}^+)/N$, рассчитывались температуры ионов и электронов при наличии неопределённостей в ионном составе.

На рисунках приведены примеры результатов моделирования для заданных значений температур ионов и электронов $T_i = T_e = 800 \text{ K}$ и относительных концентраций ионов атомарного кислорода в диапазоне 10 – 90 % (с шагом 10 % по параметру $N(\text{O}^+)/N$). Концентрация тяжёлых ионов при этом была равна $N(\text{M}^+)/N = 100 - N(\text{O}^+)/N$, %.

При определении значений параметров плазмы шаг по концентрации ионов составлял 1 %, шаг по температурам – 5 К.

Рассмотрим оба случая подробно.

Заданный ионный состав. При моделировании были получены результаты для решений обратной задачи в условиях отклонения ионного состава от –10 % до 10 % от исходного значения. Рассчитанные значения температур ионов и электронов приведены на рис. 1.

Заданные температуры ионов и электронов. При моделировании были получены результаты для перебора решений обратной задачи в условиях отклонения температур ионов и электронов от –50 К до 50 К от заданного значения. Рассчитанные значения концентрации тяжёлых ионов и абсолютные погрешности их определения показаны на рис. 2.

Выводы. Анализ результатов проведенного моделирования позволяет сделать следующие выводы.

Для эксперимента с задаваемым ионным составом:

1) Погрешность определения температуры ионов уменьшается при уменьшении относительного содержания тяжёлых ионов, в то время как погрешность определения температуры электронов растёт.

2) Величина абсолютной погрешности определения температуры ионов лежит в пределах от -90 К до 120 К, а погрешность температуры электронов – от -60 К до 60 К (при величине ошибки задаваемого относительного содержания тяжёлых ионов от -10% до 10%).

3) Абсолютная погрешность определения температур практически симметрична относительно истинного значения концентрации ионов и для одинаковых по модулю, но противоположных по знаку ошибок задаваемого относительного содержания тяжёлых ионов также имеет разные знаки.

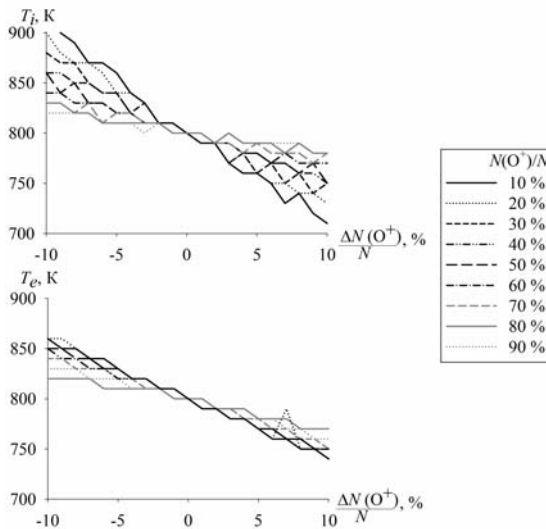


Рис. 1 – Оценки температур ионов и электронов при внесении неопределённости в значение задаваемого ионного состава

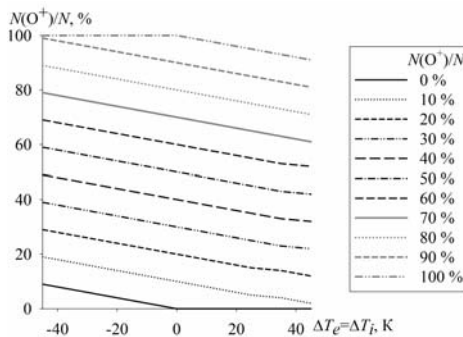


Рис. 2 – Оценки концентрации ионов кислорода при внесении неопределённости в значения задаваемых температур

Для эксперимента с задаваемыми температурами ионов и электронов:

1) Относительная погрешность определения концентрации тяжёлых ионов практически не зависит от их абсолютного значения.

2) Величина абсолютной погрешности определения относительного содержания тяжёлых ионов лежит в пределах от -10% до 10% при величине ошибки задаваемых температур от -50 К до 50 К .

3) Абсолютная погрешность определения концентрации тяжёлых ионов практически симметрична относительно истинного значения температур ионов и электронов и для одинаковых по модулю, но противоположных по знаку ошибок задаваемого значения температур также имеет разные знаки.

Общий вывод по двум экспериментам следующей. Величины погрешностей практически равноценны. Это значит, что при оценивании температур можно задаваться, как ионным составом, так и температурами ионов и электронов. Поиск температур ионов и электронов при заданном ионном составе широко используется при обработке данных НР высокоширотной ионосферы [3–4]. Однако, это неприменимо для данных, получаемых на радаре НР Института ионосферы из-за отсутствия надёжной проверенной модели ионного состава для среднеширотной ионосферы. В то же время температуры в максимуме ионизации (где плазму можно считать однокомпонентной, т.е. представленной только лишь ионами атомарного кислорода) можно определить достаточно точно. Кроме того, температуры ионов и электронов внизу области средней ионосферы приблизительно равны температуре нейтральных частиц атмосферы [3]. Существующие модели атмосферы (например, модель MSIS) дают достаточно точные значения температур нейтралов [5–6], поэтому можно считать, что температуры ионов и электронов в нижней области ионосферы также известны.

Из вышеприведенных исследований следует, что определение ионного состава средней ионосферы с использованием задаваемых значений температур ионов и электронов является не только целесообразным, но и вполне оправданным подходом.

Список литературы: 1. Данилов А.Д. Популярная аэрономия / А.Д. Данилов // Л.: Гидрометеоиздат, 1989. – 230 с. 2. Брюнелли Б.Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе // М.: Наука, 1988. – 528 с. 3. Радклифф Дж. Введение в физику ионосферы и магнитосферы / Дж. Радклифф // М.: Мир, 1975. – 278 с. 4. Эванс Дж.В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж.В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139-175. 5. Bilitza D., International Reference Ionosphere 2000 / D. Bilitza // Radio Science. – 2001. – № 2. – P. 261-275. 6. International Reference Ionosphere [Электронный ресурс] / NASA Official: Dr. Robert McGuire. – URL: <http://iri.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 01.04.2013).

Поступила в редколлегию 01.04.2013

Я.Н. ЧЕПУРНЫЙ, гл. инж., Институт ионосферы, Харьков;
Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт
ионосферы, Харьков;
Д.А. ИСКРА, вед. инж.-электроник, Институт ионосферы, Харьков

ИЗМЕРЕНИЕ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ НДА-100 ПО ОТРАЖЕНИЯМ ОТ ТЕХНОГЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Предложена методика измерения диаграммы направленности неподвижной антенны радара некогерентного рассеяния по отражениям от каталогизированных техногенных космических объектов. Преимуществом предлагаемой методики является возможность измерения различных сечений трёхмерной диаграммы направленности. Приведены полученные экспериментальные результаты.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, методики измерения диаграммы направленности антенны, отражения от каталогизированных техногенных космических объектов.

Запропоновано методику вимірювання діаграми спрямованості нерухомої антени радара некогерентного розсіяння за відбиттями від каталогізованих техногенних космічних об'єктів. Перевагою запропонованої методики є можливість вимірювання різних перетинів тривимірної діаграми спрямованості. Наведено отримані експериментальні результати.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, методики вимірювання діаграми спрямованості антени, відбиття від каталогізованих техногенних космічних об'єктів.

The technique of measurement of the incoherent scatter radar fixed antenna pattern using reflections from the cataloged man-made space objects is proposed. The advantage of the proposed technique is the ability to measure different cross sections of the three-dimensional antenna pattern. The experimental results are presented.

Keywords: incoherent scatter radar, techniques of antenna pattern measurement, reflections from the cataloged man-made space objects.

Введение. Антенны радаров некогерентного рассеяния (НР) характеризуются высокой направленностью, большой эффективной площадью и, как правило, значительными габаритами. В метровом диапазоне радиоволн диаметр рефлектора зеркальных антенн составляет от 25 до 100 метров и более. Измерение экспериментальных характеристик таких антенн является сложной задачей, если антенна неподвижна и конструкцией не предусмотрена возможность отклонения её диаграммы направленности (ДН). В этом случае используется либо очень дорогостоящий метод облёта ДН специально оборудованным самолетом, либо радиоастрономический метод, основанный на наблюдении прохождения через ДН антенны внеземных радиисточников (Кассиопея А, Лебедь А и др.). В последнем

© Я.Н. Чепурный, Л.Я. Емельянов, Д.А. Искра, 2013

случае может быть получено одно сечение ДН – в плоскости географической параллели.

Используется также косвенный метод определения ДН – по измеренным токам на поверхности зеркала [1]. Метод измерения ДН на уменьшенных масштабных моделях применяется, как правило, на этапе разработки антенны и не учитывает технического состояния реальной антенны.

Известны случаи, когда неподвижные антенны радаров НР специально проектировались с наклонным расположением ДН – в направлении, соответствующем прохождению определенного радиоисточника через географический меридиан в месте расположения антенны. Так, первая антенна Харьковского радара НР НПА-30 имела отклонение ДН от зенита на 9° к северу (направление на Кассиопею А). Известная 67-метровая антенна радара НР в Миллстон-Хилле имеет отклонение ДН от зенита на 2° . Учитывая географическую широту расположения радара, легко определить, что она направлена на радиоисточник Лебедь А.

Антенна харьковского радара НР НДА-100 является неподвижной двухзеркальной антенной с ДН, ориентированной в зенит. Диаметр её главного зеркала составляет 100 м и при рабочей длине волны 1.9 м расстояние дальней зоны (минимальная высота самолета при облёте) составляет более 10 км. При строительстве НДА-100 планировалось измерение её ДН с помощью облёта, однако по различным причинам это сделано не было. В настоящее время применение метода облёта ДН является экономически неоправданным.

Применение радиоастрономического метода в данном случае также затруднено. Наиболее близким к зениту (на географической широте радара) является радиоисточник 147^b по Третьему Кембриджскому каталогу [2]. Отклонение радиоисточника от зенита составляет 0.15° , что является заметным при ширине ДН антенны около 1° . Кроме того, этот источник на два порядка слабее, чем Кассиопея А или Лебедь А, что не позволяет оценить уровень боковых лепестков ДН.

Между тем, в процессе проведения измерений ионосферных параметров на радаре НР периодически наблюдаются отражения от объектов космического мусора и действующих искусственных спутников Земли, находящихся на низких околоземных орбитах (НОО). Часть из них каталогизирована, и для таких космических объектов (КО) заранее могут быть определены время и направление пересечения ДН антенны радара НР, в том числе, через максимум её главного лепестка.

Цель статьи – оценка возможности использования отражений от техногенных космических объектов для измерения ДН антенны радара НР и определения её основных технических характеристик.

Методика проведения измерений ДН по отражениям от КО.

Возможность реализации рассматриваемой методики появилась после внедрения на радаре НР оцифровки принятых сигналов на протяжении множества радиолокационных развёрток дальности в режиме реального времени с последующей записью. При частоте повторения зондирующих импульсов 24.4 Гц за время пролета объекта, в зависимости от высоты его орбиты, фиксируется от 70 до 800 отсчетов напряжения отражённого сигнала, что обеспечивает достаточную угловую точность определения ДН.

Для радара НР с ориентированной в зенит антенной НДА-100 предлагаемая методика включает в себя следующую последовательность действий:

- 1) определение точных географических координат антенны;
- 2) определение по каталогу космических объектов, проходящих за период проведения ионосферных измерений через зенит относительно центра антенны;
- 3) определение по каталогу точного расстояния до объекта в момент прохождения зенита;
- 4) наблюдение и запись прохождения КО через ДН антенны или анализ сеансов ионосферных измерений за дату и время, соответствующие расчётному времени отражения от объекта;
- 5) пересчёт времени наблюдения отражений от конкретного КО в угловые характеристики ДН;
- 6) построение измеренного сечения ДН в плоскости орбиты КО.

Определение географических координат антенны может быть проведено на основе общедоступных карт и космических снимков местности с точностью не хуже 0.00001° .

В настоящее время существуют достаточно подробные каталоги КО, позволяющие определить с точностью до секунды время их прохождения через ДН, направление движения и дальность до объекта в момент пролета над антенной [3]. По каталогу выбираются объекты, пересекающие ДН антенны через максимум её главного лепестка. При этом известными являются время пролета и высота орбиты h объекта в момент пересечения ДН. Зная высоту орбиты, можно определить скорость объекта V и период его обращения T вокруг Земли в предположении невозмущенной круговой орбиты [4]:

$$V = \sqrt{\frac{\mu_0}{R}}, \quad (1)$$

$$T = 2\pi R/V, \quad (2)$$

где $\mu_0 = 3.98602 \times 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ – гравитационный параметр Земли, R – радиус орбиты объекта, отсчитываемый от центра Земли.

Далее из соотношения наблюдаемого времени пролета объекта $t_{\text{пр}}$ через

ДН и периода обращения T можно определить центральный угол α , показанный на рис. 1

$$\alpha = \frac{t_{\text{пр}}}{T} 360^\circ. \quad (3)$$

Из геометрических соотношений (см. рис. 1) можно найти угол ДН 2θ ($\angle BAC$), связанный с центральным углом α

$$2\theta = 2\text{arctg}\left(\frac{R_3 + h}{h} \text{tg} \frac{\alpha}{2}\right), \quad (4)$$

где: $h = AM$ – высота орбиты космического объекта над поверхностью Земли,
 $R_3 = 6371$ км – радиус Земли.

Указанным способом время наблюдения пересчитывается в угол ДН.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 схематически представлена ориентация конструкции антенны НДА-100 относительно географических параллели и меридиана, а также нанесены траектории нескольких объектов, пересекавших ДН антенны в период ионосферных измерений 18 декабря 2012 г. и 20 марта 2013 г.

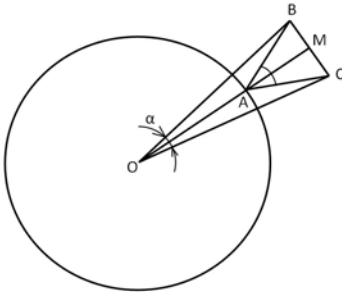


Рис. 1 – К определению центрального угла α

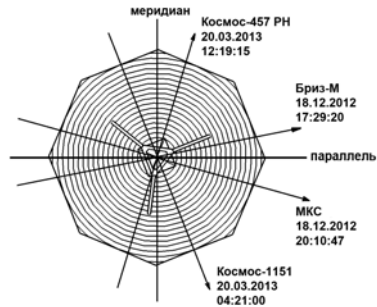


Рис. 2 – Ориентация антенны НДА-100 и траектории некоторых космических объектов

Сигналы отражений от КО проходят через антенно-фидерный тракт дважды – первый раз на передачу, второй – на приём. Поэтому, приведенные на рис. 3–6 зависимости соответствуют ДН антенны по мощности.

На рис. 3 приведена ДН в области главного и первого боковых лепестков, полученная по отражениям от спутника “Космос-1151”. Поскольку мощность отражений от КО превышает мощность НР-сигнала на порядок и более, в большинстве случаев происходит его ограничение аналого-цифровым преобразователем (АЦП) аппаратуры обработки. Для

исключения ограничения в специально выделенный канал радиоприёмного устройства был введен дополнительный аттенюатор. Боковые лепестки ДН хорошо прослеживаются по основному каналу, работающему без аттенюатора. Результаты их наблюдения представлены на рис. 4.

Ширина главного лепестка ДН по уровню -3 дБ составила 1.3° , по нулевому уровню -3.2° , максимальный уровень 1-го бокового лепестка равен -13.1 дБ.

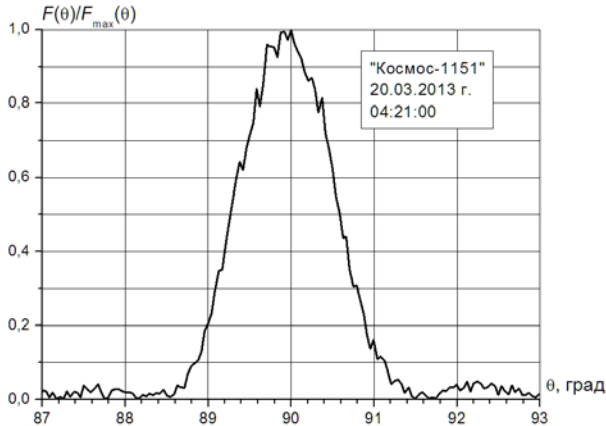


Рис. 3 – Сечение ДН антенны НДА-100 плоскостью $\varphi = 352^\circ$, измеренное по отражениям от спутника “Космос-1151” (канал с аттенюатором)

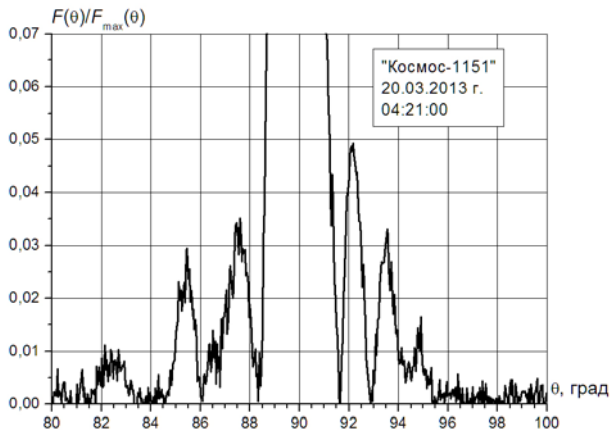


Рис. 4 – Сечение ДН антенны НДА-100 плоскостью $\varphi = 352^\circ$, измеренное по отражениям от спутника “Космос-1151” (канал без аттенюатора)

На рис. 5 и 6 приведены результаты наблюдения пролета ракеты-носителя (РН) спутника “Космос-457” через ДН антенны НДА-100.

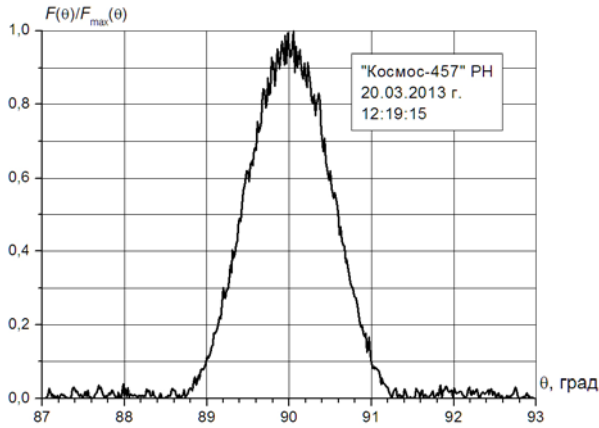


Рис. 5 – Сечение ДН антенны НДА-100 плоскостью $\varphi = 203^\circ$, измеренное по отражениям от РН спутника “Космос-457” (канал с аттенюатором)

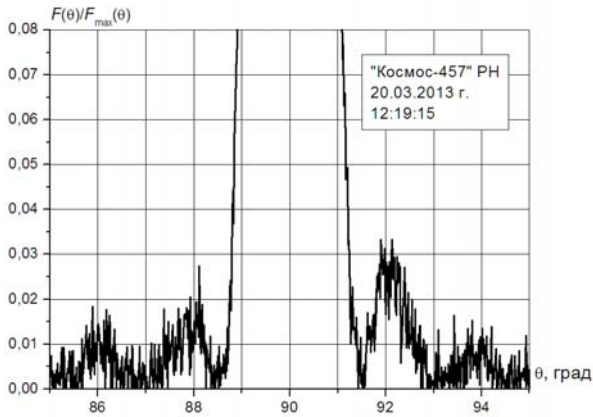


Рис. 6 – Сечение ДН антенны НДА-100 плоскостью $\varphi = 203^\circ$, измеренное по отражениям от РН спутника “Космос-457” (канал без аттенюатора)

Измеренная ширина главного лепестка ДН по уровню -3 дБ в этом случае составила 1.2° , по уровню первых нулей -3° , уровень 1-го бокового лепестка равен -14.8 дБ.

Следует отметить, что в момент пересечения ДН антенны высота спутника “Космос-1151” составляла 432 км, а РН спутника “Космос-457” –

1191 км. В последнем случае отражённый сигнал был значительно слабее и в области боковых лепестков лишь немного превышал шумы системы. Тем не менее, полученные экспериментальные результаты дают представление о форме главного и первых боковых лепестков ДН антенны НДА-100.

Выводы. Предложенная методика позволяет проводить измерения ДН антенны радара НР одновременно с определением ионосферных параметров. Достоинством предлагаемой методики является возможность измерения различных сечений трёхмерной ДН. При этом плоскость сечения ДН определяется траекторией космического объекта в момент его пролета над антенной.

Список литературы: 1. *Гукасов Ю.Г., Ивченко В.Н.* Измерение диаграмм направленности антенны НДА-100 по токам на поверхности зеркала // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1979. – № 155, вып. 1. – С. 29-33. 2. *Краус Дж.Д.* Радиоастрономия. Пер. с англ. под ред. *Железнякова В.В.* – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с. 3. The DNA Ancestry Project [Электронный ресурс] / Developed and maintained by Chris Peat, Heavens-Above GmbH. – URL: <http://www.heavens-above.com> (дата обращения: 02.04.2013). 4. Инженерный справочник по космической технике. Изд. 2-е, перераб. и доп. Под ред. *А.В. Соловьева.* – М.: Воениздат, 1977. – 430 с.

Поступила в редколлегию 02.04.2013

А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
Н.А. ПИДРУЧНАЯ, бакалавр, студент, НТУ “ХПИ”;
В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. директора, Институт
ионосферы, Харьков

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НР С УЧЕТОМ ШИРИНЫ СПЕКТРА ЗОНДИРУЮЩЕГО ИМПУЛЬСА

Анализируется влияние спектра зондирующего радиоимпульса на точность расчёта параметров ионосферы в методе некогерентного рассеяния радиоволн.

Ключевые слова: метод некогерентного рассеяния, спектр импульса, параметры ионосферы.

Аналізується вплив спектру зондувального радіоімпульсу на точність розрахунку параметрів іоносфери у методі некогерентного розсіяння радіохвиль.

Ключові слова: метод некогерентного розсіяння, спектр імпульсу, параметри іоносфери.

The influence of the spectrum of the probe pulse on the accuracy of calculation of ionospheric parameters for the method of incoherent scattering of radio waves is analyzed.

Keywords: incoherent scatter method, pulse spectrum, parameters of ionosphere.

Постановка задачи. Метод некогерентного рассеяния (НР) охватывает широкий набор подходов и процедур, среди которых важная роль отводится статистическому анализу сигнала рассеяния. С их помощью также производится расчет параметров, определяемых локальными свойствами распределенной в пространстве ионосферной плазмы, изменяемой в зависимости от процессов в околоземном космическом пространстве. Для обеспечения максимальной степени достоверности этих процедур необходимо, чтобы они в полной мере учитывали особенности режима зондирования ионосферы.

Цель работы – модификация процедур расчёта ионосферных параметров с учетом ширины спектра зондирующего сигнала для случая импульсного режима излучения радара НР.

Анализ литературы. В случае использования радара НР как моностатической системы точность расчета параметров зависит от характеристик импульсного сигнала [1, 2]. Режимы же излучения этого сигнала определяются [2] высотнo-временными характеристиками рассеяния. Так как имеют место противоречивые требования, предъявляемые [3, 4] к зондирующему импульсу для обеспечения им достаточной разрешающей способности, необходимо дальнейшее усовершенствование процедур учета его статистических характеристик. В [5] приведен пример подобного анализа, показавшего, насколько от характеристик зондирующего сигнала зависит

© А.В. Богомаз, Н.А. Пидручная, В.А. Пуляев, 2013

спектр сигнала НР, а также какие погрешности в процессе последующего расчета ионосферных параметров в результате этого могут возникать. В целом выяснено, что влияние зондирующего импульса состоит в расширении спектра сигнала рассеяния в зависимости от высоты от 4 % до 18 %.

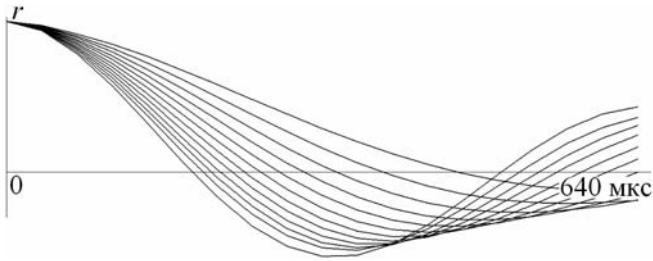


Рис. 1 – Модельные АКФ

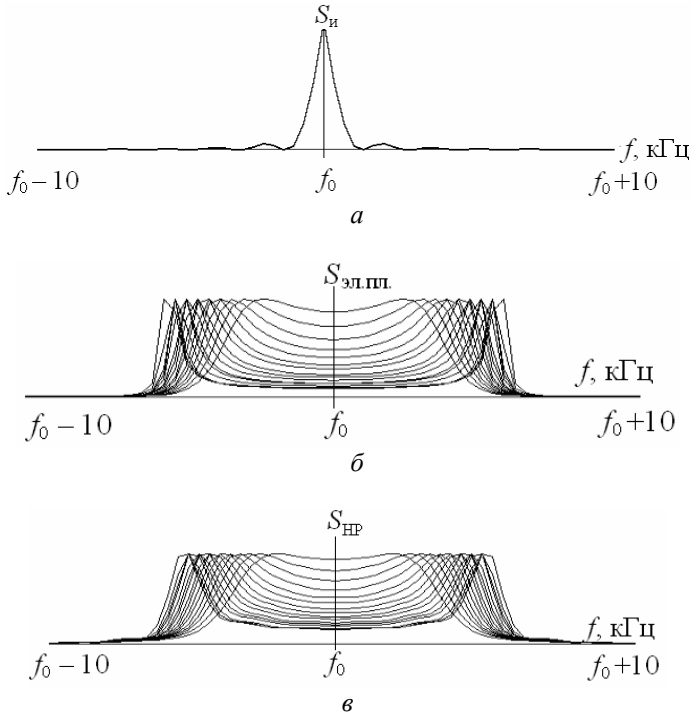


Рис. 2 – Спектры импульса и сигнала рассеяния: *а* – зондирующего импульса; *б* – флуктуаций электронной плотности; *в* – рассеянного сигнала

Результаты исследований. В процессе исследований производилась модификация теоретических (библиотечных) корреляционных функций (рис. 1), которые с привлечением решений прямой задачи рассчитывались из спектров рассеяния вида рис. 2 в. Для формирования же данных спектров рассеяния была реализована свёртка спектральных характеристик зондирующего импульса (рис. 2 а) со спектральными характеристиками флуктуаций электронной плотности в плазме (рис. 2 б).

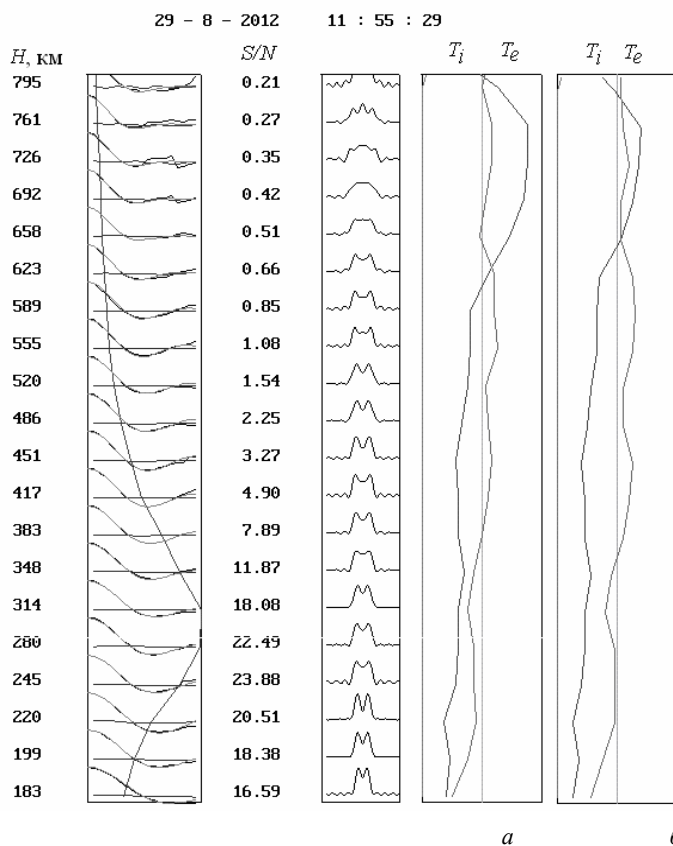


Рис. 3 – Результаты расчета ионосферных параметров: *a* – без учёта зондирующего импульса; *б* – с учётом зондирующего импульса

С целью проверки действенности процедуры модификации библиотеки с ее помощью были реализованы два варианта расчета кинетических температур ионосферной плазмы по высотному распределению корреляционных функций сигнала НР, полученных 29 августа 2012 г. в

одном из сеансов измерений длительностью 1 мин (рис. 3). В первом варианте (а) производился расчет с использованием немодифицированных библиотечных функций, а во втором (б) – после их уточнения.

Примечание. Уточнение корреляционных функций производилось для случая использования зондирующего импульса, огибающая которого имела прямоугольную форму и протяженность примерно 660 мкс. Период следования импульсов был принят 25 Гц.

На примере расчета параметров в данном сеансе измерений, отражающем состояние дневной спокойной ионосферы, можно наблюдать общую тенденцию, имеющую место при обработке и сравнении результатов любых других сеансов с помощью немодифицированных библиотечных функций – получение заниженных отношений температур при одновременном увеличении значений абсолютных показателей, в основном, температур ионов.

В целом тщательный анализ показывает следующее. Ширина спектра зондирующего импульса не оказывает заметного влияния на точность расчёта таких параметров, как дрейф плазмы и её электронная концентрация. А вот значения температур ионов в случае неучёта спектра зондирующего импульса достигают приращений до 20 %, температур же электронов – до единиц процентов. Эти отклонения особенно характерны для нижних высотных участков, с ростом же высоты влияние спектра зондирующего импульса уменьшается, что связано с преобладанием на их фоне ширины спектра сигнала НР.

Выводы. Приведенные результаты исследований и последующая обработка сигнала НР показывают, что в зависимости от состояния ионосферной плазмы ширина спектра зондирующего импульса может значительно влиять на точность расчёта именно такого параметра, как температура ионов, и в чуть меньшей мере – на точность расчёта температуры электронов, что свидетельствует о необходимости учета такой ситуации.

Список литературы: 1. Брюнелли Б.Е. Метод некогерентного рассеяния радиоволн / Б.Е. Брюнелли, М.И. Кочкин, И.Н. Пресняков и др. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Рогожкин Е.В. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом НР: монография / Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, В.Н. Лысенко. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 3. Эванс Дж.В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн // ТИИЭР. – 1976. – Т. 57, № 4. – С. 139-175. 4. Рогожкин Е.В. Анализ зондирующих сигналов для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния / Е.В. Рогожкин, А.С. Мазманишвили // Электромагнитные явления. – 1998. – Т. 1, № 4. – С. 545-551. 5. Пидручная Н.А. Влияние спектра зондирующего импульса на спектр сигнала некогерентного рассеяния / Н.А. Пидручная, В.А. Пуляев // Вестник НТУ “ХПИ”. Серия: Радиофизика и ионосфера. – 2012. – № 57 (963). – С. 57-60. 6. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В.А. Пуляев, Д.А. Дзюбанов, И.Ф. Домнин. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с.

Поступила в редколлегию 01.04.2013

М.О. ТЕМЕРЕВ, бакалавр, студент, НТУ “ХПІ”;
В.О. ПУЛЯЄВ, д-р техн. наук, проф., Інститут іоносфери, Харків

РОЗРОБКА АНАЛІЗАТОРА СПЕКТРА НА ОСНОВІ ШВИДКОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР’Є

Розглянуто розробку пристрою аналізу спектра низькочастотного сигналу з подальшим виведенням даних на дисплей.

Ключові слова: сигнал, перетворення Фур’є, цифровий аналізатор спектру.

Рассмотрена разработка устройства анализа спектру низкочастотного сигнала с последующим выводом данных на дисплей.

Ключевые слова: сигнал, преобразование Фурье, цифровой анализатор спектра.

Examined the spectrum analysis apparatus for baseband signal, which displays the results on the display.

Keywords: signal, Fourier transform, digital spectrum analyzer.

Вступ. Розкладання сигналу в спектр застосовується для аналізу процесу проходження сигналів через електричні схеми. Однією з необхідністю розкладання сигналу в спектр є те, що проходячи по колу, він зазнає змін. Подібні прилади будуються з використанням мікроконтролера, в якому функціонує алгоритм швидкого перетворення Фур’є. Він дає змогу за мінімальну кількість ітерацій розрахувати спектр вхідного сигналу.

Структура пристрою дуже схожа на пристрій “цифровий осцилограф”, але новизна в тому, що аналіз спектра відбувається на програмному рівні. В даній роботі показано приклад розробки пристрою типу “аналізатор спектра”, який, в той же час, буде мати функції ще й осцилографа.

Мета роботи – розробка пристрою для аналізу спектра вхідного низькочастотного сигналу з частотою до 100 кГц з подальшим виведенням даних на екран дисплею.

Вибір, обґрунтування й опис роботи функціональної схеми [1–3]. Реалізація розкладання в спектр та графічний інтерфейс потребує 32-розрядного мікроконтролера та достатньої кількості програмної та оперативної пам’яті. Вибираємо STM32F103VDT, тактова частота котрого складає 72 МГц, та він має 384 Кб програмної та 64 Кб оперативної пам’яті. Так як вхідний сигнал має смугу 100 кГц, то швидкість його дискретизації може не перевищувати 2 Мбіт/с. Для цього вибираємо зовнішній АЦП типу AD9200, який задовольняє цим вимогам по швидкості. Завдяки розрядності 10 біт, можливе масштабування осцилограми на дисплеї.

Для відображення інформації вибираємо кольоровий дисплей з сенсорною панеллю. Також потрібен вхідний пристрій зі змінним коефіцієнтом підсилення. Для зручності вимірювань в режимі осцилографа додамо 3 цифрових входи.

© М.О. Темерев, В.О. Пуляєв, 2013

Після аналізу інформації на сайтах [4–8] було запропоновано функціональну схему пристрою, яка представлена на рис. 1. Для того, щоб розрізняти сигнали різної інтенсивності, у його вхідному контурі діапазон передачі вхідної напруги можна змінюватися: він складає ± 5 В, ± 2 В та ± 1 В.

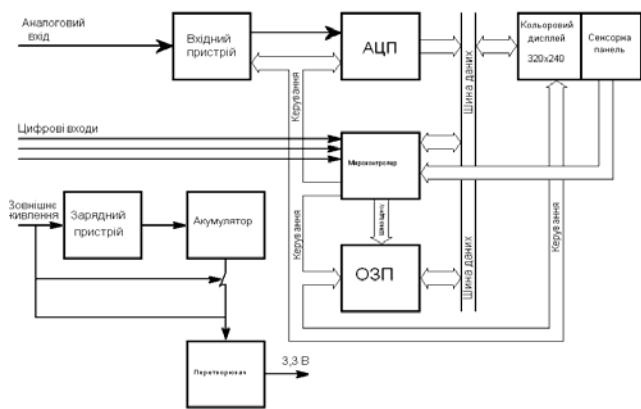


Рис. 1 – Функціональна схема аналізатора спектра

АЦП за тактовим сигналом видає на паралельну шину даних значення аналогового сигналу. Для утворення 128-дискретного спектра необхідно зібрати 256 вхідних значень сигналу, потім виконати його перетворення і результат вивести на дисплей. Для режиму осцилографа у реальному часі необхідно зібрати 320 значень (за кількістю пікселів на дисплеї по горизонталі) і вивести їх на екран.

Зовнішня пам'ять потрібна для запису осцилограми великої тривалості, тому при зчитуванні даних вони відразу заносяться до оперативного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП). Динамічна пам'ять в порівнянні зі статичною має набагато більший об'єм при схожій ціні, також потребує менше виводів для підключення. Така пам'ять потребує регенерації, котра виконується на програмному рівні мікроконтролером, тому максимальний час запису сигналу в режимі осцилографа не може бути більшим за 30 с. Вибираємо MT48LC32M16A2P (DD4) з об'ємом пам'яті 32 Мб.

Сенсорна панель має вбудований контролер і передає дані від рухів оператора до мікроконтролера в протоколі SPI (Serial Peripheral Interface).

Розробка схеми електричної принципової. Згідно структурної схеми на рис. 1, вхідний пристрій складається з підсилювача сигналів на двох операційних елементах DA1 та DA2 (рис. 2). Для них вибираємо AD9200, смуга частот яких більше 150 КГц. DA1 включено з негативним зворотнім зв'язком, що дає можливість змінювати коефіцієнт підсилення. Для цього використовується оптореле типу CPC1017 (U_1 , U_2 і U_3).

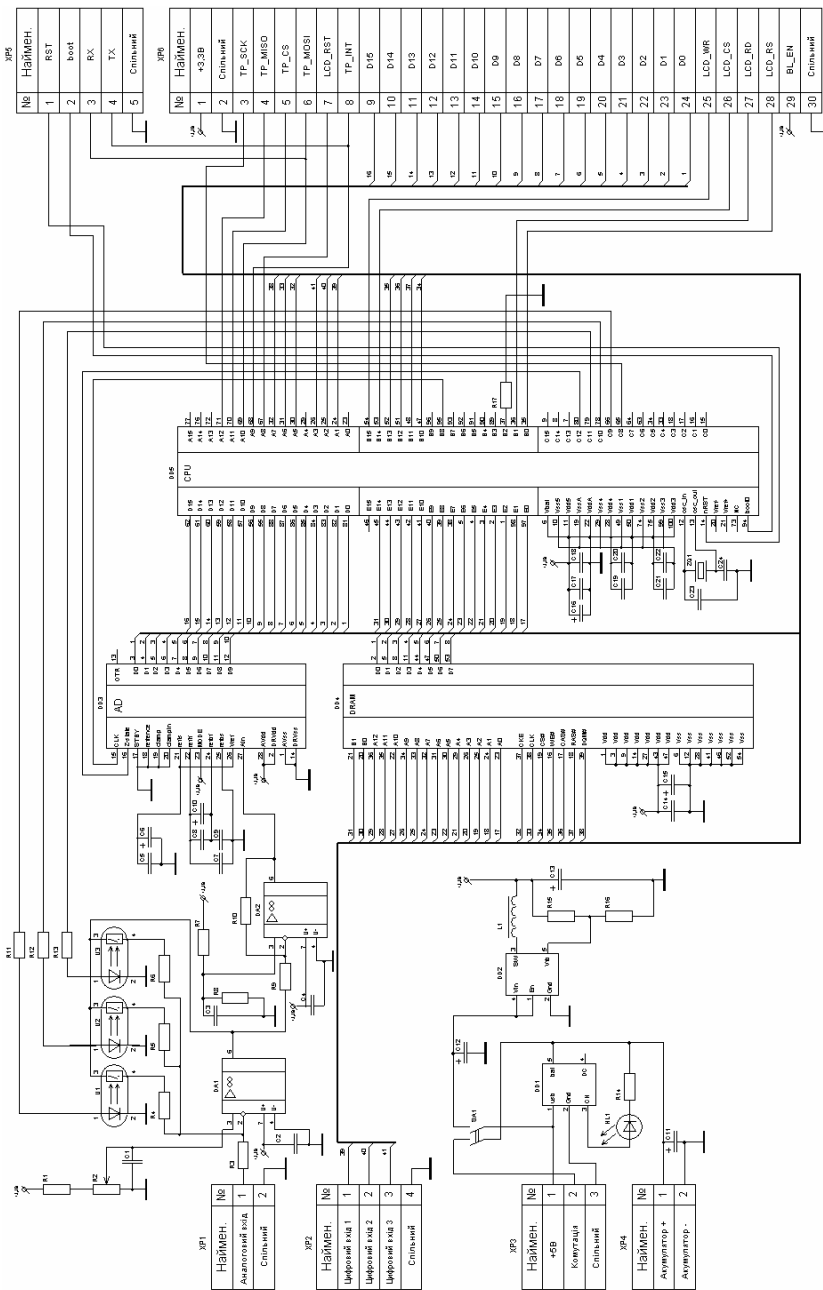


Рис. 2 – Схема електрична принципу аналізатора спектра

Перший підсилювач DA1 має великий вхідний опір і зменшує вплив вимірювача на роботу досліджуваної схеми. Другий підсилювач (рис. 2) має малий вихідний опір для узгодження вхідного пристрою з наступним АЦП.

АЦП побудовано на мікросхемі DD3, яка перетворює вхідну напругу в 10-розрядний код. За позитивним сигналом управління “Z-state” вихід АЦП переводиться у високоімпедансний стан (Z-стан) для надання можливості мікроконтролеру працювати на шині даних з іншими пристроями.

Вихід ОЗП підключено до загальної шини даних, тому робота з пам'яттю можлива тільки тоді, коли закінчена робота з дисплеєм, та коли вихід АЦП у Z-стані. Адресна шина підключена до мікроконтролера індивідуально, тому на її роботу ніяких обмежень не існує.

Кольоровий дисплей з сенсорною панеллю є окремим блоком, і з'єднується з загальною шиною даних. Його підключено до роз'єму XP6.

Блок живлення складається з регулятора заряду акумулятора DD1 та мікросхеми перетворювача DD2. Коли зовнішня напруга відсутня, пристрій живиться від акумулятора. Напруга зарядженого акумулятора може бути від 3,5 до 4,2 В. Так як схемі потрібна стабільна напруга живлення 3,3 В, то застосовується перетворювач напруги на мікросхемі DD2.

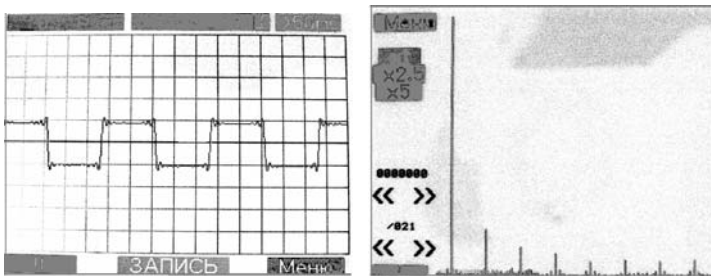


Рис. 3 – Осцилограма та спектр вхідного сигналу на дисплеї пристрою

Висновок. З використанням сучасної елементної бази вдалося спроектувати пристрій аналізу електричного сигналу низької частоти (0...100кГц) максимальної амплітуди 5 В. Цей пристрій дозволяє в реальному часі на програмному рівні розраховувати спектр сигналу та в режимі “осцилограф” або “аналізатор спектра” виводити результати на дисплей.

Список літератури. 1. Гершунский Б.С. Справочник по расчету электронных схем. – К.: КГУ, 1983. – 240 с. 2. Гитис Э.И., Пискунов Е.А. Аналого-цифровые преобразователи: Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 360 с. 3. Айфичер Э., Джервис Б. Цифровая обработка сигналов. Практический подход. 2-е издание: пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 992 с. 4. [Электронный ресурс]: <http://www.alldatasheet.com>. 5. [Электронный ресурс]: <http://www.analog.com>. 6. [Электронный ресурс]: <http://www.st.com>. 7. [Электронный ресурс]: <http://easyelectronics.ru>. 8. [Электронный ресурс]: <http://eugenemcu.ru>.

Поступила в редколлегию 01.04.2013

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 РАССЕЙНИЯ *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.

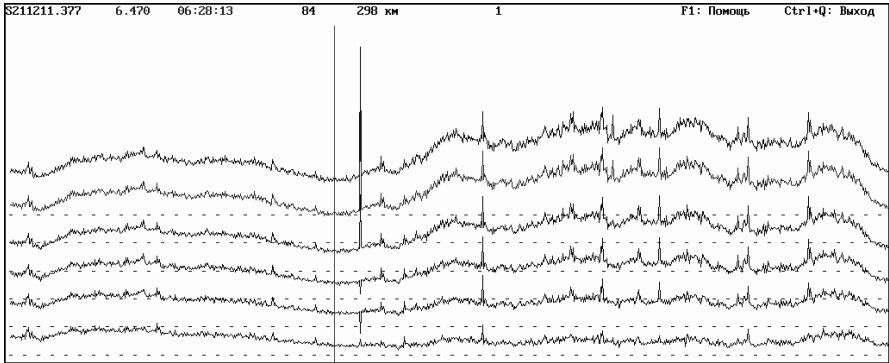
В состав пакета UPRISE входит набор программ, которые реализуют основные этапы обработки.

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.

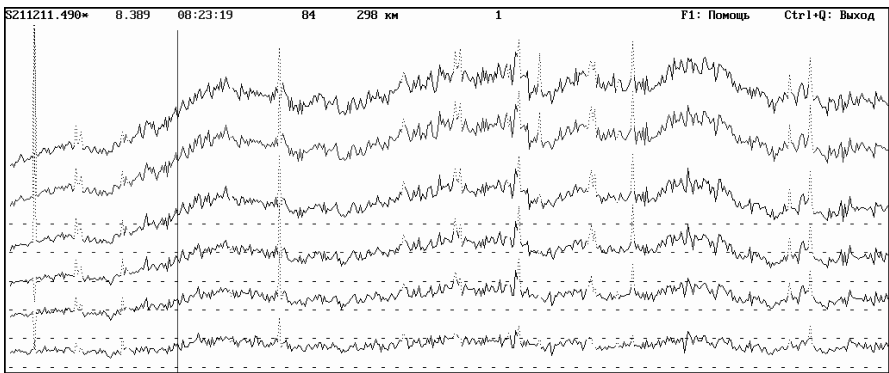
02_UPRISE_spline.exe – программа заполнения отфильтрованных данных, расчёта АКФ шума и вычисления АКФ HP сигнала.

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.

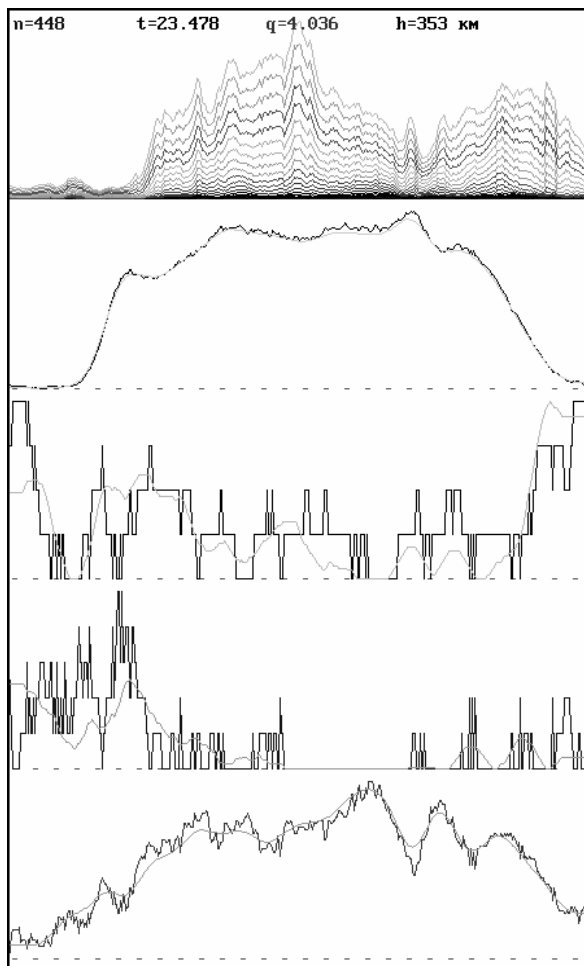


Рис. 2 – Вид окна программы оценки параметров ионосферной плазмы

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.

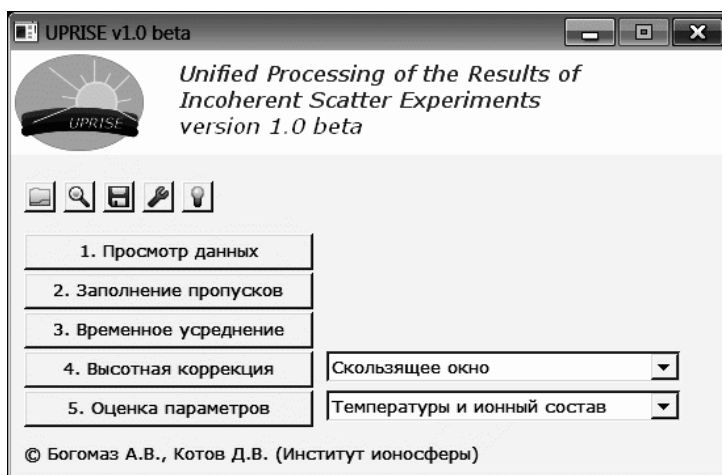


Рис. 3 – Вид окна программы-оболочки пакета анализа данных HP UPRISE

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 сбоя 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. Радиофизика 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 “Радиофизика, електроніка, фотоніка та біофізика”. 1–3 грудня 2009 р. Збірник анотацій. – 2009. – С. 33. **10. Домнин И.Ф.** Корреляционная функция некогерентного рассеянного сигнала. I. 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 некогерентного 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 “Радиотехника”. – 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. *Клейнсов Ю.В.* Оцінювання похибок визначення параметрів іоносферної плазми, пов'язаних з неврахуванням наявності іонів гелію / *Ю.В. Клейнсов, 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 радара НР на удалённом 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 радара 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

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков;

А.И. ЛЯЛЮК, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;

Е.В. РОГОЖКИН, д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры НТУ “ХПИ”, Харьков;

Е.А. ХРАМОВ, бакалавр, студент НТУ “ХПИ”, Харьков

О СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НА ВИДЕО- И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТАХ

Рассмотрены особенности приёма и обработки некогерентно рассеянных ионосферой сигналов, выделенных для цифровой обработки на видео- и промежуточной частотах. Предложена функциональная схема системы приёма и обработки сигналов на промежуточной частоте и приведены рекомендации для повышения эффективности обработки. Система позволяет использовать алгоритмы обработки, адаптируемые к состоянию ионосферы и исследуемому диапазону высот.

Ключевые слова: некогерентно рассеянный сигнал, корреляционная функция, спектр, приём и обработка сигналов.

Розглянуто особливості прийому й обробки некогерентно розсіяних іоносферою сигналів, виділених для цифрової обробки на відео- та проміжній частотах. Запропоновано функціональну схему системи прийому й обробки сигналів на проміжній частоті та приведені рекомендації для підвищення ефективності обробки. Система дозволяє використовувати алгоритми обробки, що адаптуються до стану іоносфери та досліджуваного діапазону висот.

Ключові слова: некогерентно розсіяний сигнал, кореляційна функція, спектр, прийом і обробка сигналів.

The features of the reception and processing of incoherently scattered by the ionosphere signals, which are selected for digital processing at the video and intermediate frequencies, are considered. A block diagram of a system for signal receiving and processing at the intermediate frequency is proposed. The recommendations to improve the processing efficiency are provides. The system allows to use algorithms that are adapted to the state of the ionosphere and the altitude range.

Keywords: incoherent scattered signal, correlation function, spectrum, signal reception and processing.

Введение. При некогерентном рассеянии (НР) радиоволн в ионосфере эффективное сечение рассеяния в обратном направлении зависит от локальных параметров плазмы и величины рассеивающего объёма, который определяется длительностью зондирующего импульса и диаграммой направленности антенны. Для получения информации о параметрах ионосферы в достаточно широком диапазоне высот с приемлемым соотношением сигнал/шум используются радиолокаторы с произведением $P \times G$ в импульсе не менее одного гигаватта. Это требует применения больших

© Л.Я. Емельянов, А.И. Лялюк, Е.В. Рогожкин, Е.А. Храмов, 2013

антенн с эффективной поверхностью в несколько тысяч квадратных метров, что определяется объёмным характером распределения рассеивателей. Не менее важным элементом является организация работы системы обработки сигнала при гибком программно-алгоритмическом обеспечении.

На радаре НР Института ионосферы корреляционная обработка сигнала проводится после синхронного детектирования с использованием квадратурных каналов. По массиву измеренных корреляционных функций НР сигнала определяют высотное распределение температур ионов и электронов, ионный состав, а также радиальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы.

Цель работы – сравнение систем корреляционной обработки НР сигналов на видео- и промежуточной частоте и представление системы, позволяющей проводить обработку сигналов (спектральную и (или) корреляционную) с использованием предварительных записей оцифрованных значений непосредственно с выхода усилителя промежуточной частоты.

Рассмотрим некоторые аспекты.

Обработка НР сигналов на видеочастоте. На выходе синхронного детектора (СД) напряжение сигнала пропорционально $\cos \varphi$, где φ – разность фаз между принятым НР сигналом и сигналом синхронного гетеродина. Разность фаз носит случайный характер с равномерным законом распределения, и это приводит к увеличению дисперсии оценок автокорреляционной функции (АКФ) сигнала НР. Применением квадратурных каналов СД решают сразу две задачи: уменьшают дисперсию оценок АКФ сигнала НР и создают возможность измерения скорости движения ионосферной плазмы.

Обработка данных включает в себя определение АКФ НР сигнала $R_j^*(\tau_k)$ как разность оценки АКФ смеси сигнал+шум на j -м исследуемом участке дальности, протяжённость которого определяется длительностью зондирующего импульса, и оценки АКФ шума, усредненной по ряду замеров в конце радиолокационной развертки дальности, где уровень НР сигнала пренебрежимо мал:

$$R_j^*(\tau_k) = R_{j(s+n)}^*(\tau_k) - \overline{R_n^*(\tau_k)}.$$

Здесь индекс «*» означает оценку соответствующего параметра при накоплении по множеству реализаций (радиолокационных разверток), количество которых определяется длительностью сеанса наблюдений. Далее для упрощения записи этот индекс будет опущен.

Процесс обработки сигнала на каждом из участков дальности может быть сведен к тому, что АКФ НР сигнала определяют в каждом из двух квадратурных каналов и вычисляют:

$$R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{11}(t_j, \tau_k) + R_{22}(t_j, \tau_k)], \quad (1)$$

получая после нормировки оценку «действительной» составляющей нормированной АКФ НР сигнала – $r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$, где t_j – радиолокационная задержка, соответствующая высоте $h_j = ct_j/2$ при вертикальном зондировании, $\tau_k = k\Delta\tau$, k и $\Delta\tau$ – номер ординаты АКФ и шаг по задержке соответственно. В выражении (1)

$$R_{11}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j)u_1(t_j + \tau_k)}, \quad R_{22}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j)u_2(t_j + \tau_k)}.$$

Индексы 1 и 2 соответствуют номерам квадратурного канала приёмника.

Если скорость передвижения плазмы пренебрежимо мала, составляющая $R_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)$ может быть использована для определения параметров ионосферы, таких как температуры ионов T_i и электронов T_e , ионного состава, электронной концентрации N_e .

В общем случае определение нормированной АКФ НР сигнала производится с учётом «мнимой» составляющей $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$:

$$r(t_j, \tau_k) = \sqrt{r_{\text{Re}}^2(t_j, \tau_k) + r_{\text{Im}}^2(t_j, \tau_k)}.$$

Составляющая $r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)$ определяется нормировкой полуразности взаимных корреляционных функций сигналов квадратурных каналов [1]:

$$R_{\text{Im}}(t_j, \tau_k) = \frac{1}{2} [R_{12}(t_j, \tau_k) - R_{21}(t_j, \tau_k)],$$

где $R_{12}(t_j, \tau_k) = \overline{u_1(t_j)u_2(t_j + \tau_k)}$, $R_{21}(t_j, \tau_k) = \overline{u_2(t_j)u_1(t_j + \tau_k)}$.

Вертикальную составляющую скорости плазмы V_z вычисляют согласно выражению [2]:

$$V_z(h_j) = -\frac{\lambda}{4\pi n} \sum_{k=1}^n \left[\frac{1}{\tau_k} \arctg \frac{r_{\text{Im}}(t_j, \tau_k)}{r_{\text{Re}}(t_j, \tau_k)} \right], j=1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где λ – рабочая длина волны радиолокатора НР, n – количество используемых при вычислениях V_z значений АКФ, N – количество участков дальности.

Отметим, что при измерении скорости движения плазмы особого

внимания требует контроль идентичности квадратурных каналов, так как нарушение квадратурной зависимости приводит к ошибкам измерений.

Регистрация доплеровского сдвига и асимметрии спектра НР сигнала. НР сигнал представляет собой узкополосный случайный процесс ($2\Delta f_s / f_0 \approx 10^{-4}$, где $2\Delta f_s$ – ширина спектра, f_0 – несущая частота радара). Поэтому доплеровское смещение f_d практически не приводит к появлению асимметрии его спектра, который, согласно представлениям о распределении скоростей частиц в плазме в отсутствие внешних воздействий, является симметричным (рис. 1, а). Асимметрия спектра рассеяния (рис. 1, б) может наблюдаться при любых нарушениях симметрии распределения заряженных частиц по скоростям. Она, в частности, возникает при наличии токов в плазме [3].

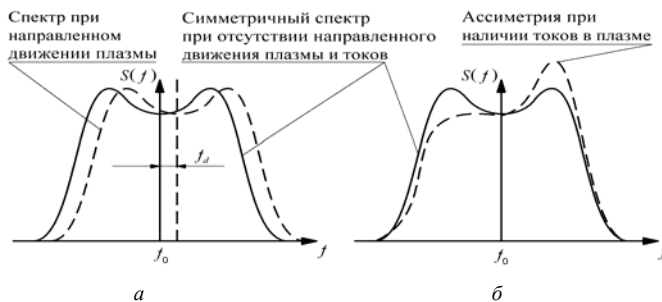


Рис. 1 – Примеры спектров: а – доплеровское смещение спектра относительно несущей частоты; б – асимметричный спектр

Для выявления асимметрии спектра при использовании синхронного детектирования требуются дополнительные вычисления, которые сводятся к оценке вида взаимной корреляционной функции квадратурных каналов. Для среднеширотной ионосферы такие вычисления обычно не проводились, считая, что в подавляющем количестве случаев спектр некогерентного рассеяния симметричен [4]. И в этом случае особого внимания требует контроль идентичности квадратурных каналов.

Из выражения (2) не следует, что отличие левой части от нуля объясняется только движением плазмы. Причиной этому могут быть и аппаратные факторы, например, нарушение симметрии АЧХ полосовых фильтров. АЧХ достаточно стабильна, и её асимметрия устраняется при регламентном контроле радиоприёмного устройства. Асимметрию спектра рассеяния достаточно уверенно можно обнаружить при спектральной обработке НР сигнала на промежуточной частоте.

Однако по измеренному спектру трудно определить его доплеровское

смещение, так как оно составляет всего лишь $10^{-3} - 10^{-4}$ от ширины спектра рассеяния. Измерения доплеровского смещения при корреляционной обработке, напротив, весьма эффективны [5–7].

Отсюда следует, что отсутствие информационных потерь может быть обеспечено использованием одновременно и корреляционной, и спектральной обработки сигнала на промежуточной частоте.

Учёт состояния ионосферной плазмы в широком диапазоне высот. В ионосфере ионный состав изменяется с высотой. Так, на высотах вблизи максимума ионизации доминируют ионы кислорода O^+ , и спектр НР сигнала достаточно узок: при длине волны $\lambda = 2$ м он не превышает 10 кГц. С увеличением высоты возрастают температуры заряженных частиц, и всё большее влияние на характер рассеяния оказывают лёгкие ионы (H^+ и He^+). Спектр расширяется, а интервал корреляции соответственно уменьшается (рис. 2). Спектр НР сигнала, рассеянного на высотах 600 км и выше, может стать почти в 4 раза шире.

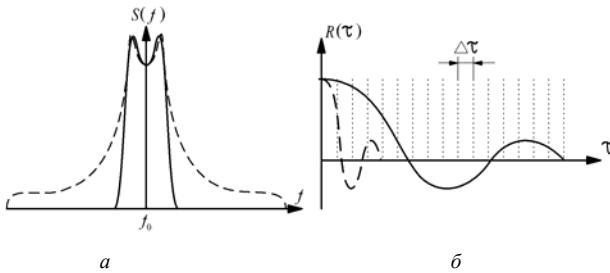


Рис. 2 – Пример спектров и АКФ НР сигнала для высот вблизи максимума ионизации (сплошная линия) и для высот внешней ионосферы (пунктир)

Используя результаты, приведенные в работе [5], можно получить оценки ширины спектра рассеяния $2\Delta f_s$ и интервала корреляции $\tau_{\text{корр}}$:

$$2\Delta f_s = \frac{1,24}{\lambda} \sqrt{\frac{T_i}{m_i}}, \text{ кГц}; \quad \tau_{\text{корр}} \approx 3\lambda \sqrt{\frac{m_i}{T_e}}, \text{ мс},$$

где λ , $T_{i,e}$, m_i – соответственно в метрах, градусах Кельвина и в единицах атомного веса. Характеристики плазмы в ионосфере изменяются существенно. В качестве примера в таблице приведены результаты расчётов с использованием международной справочной модели IRI-2001 для дневных значений в максимум солнечной активности [5]).

Длина волны $\lambda \approx 2$ м используется на радаре НР Института ионосферы, $\lambda \approx 0,75$ м – на радаре НР Массачусетского технологического института (США).

Практика ионосферных измерений показывает, что оптимальное

количество корреляционных каналов, определяемое интервалом корреляции и видом измеряемой АКФ НР сигнала, лежит в интервале 18–20 независимо от длины рабочей волны. При $\lambda \approx 2$ м оптимальный шаг Δt для высот вблизи максимума ионизации и ниже составляет 30–40 мкс, а для высот, где преобладают ионы водорода, – около 10 мкс.

Таблица – Результаты расчёта ширины спектра и интервала корреляции

h , км	$2\Delta f_{ss}$, кГц		$\tau_{\text{корр}}$, мс	
	$\lambda=2$ м	$\lambda=0,75$ м	$\lambda=2$ м	$\lambda=0,75$ м
200	5	13	1,3	0,5
300	5	13	1,3	0,5
500	23	61	0,7	0,26
700	28	75	0,6	0,23
1000	33	88	0,45	0,17

Отсюда следует, что коррелометр с фиксированным алгоритмом работы не оптимален для определения высотного распределения параметров ионосферы при наблюдениях одновременно в большом интервале высот, например, от 120 до 1500 км.

Одно из возможных решений было заложено в системе обработки СКИФ [5]. Предусматривалась работа с составным сигналом, элементы которого и алгоритм их обработки выбирались в соответствии с высотным строением ионосферы.

Представляется, что более эффективное устранение отмеченного недостатка может быть осуществлено при записи оцифрованных значений смеси сигнал+шум на выходе радиоприёмного устройства. Последующее использование полученных массивов позволяло бы применять альтернативные варианты обработки с использованием высокопроизводительных ПК. Это может быть, в частности, корреляционная или спектральная обработка с оптимизированными (для каждого конкретного высотного диапазона и состояния ионосферы) параметрами.

При использовании синхронного детектирования и корреляционной обработки информационные потери можно сократить за счёт изменения шага дискретизации, однако при этом выявление асимметрии спектра значительно усложняет процедуру обработки НР сигнала [8].

Система приёма и обработки сигналов на промежуточной частоте. Чтобы всё же создать возможность выявления асимметрии спектра, например, с помощью методик, приведенных в [6, 8, 9], предлагается осуществлять аналого-цифровое преобразование непосредственно на выходе усилителя промежуточной частоты (ПЧ). При этом импульсы опроса формируются с использованием сигнала синхронного гетеродина и,

следовательно, жёстко привязаны к ПЧ [6]. Запись дискретных отсчётов сигнала осуществляется под управлением системы синхронизации радара.

Функциональная схема системы приёма, преобразования и обработки сигнала на ПЧ применительно к радару НР Института ионосферы представлена на рис 3.

На схеме выделены блоки, которые необходимо добавить к существующей системе, описанной в [10].



Рис. 3 – Функциональная схема системы приёма, преобразования и обработки сигнала. Здесь АФУ – антенно-фидерное устройство, УВЧ – усилитель высокой частоты; СМ – смеситель; УПЧ – усилитель промежуточной частоты, [f×4] – блок множителя частоты на 4; ФОИ – формирователь импульсов опроса АЦП; ИЗП – импульс запуска передатчика; ИБН – импульс начала бланка.

Система работает следующим образом.

Принятый сигнал подаётся на вход УВЧ приёмника. В приёмном тракте осуществляется усиление и преобразование НР сигнала, в результате которого его спектр переносится на вторую ПЧ (около 1 МГц). Сигналы гетеродинов с частотами $f_{Г1}$ и $f_{Г2}$ формируются таким образом, что при отсутствии доплеровского сдвига центральная частота спектра сигнала на ПЧ ($f_{ПР2}$) равна частоте синхронного гетеродина $f_{Г2}$. С выхода приёмника преобразованный сигнал поступает на вход АЦП. Формирователь импульсов опроса вырабатывает парные импульсы с интервалом, равным четверти периода сигнала синхронного гетеродина. Таким образом, соответствующие им отсчёты сигнала НР находятся в квадратурной зависимости.

Парные отсчеты следуют с периодом, равным шагу задержки Δt (см. рис. 2), который задаётся программно с учётом ожидаемого характера АКФ НР сигнала на соответствующих высотах: в пределах развёртки дальности шаг Δt может быть выбран, например, 40 мкс для области, где

доминируют ионы кислорода O^+ , или 10 мкс для области, где доминируют ионы водорода H^+ .

Возможность использования пополняемой библиотеки альтернативных алгоритмов обработки, выбираемых в зависимости от высотного строения ионосферы и конкретной задачи ионосферных измерений, а также алгоритмов, реализующих цифровую фильтрацию и обработку [11–13], обеспечивает уменьшение дисперсии оценок измеряемых параметров ионосферы.

Выводы. Недостатков, присущих системам с фиксированным алгоритмом обработки, можно избежать, используя предварительную запись оцифрованных значений непосредственно с выходов аналоговых квадратурных каналов. Предлагаемый в данной работе способ оцифровки значений сигнала непосредственно на выходе оконечного усилителя промежуточной частоты дополнительно позволяет избавиться от недостатков, присущих аналоговым схемам. Такой подход открывает возможность проводить спектральную и (или) корреляционную обработку НР сигнала на промежуточной частоте в согласованной полосе частот, учитывать характерные особенности плазмы на разных высотах, выявлять и оценивать асимметрию спектра, которая может свидетельствовать о характере реакции плазмы на возмущение её равновесного состояния.

Список литературы: 1. Брюнелли Б.Е., Кочкин М.И., Пресняков И.Н. и др. Метод некогерентного рассеяния радиоволн. – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 2. Yemelyanov L.Ya., Dzyubanov D.A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, № 14. – P. 1313-1327. 3. Rosenbluth M.N., Rostoker N. Scattering of electromagnetic waves by a non-equilibrium plasma // Phys. Fluids. – 1962. – Vol. 5, № 7. – P. 776-788. 4. Evans J.V., Brockelman R.A., Julian R.F. et al. Determination of F-region vertical drifts at Millstone Hill // Radio Sci. – 1970. – Vol. 5, № 1. – P. 27-38. 5. Рогожкин Е.В., Пуляев В.А., Лысенко В.Н. Зондирующие сигналы для исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния: монография. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2008. – 256 с. 6. Рогожкин Е.В. Измерение параметров ионосферной плазмы по корреляционной функции сигнала некогерентного рассеяния / Ионосферные исследования. – 1979. – № 27. – С. 46-59. 7. Емельянов Л.Я., Григоренко Е.И., Скляров И.Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на харьковском радаре некогерентного рассеяния // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 136. – С. 102-108. 8. Rino C.L. Radar measurement of ionosphere motion in the presence of current-induced spectral asymmetries // Radio Sci. – 1972. – Vol. 7, № 11. – P. 1049-106. 9. Щербаков А.А., Медведев А.В., Кушнарёв Д.С. Анализ состояния среднеширотной внешней ионосферы по данным наблюдений на иркутском радаре НР // Солнечно-земная физика. – 2010. – Вып. 16. – С. 3-8. 10. Емельянов Л.Я. Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 108-112. 11. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. – М.: Сов. радио, 1980. – 224 с. 12. Грибанов Ю.И., Мальков В.Л. Спектральный анализ случайных процессов. – М.: Энергия, 1974. – 240 с. 13. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов. Часть 1, 2. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. – 199 с.

Поступила в редколлегию 02.04.2013

В.А. ПУЛЯЕВ, д-р техн. наук, проф., зам. директора, Институт ионосферы, Харьков;

Д.П. БЕЛОЗЕРОВ, канд. техн. наук, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;

А.Е. МИРОШНИКОВ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ЗАПИСЬ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ В ФОРМАТЕ БАЗЫ ДАННЫХ *MADRIGAL*

Рассматривается возможность записи ионосферных параметров, полученных с помощью радиолокатора некогерентного рассеяния Института ионосферы, в формате базы *Madrigal*.

Ключові слова: параметри іоносфери, база даних, процедури форматування масивів.

Розглядається можливість запису іоносферних параметрів, отриманих за допомогою радіолокатора некогерентного розсіяння Інституту іоносфери, у форматі бази *Madrigal*.

Ключевые слова: параметры ионосферы, база данных, процедуры форматирования массивов.

The capability recording of ionospheric parameters, obtained with the incoherent scatter radar the Institute of ionosphere, in *Madrigal* format is considered.

Keywords: ionospheric parameters, database, array format procedures.

Введение. *Madrigal* является научной базой данных, которая содержит информацию о верхних слоях атмосферы [1]. Данные этой базы используются в ионосферных исследованиях по всему миру. *Madrigal* является надежной World Wide Web системой, способной управлять и архивировать данные онлайн в различных форматах наземных систем наблюдений. Она включает в себя сеть сайтов научно-исследовательских организаций: Millstone Hill (США), Аресибо (Пуэрто-Рико), EISCAT (Норвегия), SRI International (США), Cornell University (США), Jicamarca (Перу), CRRL (Китай), ИСЗФ (Россия) др. С сайтов этих организаций можно получить, как данные локального характера, так и метаданные, используемые совместно организациями, входящими в данную сеть. Доступ к метаданным открыт с любого веб-сайта *Madrigal*.

Целью статьи является анализ формата, используемого для базы *Madrigal*, и рассмотрение возможности записи в данном формате ионосферных параметров, полученных при помощи радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы (Харьков).

Информационный анализ. Сведения об измеренных характеристиках сигнала рассеяния и рассчитанных с их помощью параметрах ионосферной плазмы хранятся на сайтах *Madrigal* в *CEDAR-database* формате [2].

© В.А. Пуляев, Д.П. Белозеров, А.Е. Мирошников, 2013

Согласно требованиям этого формата запись данных может осуществляться в двоичном и текстовом виде, а в целом представляет собой процедуру подготовки и фиксации на диске вводной части, одномерного массива (1-D) однозначных параметров и двумерного массива (2-D) многозначных параметров. Вводная часть должна содержать не менее чем 16 определяющих значений, а сама запись должна состоять из 7998 информационных блоков, каждое из которых представляет собой 16 полей в символьном виде или 16-разрядные целые числа в двоичном виде.

Текстовый формат используется для формирования однострочной записи. Обычно вводная часть занимает только одну строку, но в случае, если она содержит больше чем 20 полей, то превышающие поля переносятся на следующую строку. Нет никакого ограничения на количество 1-D или 2-D параметров. Массив 1-D состоит из списка кодов параметров в виде одной или более строк, сопровождаемых тем же количеством строк в виде непосредственно значений самых параметров. Массив 2-D создается точно так же, кроме случая, когда значения записаны в виде многократной строки для каждого кода параметра.

При записи данных в двоичном виде 1-D и 2-D массивы добавляются к вводной части, чтобы сформировался непрерывный массив, где все переменные представлены 16-разрядными двоичными целыми числами. На рис. 1 показан пример записи данных в двоичном формате.

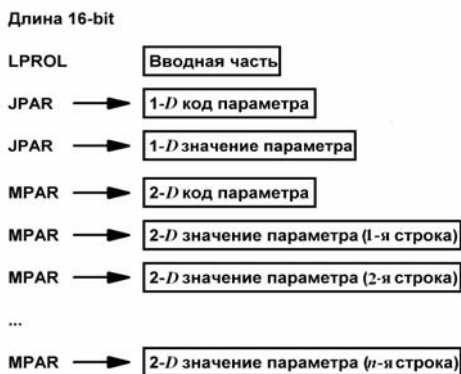


Рис. 1 – Запись данных в двоичном формате

В Институте ионосферы до последнего времени функционировали те версии программы, которые позволяют преобразовывать экспериментальные результаты радара НР в *CEDAR-database* формат [3], фиксируя лишь *ограниченную* информацию, а именно:

– основные тактико-технические данные аппаратуры, используемой в эксперименте;

– полученные данные в виде сеансов измерений, содержащих первичную информацию (высотно-временное распределение автокорреляционных функций сигнала НР);

– рассчитанные высотно-временные характеристики параметров ионосферной плазмы.

The single-valued parameters for the 1 seans.				Time= 800 - 806 UT	
N	CODES	VALUE	DESCRIPTION	UNITS	
1	44	11100	Local solar time	1.E-03	hour
2	60	360	Integration time for these data	1.	s
3	115	9	Altitude averaging interval	1.	kn
4	116	7200	Additional increment to ht avgng intrvl	1.E-01	n
5	130	0	Mean azimuth angle (0=geog N, 90=east)	1.E-02	deg
6	140	9000	Elevation angle (0=horizontal, 90=vert)	1.E-02	deg
7	160	4970	Geodetic latitude of measurement	1.E-02	deg
8	170	3630	Geodetic longitude of measurement	1.E-02	deg
9	216	6570	Geomagnetic field downward inclination	1.E-02	deg
10	224	4540	Geomagnetic (centered dipole) latitude	1.E-02	deg
11	244	11770	Geomagnetic (cntrd dipol) east longitud	1.E-02	deg
12	418	28	ACF lags calculated	1.	
13	482	700	System temperature	1.	K
14	486	2600	Peak power	1.	KW
15	490	1500	Transmitted frequency	1.E+05	Hz
16	494	11	Receiver bandwidth	1.	kHz
17	530	1240	Maximum electron density	1.E+09	n-3
18	540	350	Height of maximum electron density	1.	kn

a

COLS:1-8	9-16	17-24	25-64	65-72	73-80
KODS(1)	44	Local solar time		1.E-03	hour
KODS(2)	60	Integration time for these data		1.	s
KODS(3)	115	Altitude averaging interval		1.	kn
KODS(4)	116	Additional increment to ht avgng intrvl		1.E-01	n
KODS(5)	130	Mean azimuth angle (0=geog N, 90=east)		1.E-02	deg
KODS(6)	140	Elevation angle (0=horizontal, 90=vert)		1.E-02	deg
KODS(7)	160	Geodetic latitude of measurement		1.E-02	deg
KODS(8)	170	Geodetic longitude of measurement		1.E-02	deg
KODS(9)	216	Geomagnetic field downward inclination		1.E-02	deg
KODS(10)	224	Geomagnetic (centered dipole) latitude		1.E-02	deg
KODS(11)	244	Geomagnetic (cntrd dipol) east longitude		1.E-02	deg
KODS(12)	418	ACF lags calculated		1.	
KODS(13)	482	System temperature		1.	K
KODS(14)	486	Peak power		1.	KW
KODS(15)	490	Transmitted frequency		1.E+05	Hz
KODS(16)	494	Receiver bandwidth		1.	kHz
KODS(17)	530	Maximum electron density		1.E+09	n-3
KODS(18)	540	Height of maximum electron density		1.	kn
KODM(1)	-660	Composition - (H+)/Ne error		1.E-03	
KODM(2)	-650	Composition - (He+)/Ne error		1.E-03	
KODM(3)	-500	Line of sight ion velocity error		1.E+00	n/s
KODM(4)	-560	Electron temperature error		1	K
KODM(5)	-550	Ion temperature error		1	K
KODM(6)	-520	Log10(Ne in n-3) error		1.E-03	lg(n-3)
KODM(7)	120	Range		1.	kn
KODM(8)	121	Additional increment to range		1.E-01	n
KODM(9)	410	Signal to noise ratio		1.E-02	
KODM(10)	520	Log10(Ne in n-3)		1.E-03	lg(n-3)
KODM(11)	550	Ion temperature		1	
KODM(12)	560	Electron temperature		1	
KODM(13)	500	Line of sight ion velocity (pos = away)		1.E+00	n/s
KODM(14)	620	Composition - (O+)/Ne		1.E-03	
KODM(15)	650	Composition - (He+)/Ne		1.E-03	
KODM(16)	660	Composition - (H+)/Ne		1.E-03	
KODM(17)	3800	Scaled real ACF at zero lag		1.	
KODM(18)	3801	Normalized real ACF at lag 1		1.E-04	
KODM(19)	3802	Normalized real ACF at lag 2		1.E-04	
KODM(20)	3803	Normalized real ACF at lag 3		1.E-04	
KODM(33)	3901	Normalized imaginary ACF at lag 1		1.E-04	
KODM(34)	3902	Normalized imaginary ACF at lag 2		1.E-04	
KODM(35)	3903	Normalized imaginary ACF at lag 3		1.E-04	

b

Рис. 2 – Пример организации записи массивов данных в *CEDAR-database* формате: *a* – одномерного, *b* – многомерного [3]

Реализация такого преобразования и подготовка данных выполнялись путем записи массивов усеченного вида (рис. 2) с наиболее полной минимизацией информационных объемов, что позволяло сформировать файловую структуру и расположить данные на носителе наиболее рациональным образом.

В табл. 1. приведен *полный* перечень информации о формате данных *Madrigal* (значения всех возможных кодов параметров и форматы их записи). Данные требования необходимо учесть при формировании структуры локальной базы данных, в настоящее время разрабатываемой в Институте ионосферы, которая позволит систематизировать и сформировать полноценный архив результатов ионосферных экспериментов над Украиной с использованием метода НР.

Таблица – Формат базы данных *Madrigal*

Значение	Описание	Единица измерения
<i>Коды, зависящие от времени</i>		
9	Год начала измерений (UT)	1. год
10	Год	1. год
19	Месяц/день начала измерений (UT)	1. м/д
20	Месяц/день	1. м/д
21	День года	1. день
28	Час/мин начала измерений (UT)	1. ч/м
29	Начальное доп. приращение к Ч/М	1.E-02 сек
30	Час/мин	1. ч/м
34	Время после 00.00 UT	1.E+03 час
36	Время после 00.00 UT	1.E+01 сек
44	Местное солнечное время	1.E-03 час
47	Местное солнечное время в точке сопряжения	1.E-07 час
54	Местное магнитное время	1.E-03 час
60	Время интеграции для этих данных	1. сек
70	Интервал выборки	1. сек
<i>Коды географических координат</i>		
106	Минимальная высота	1. км
108	Максимальная высота	1. км
110	Высота	1. км
115	Интервал усреднения высоты	1. км
120	Дальность	1. км
125	Ширина секторного импульса дальности	1. км
130	Значение азимута (0=географ.север; 90=восток)	1.E-02 град
132	Начальный азимут (0=географ.север; 90=восток)	1.E-02 град
133	Конечный азимут (0=географ.север; 90=восток)	1.E-02 град
135	Вариация азимута (конечный-начальный)	1.E-02 град
140	Угол наклона (0=горизонт; 90=вертикаль)	1.E-02 град
142	Начальный угол наклона	1.E-02 град
143	Конечный угол наклона	1.E-02 град
145	Вариация угла наклона (конечный-начальный)	1.E-02 град

150	Расстояние от точки 153,156 в направлении 130	1. км
153	Эталон геодезической широты (NHEMI=POS)	1.E-02 град
156	Эталон геодезической долготы	1.E-02 град
160	Геодезическая широта измерений	1.E-02 град
170	Геодезическая долгота измерений	1.E-02 град
180	Угол солнечного зенита в объеме измерений	1.E-02 град
183	Угол сопряжения солнечного зенита	1.E-02 град
186	Высота тени	1.км
190	Половина угла рассеяния (бистат. система)	1.E-02 град
<i>Коды магнитных координат</i>		
204	Северная составл. геомагнитного поля	1.E-08 Тл
206	Восточная составл. геомагнитного поля	1.E-08 Тл
208	Нисходящая составл. геомагнитного поля	1.E-08 Тл
210	Сила геомагнитного поля	1.E-08 Тл
213	Восточное склонение геомагн. поля	1.E-02 град
216	Нисходящее наклонение геомагн. поля	1.E-02 град
218	Значение L в объеме зондирования	1.E-02
220	Широта диполя в объеме измерения	1.E-02 град
222	Инвариантная широта в объеме измерения	1.E-02 град
224	Геомагнитная широта (центрированный диполь)	1.E-02 град
226	Верхняя широта в объеме измерения	1.E-02 град
244	Геомагн. восточная долгота (центриров. диполь)	1.E-02 град
246	Верхняя долгота в объеме измерения	1.E-02 град
<i>Геофизические индексы</i>		
310	КР индекс	1.E-01
320	АЕ индекс	1. NT
330	DST индекс	1. NT
340	АР индекс	1.
341	АА индекс	1.
350	F10.7 солнечный поток (SA)	1.E-22 Вт/м ² /Гц
360	Число солнечных пятен	1.
<i>Параметры, относящиеся к качеству данных</i>		
402	Длина импульса	1.E-06 сек
404	Время выборки концентрации	1.E-06 сек
406	Время спектральной выборки	1.E-06 сек
410	Отношение сигнал/шум	1.E-02
411	Отношение сигнал/шум	1.E-03
412	log ₁₀ (отношения сигнал/шум)	1.E-03
414	Выборки, используемые в среднее время	1.E+04
415	Приращения к выборкам в среднее время	1.
417	Выборки, используемые в преобразовании Фурье	1.
418	Вычисленные задержки АКФ	1.
420	Уменьшенный ЧНІ от FIT	1.E-03
430	Качество FIT	1.
482	Температура системы	1. К
484	Температура калибровки	1. К
486	Пиковая мощность	1. КВт
490	Частота передачи	1.E+05 Гц
492	Сдвиг полученной доплеровской частоты	1. Гц
494	Ширина полосы приемника	1. КГц
496	Время задержки приемника	1.E-06 сек

<i>Основные параметры радиолокатора НР</i>		
500	Концентрация электронов ($T_e/T_i=1$) (без коррекции)	1.E+09 м ⁻³
505	Log10 (концентрация электронов без коррекции)	1.E-03 log(м ⁻³)
510	Концентрация электронов, Ne	1.E+09 м ⁻³
511	Дополнит. приращение к коду 510, Ne	1.E+05 м ⁻³
512	Концентрация электронов, Ne	1.E+08 м ⁻³
520	Log10 (Ne в м ⁻³)	1.E-03 log(м ⁻³)
530	Максимальная электронная концентрация	1.E+09 м ⁻³
535	Log10(max Ne в м ⁻³)	1.E-03 log(м ⁻³)
540	Высота максимальной электронной концентрации	1. км
550	Температура ионов, T _i	1. К
560	Температура электронов, T _e	1. К
570	Отношение температур, T _e /T _i	1.E-03
580	Скорость ионов в пределах прямой видимости	1. м/с
590	Биссект. ионной скорости (бистабильная система)	1. м/с
600	Направление скорости-локальный азимут	1.E-02 град
610	Направление скорости локальная высота	1.E-02 град
620	Относительная концентрация [O ⁺]/Ne	1.E-03
630	Относительная концентрация [NO ⁺]/Ne	1.E-03
640	Относительная концентрация [O ₂ ⁺]/Ne	1.E-03
650	Относительная концентрация [HE ⁺]/Ne	1.E-03
660	Относительная концентрация [H ⁺]/Ne	1.E-03
690	Относительная концентрация [вес ионов от 28 до 32]/Ne	1.E-03
691	Средний мол. вес-ионы с мол. весом от 28 до 32	1.E-02 АЕМ
710	Частота столкновений ионов с нейтр. частицами	1. с ⁻¹
720	Log10 (частота столкн. ионов с нейтр. частицами)	1.E-03 log(с ⁻¹)
<i>Параметры нейтральной атмосферы</i>		
810	Температура нейтральной атмосферы, TN	1. К
820	Температура экзосферы, TINE	1. К
830	Log10 (плотности нейтр. атмосф. массы в кг/м ³)	1.E-03
840	Log10 (плотности нейтр. атмосф. числа в м ⁻³)	1.E-03
850	Состав нейтр. атмосферы - log([N ₂] в м ⁻³)	1.E-03
860	Состав нейтр. атмосферы - log([O ₂] в м ⁻³)	1.E-03
870	Состав нейтр. атмосферы - log([O] в м ⁻³)	1.E-03
880	Состав нейтр.атмосферы - log([AR] в м ⁻³)	1.E-03
890	Состав нейтр.атмосферы - log([HE] в м ⁻³)	1.E-03
900	Состав нейтр.атмосферы - log([H] в м ⁻³)	1.E-03
910	Log10 (давление в Па) нейтральной атмосферы	1.E-03
920	Высотный масштаб давления	1.E+01 м
<i>Векторные величины</i>		
1210	Скорость ионов в направлении 1	1. м/с
1410	Нейтральный ветер в направлении 1	1. м/с
1810	Плотность эл.тока в направлении 1	1.E-08 А/м ²
1910	Интеграл по высоте: плотн. тока в напр. 1	1.E-03 А/м
1940	Лин. интеграл поля(1 НЕМТ): плотн. тока в напр. 4	1.E-03 А/м
<i>Энергетические параметры</i>		
2110	Скорость осаждения энергии частицы	1.E-08 Вт/м ³
2120	Скорость осаждения Джоулевой энергии	1.E-08 Вт/м ³
2140	Интеграл по высоте: скорость осаждения эл. частиц	1.E-04 Вт/м ²
2150	Интеграл по высоте: скорость осаждения Джоуля эн.	1.E-04 Вт/м ²
2170	Лин. интеграл поля (1 НЕМТ): скор. осажд. эн. частиц	1.E-04 Вт/м ²

2180	Лин. интеграл поля (1 НЕМИ): скор. осажд. эн. Джоуля	1.E-04 Вт/м ²
<i>Автокорреляционная функция</i>		
3800	Масштабированная АКФ при нулевой задержке	1.
3801	Нормированная реальная АКФ при задержке 1	1.E-04
3802	Нормированная реальная АКФ при задержке 2	1.E-04
...
3834	Нормированная реальная АКФ при задержке 34	1 .E-04
3900	Коэффициент сигнала для АКФ при нулевой задержке	1.
3901	Нормированная мнимая АКФ при задержке 1	1.E-04
3902	Нормированная мнимая АКФ при задержке 2	1.E-04
.....
3939	Нормированная мнимая АКФ при задержке 34	1.E-04

Выводы. В статье приведено описание и перечень позиций *CEDAR-database* формата данных международной базы *Madrigal*, в котором задаются требования к передаче в электронный архив ионосферной информации в виде параметров плазмы и сопровождающей эксперимент информации. Для поддержки такого формата необходима разработка программ конвертации и записи данных, получаемых на радаре НР Института ионосферы, чтобы иметь возможность организации дальнейшего обмена результатами экспериментов с исследователями других стран.

Список литературы: 1. [Электронный ресурс]: <http://cedar.openmadrigal.org> 2. *CEDAR DATA BASE FORMAT // Contents.* – USA: National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, 80307. – May 2003. – 132 с. 3. *Pulyayev V.A.* Kharkov's incoherent scatter radar: the data parameters for the CEDAR DATA BASE // Proc. the Incoherent Scatter Radar Working Group Workshop: Incoherent scatter. – USA: Millstone-Hill. – 1999. – С. 19-23.

Поступила в редколлегию 01. 04. 2013

А.В. ФИСУН, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков;

Т.А. СКВОРЦОВ, д-р техн. наук, с.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ОПТИМАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ В ЛИНЕЙНОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОМ БАЗИСЕ ПРИ ЧАСТИЧНО ПОЛЯРИЗОВАННОМ СИГНАЛЕ

Синтезирован алгоритм оптимальной оценки эффекта Фарадея при наблюдении частично поляризованного сигнала в линейном поляризационном базисе. Сигнал наблюдается на выходах радиоприемных устройств, подключенных непосредственно к ортогональным вибраторам антенны.

Ключевые слова: эффект Фарадея, поляризационный базис, разность фаз, деполяризация, корреляционная матрица, функция правдоподобия.

Синтезовано алгоритм оптимальної оцінки ефекту Фарадея при спостереженні частково поляризованого сигналу в лінійному поляризаційному базисі. Спостереження сигналу ведеться на виходах радіоприймальних пристроїв, підключених безпосередньо до ортогональних вібраторів антени.

Ключові слова: ефект Фарадея, поляризаційний базис, різниця фаз, деполяризація, кореляційна матриця, функція правдоподібності.

An optimal algorithm for estimation of Faraday Effect observing a partially polarized signal in linear polarization basis is synthesized. A signal is observing at the outputs of the radio receivers that are connected directly to the orthogonal vibrators antenna.

Keywords: Faraday rotation, polarization base, phase shift, depolarization, correlation matrix, plausibility function.

Введение. В различных приложениях радиотехники встречаются ситуации, когда полезная информация содержится в поляризационных параметрах принимаемой волны. В частности, изменение наклона поляризационного эллипса в ионосфере вследствие эффекта Фарадея содержит информацию о концентрации электронов [1].

Измерение поляризационных параметров усложняется, если волна является частично поляризованной. В частности, деполяризация сигнала наблюдается при зондировании ионосферы методом некогерентного рассеяния длинными импульсами.

В работах [2, 3] приведен алгоритм оптимальной оценки разности фаз обыкновенной и необыкновенной волн при частично поляризованном сигнале при наблюдении сигнала в круговом поляризационном базисе (что равносильно измерению эффекта Фарадея).

Однако для наблюдения в круговом базисе необходимо подключить ортогональные вибраторы к приемникам через волноводный мост. При этом качество оценки зависит от качества развязки плеч моста. В частности, в

работе [4] указывается, что погрешности развязки плеч моста являются одной из главных причин ошибок измерения указанной разности фаз.

Поэтому актуальной является задача разработки алгоритма оценки эффекта Фарадея при наблюдении в линейном поляризованном базисе, то есть при подключении приемников непосредственно к ортогональным вибраторам. При этом целесообразно провести математический синтез оптимального алгоритма по критерию максимального правдоподобия.

Целью статьи является синтез оптимального алгоритма оценки эффекта Фарадея при частично поляризованном сигнале.

Синтез оценки угла наклона поляризационного эллипса. При частично поляризованном сигнале сигналы на выходе приемников, подключенных к ортогональным вибраторам, имеют вид

$$\begin{aligned} s_1(t) &= U(t)\cos[\omega t + u(t) + \Phi] + V(t)\cos[\omega t + v(t) - \Phi], \\ s_2(t) &= -U(t)\sin[\omega t + u(t) + \Phi] + V(t)\sin[\omega t + v(t) - \Phi], \end{aligned} \quad (1)$$

где U, V, u, v – случайные амплитуды и фазы составляющих с круговой поляризацией, Φ – постоянное во времени среднее смещение по фазе, определяющее средний угол наклона поляризованного эллипса.

При приеме из сигналов (1) формируются в квадратурные составляющие, которые дискретизируются во времени так, что наблюдаемые процессы имеют вид

$$\begin{aligned} y_{1k} &= s_{1k} + n_{1k}, \\ y_{2k} &= s_{2k} + n_{2k}, \\ y_{3k} &= s_{1k} + n_{3k}, \\ y_{4k} &= s_{2k} + n_{4k}, \end{aligned} \quad (2)$$

где сигналы имеют вид

$$\begin{aligned} s_{1k} &= s_1 \cos \omega t = 0.5\{U_k \cos(u_k + \Phi_i) + V_k \cos(v_k - \Phi_i)\}, \\ s_{2k} &= s_2 \cos \omega t = 0.5\{-U_k \cos(u_k + \Phi_i) + V_k \sin(v_k - \Phi_i)\}, \\ s_{3k} &= s_1 \sin \omega t = -0.5\{U_k \cos(u_k + \Phi_i) + V_k \sin(v_k - \Phi_i)\}, \\ s_{4k} &= s_2 \sin \omega t = 0.5\{-U_k \cos(u_k + \Phi_i) + V_k \cos(v_k - \Phi_i)\}, \end{aligned} \quad (3)$$

$n_{1k}, n_{2k}, n_{3k}, n_{4k}$ – некоррелированные во времени и между собою шумы приемников.

Полагаем, что дискретизация производится в соответствии с теоремой Котельникова так, что отсчеты сигналов (3) также взаимно некоррелированы во времени. Кроме того полагаем, что процессы (2)

являются нормальными. Тогда логарифм функции правдоподобия (ЛФП) вектора $Y_k = \{y_{1k}, y_{2k}, y_{3k}, y_{4k}\}$ имеет вид

$$L_k = -2 \ln(2\pi) - 2 \ln(\det R) - \frac{1}{2} Y_k R^{-1} Y_k^T, \quad (4)$$

а ЛФП выборки для M моментов времени

$$L = \sum_{k=1}^M L_k. \quad (5)$$

Вычисляя корреляционную матрицу R вектора Y_k на основании (2), (3), получим

$$R = \begin{pmatrix} A & -C & 0 & -D \\ -C & B & D & 0 \\ 0 & D & A & -C \\ -D & 0 & -C & B \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $A = 0.25P(1 + \rho \cos 2\Phi) + 0.5P_1$,

$B = 0.25P(1 - \rho \cos 2\Phi) + 0.5P_2$,

$C = 0.25P\rho \sin(2\Phi)$,

$D = 0.25mP$,

$P = P_+ + P_-$ – средняя мощность сигнала, P_+ и P_- – средние мощности

компонент с круговой поляризацией, $m = \frac{P_+ - P_-}{P}$, P_1 и P_2 – мощности шумов

приемников, $\rho = \frac{\langle UV \rangle [\cos(u-v)]}{2\sqrt{P_+ P_-}}$ – нормированная взаимная корреляционная

функция компонент с круговой поляризацией.

Обращая матрицу (6), получим

$$R^{-1} = \frac{\alpha}{\sqrt{\det R}}, \quad (7)$$

где $\alpha = \begin{vmatrix} B & C & 0 & D \\ C & A & -D & 0 \\ 0 & -D & B & C \\ D & 0 & C & A \end{vmatrix}$, $\det R = (AB - C^2 - D^2)^2$,

$$\sqrt{\det R} = \left(\frac{P}{4}\right)^2 (1 - \rho^2 - m^2) + \frac{PP_1}{8} (1 - \rho \cos 2\Phi) + \frac{PP_2}{8} (1 + \rho \cos 2\Phi).$$

При одинаковых шумах приемников ($P_1 = P_2$) величина

$\sqrt{\det R} = \left(\frac{P}{4}\right)^2 (1 - \rho^2 - m^2) + \frac{PP_1}{4}$ не зависит от параметра Φ . Тогда для

нахождения оценки следует минимизировать величину

$$L_1 = \sum_{k=1}^M Y_k \alpha Y_k^T. \quad (8)$$

Приравнявая производную (8) по параметру Φ нулю, получим

$$\frac{\partial L_1}{\partial \Phi} = \sum_{k=1}^M Y_k \frac{\partial \alpha}{\partial \Phi} Y_k^T = 0. \quad (9)$$

После подстановки производных и раскрытия матричного произведения получим

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_1}{\partial \Phi} = & \sin 2\Phi \left[\sum_{k=1}^M (y_{1k}^2 + y_{3k}^2) - \sum_{k=1}^M (y_{2k}^2 + y_{4k}^2) \right] + \\ & + 2 \cos 2\Phi \sum_{k=1}^M (y_{1k} y_{2k} + y_{3k} y_{4k}), \end{aligned} \quad (10)$$

откуда получаем оценку максимального правдоподобия

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \sum_{k=1}^M (y_{1k} y_{2k} + y_{3k} y_{4k})}{\sum_{k=1}^M (y_{1k}^2 + y_{3k}^2) - \sum_{k=1}^M (y_{2k}^2 + y_{4k}^2)}. \quad (11)$$

Выводы. В статье получен оптимальный по критерию максимального правдоподобия алгоритм измерения угла поворота наклона поляризационного эллипса частично поляризованного сигнала. Алгоритм, в частности, может быть использован при измерении концентрации электронов в ионосфере методом некогерентного рассеяния.

Список литературы: 1. Григоренко Е.И. Исследования ионосферы по наблюдениям эффекта Фарадея при некогерентном рассеянии радиоволн / Е.И. Григоренко // Ионосферные исследования. – 1979. – № 27 – С. 60-73. 2. Ткачев Г.Н. Измерение разности фаз между флуктуирующими сигналами, принятыми на ортогонально поляризованные антенны / Г.Н. Ткачев, Т.А. Скворцов, В.Д. Карлов // Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1982. – Вып. 60. – С. 57-67. 3. Карлов В.Д. Оценка точности измерения угла фарадеевского вращения плоскости поляризации некогерентно рассеянного сигнала при использовании двухканального фазоизмерителя / Карлов В.Д., Корняков С.А., Карлов Д.В., Ефимова О.В. // Системи управління, навігації і зв'язку. – 2010. – № 2(14). – С. 51-53. 4. Эванс Дж.В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж.В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139-175.

Поступила в редколлегию 29.03.2013

И. Ф. ДОМНИН, д-р техн. наук, проф., директор, Институт ионосферы, Харьков;

М. М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, в.н.с., НТЦ МТО НАН Украины, Харьков;

А. И. РЕЗНИЧЕНКО, студент, НТУ “ХПИ”

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ НЕФТЕПРОДУКТОВ ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ И КОЛИЧЕСТВА ИСТОЧНИКОВ

С помощью компьютерного моделирования электротепловых процессов при действии высокочастотного электромагнитного поля на нефтепродукты, которые находятся в железнодорожной цистерне, оценены значения оптимальных частот и количества источников, необходимых для достижения температуры нагрева от 10°C до 60°C. Показано, что использование 4-х источников ЭМП суммарной мощности P_{Σ} , расположенных вдоль длины цистерны, позволяет существенно уменьшить продолжительность нагрева по сравнению с использованием одного источника той же мощности P_{Σ} .

Ключевые слова: микроволновой нагрев, электромагнитное поле, теплоемкость, оптимальная частота, эффективность.

За допомогою комп'ютерного моделювання електротеплових процесів при дії високочастотного електромагнітного поля на нафтопродукти, які знаходяться у залізничній цистерні, оцінені значення оптимальних частот та кількості джерел щодо досягнення температур нагріву від 10°C до 60°C. Показано, що використання 4-х джерел ЕМП сумарної потужності P_{Σ} , розташованих уздовж довжини цистерни, дозволяє суттєво зменшити тривалість нагріву у порівнянні з використанням одного джерела тієї ж потужності P_{Σ} .

Ключові слова: мікрохвильовий нагрів, електромагнітне поле, теплоємність, оптимальна частота, ефективність.

The levels of the optimum frequencies and numbers of EMF sources for heating petrol from 10°C to 60°C have been estimated with the help of electrical-heating processes computer modeling for the case of radio-frequency EMF action on petrol, located in a railway cistern. It is shown that usage of four EMF sources with total power P_{Σ} , located along a cistern length allows reducing greatly heating duration in comparison with the case of one source with the same power.

Keywords: microwave heating, electromagnetic field, heat, optimal frequency, efficiency.

Введение. В конце XX – начале XXI вв. появились публикации, посвященные использованию высокочастотного электромагнитного излучения для нагрева нефтепродуктов с целью интенсификации добычи высоковязкой нефти за счет повышения ее текучести при разогреве и возрастания притока в скважину [1 – 3]. Предлагалось также использовать данную технологию для борьбы с выпадением парафинов и газогидратов, которые при определенных условиях закупоривают нефтяные и газовые

© И. Ф. Домнин, М. М. Резинкина, А. И. Резниченко, 2013

скважины или трубопроводы в процессе их эксплуатации [4, 5]. Наконец, была рассмотрена возможность реализации идеи использования передвижного источника высокочастотного электромагнитного излучения для создания “электромагнитного крота”, расплавляющего и ликвидирующего асфальто-парафиновые и газогидратные пробки в нефтепроводах [6]. Однако данные технологии все еще не доведены до промышленного применения. В большой степени это связано с тем, что для достижения ощутимого нагрева длительность обработки электромагнитным полем (ЭМП) должна составлять до десятков суток [3, 5].

Традиционно источники ЭМП размещают в торце цилиндрических резервуаров (например, нефтепроводов, скважин, цистерн), в которых находится обрабатываемая нефть. При этом увеличение частоты используемого излучения вызывает повышение эффективности нагрева, однако одновременно происходит усиление затухания ЭМП по длине протяженных цилиндрических резервуаров, что приводит к резкой неравномерности нагрева (из-за весьма теплопроводности нефтепродуктов), для выравнивания которой требуются весьма длительные периоды времени.

Целью данной работы является использование компьютерного моделирования электротепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора частоты и количества источников ЭМП, обеспечивающих снижение периода нагрева до приемлемых значений. При этом рассмотрен случай, когда необходимо расплавить образовавшиеся в нефтепродуктах тяжелые фракции при перевозке в железнодорожных цистернах.

Уравнения, описывающие электротепловые процессы микроволнового нагрева нефтепродуктов. Учитывая аксиальную симметрию задачи, для описания процесса нагрева в объеме цилиндрического резервуара, полностью заполненного нефтепродуктами, подвергающимися воздействию высокочастотного электромагнитного излучения, используем двумерное уравнение теплопроводности [3]:

$$\rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + Q(r, z, t), \quad (1)$$

где T – температура; ρ , c_T , λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность нагреваемой среды соответственно; $Q(r, z, t)$ – плотность мощности объемного тепловыделения; r и z – радиальная и азимутальная координаты.

Будем полагать, что показатель поглощения α не зависит от температуры, поскольку рассматривается случай приложения ЭМП частотой f не меньшей десятков мегагерц [3]. Если принять, что мощность излучения распределяется равномерно по сечению цилиндра, то Q можно записать в виде [3]:

$$Q = \frac{P\alpha \exp(-\alpha z)}{\pi R^2}, \quad (2)$$

где P – мощность ЭМП; R – радиус цилиндрического резервуара; $\alpha = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon'} \operatorname{tg} \delta$ [4, 5]; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; ω – круговая частота приложенного ЭМП.

Как показано в [4, 5], потери в стенках металлического резервуара малы по сравнению с высокочастотными потерями в объеме обрабатываемых нефтепродуктов, поэтому они могут не учитываться.

Рассмотрен случай теплоизолированной трубы, тогда граничные условия при $r = R$, $z = 0$, $z = H$ (где H – длина цилиндрического резервуара): $\partial T / \partial z |_{r=R} = 0$, $\partial T / \partial z |_{z=0} = 0$, $\partial T / \partial z |_{z=H} = 0$. Граничное условие при $r = 0$ – условие аксиальной симметрии – $\partial T / \partial r |_{r=0} = 0$.

При расчетах полагалось, что теплопроводность и плотность обрабатываемых нефтепродуктов не зависят от температуры их нагрева, а теплоемкость можно представить в виде функции, имеющей δ -особенность при температуре фазового перехода T_S (см., например, [5]):

$$c_T = c_0 + L\delta(T - T_S),$$

где L – скрытая теплота фазового перехода; δ – дельта-функция.

Решение задачи расчета нагрева нефтепродуктов в цистерне находилось с помощью метода конечных разностей [8]. Для этого расчетная область, представляющая собой сечение, проходящее через ось заполненной нефтепродуктами цистерны, разбивалась прямоугольной расчетной сеткой. Использовалась цилиндрическая система координат с осями r , z и учитывалась осевая симметрия. При этом ось Oz совпадала с осью цилиндра. Уравнения вида (1) записывались для всех узлов расчетной сетки и решались с помощью прогонки методом переменных направлений [8].

При численном моделировании электротепловых процессов использовались следующие значения констант: $\rho = 950$ кг/м³, $c_0 = 3$ кДж/(кг·К), $T_S = 50$ °С, $L = 300$ кДж/кг, $\lambda = 0.125$ Вт/(м·К), $\varepsilon' = 2.3$, $\operatorname{tg} \delta = 0.012$ [4, 5].

Выбор оптимальной частоты и количества источников при высокочастотном нагреве нефтепродуктов. Будем моделировать электротепловые процессы при нагреве нефти, перевозимой в железнодорожной цистерне, представляющей собой цилиндр длиной 20 м с

диаметром внутреннего сосуда 2.5 м [9]. Определим расчетным путем время, необходимое для нагрева нефти от $T_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$ до $T_{н1} = 60\text{ }^\circ\text{C}$ – температуры, превышающей температуру растворения кристаллов парафина [10].

В известных работах (см., например, [1 – 6]) описаны случаи, когда источник излучения размещается в торце цилиндрического резервуара. При этом прогрев по длине резервуара оказывается весьма неравномерным, а температура, необходимая для разогрева нефти, вследствие ее низкой теплопроводности достигается за весьма длительные промежутки времени – до десятков суток [3, 5]. Для решения данной проблемы предлагается размещать несколько источников электромагнитного излучения по длине резервуара. Для оценки оптимального количества источников ЭМП рассмотрим идеализированный случай применения источников, генерирующих плоские волны в обе стороны вдоль оси цистерны.

На рис. 1 показаны рассчитанные зависимости времени, требуемого для достижения минимальной температуры нефти $T_{н1}$ в исследуемом объеме, от частоты приложенного ЭМП для случая использования одного источника, расположенного посредине длины цистерны и излучающего ЭМП в обе стороны, при различных величинах мощности источника P . Расчеты показали, что при $P \leq 150\text{ кВт}$ время нагрева в заданном интервале температур превышает 100 ч, поэтому для данного случая мощности ниже 200 кВт при моделировании не рассматривались.

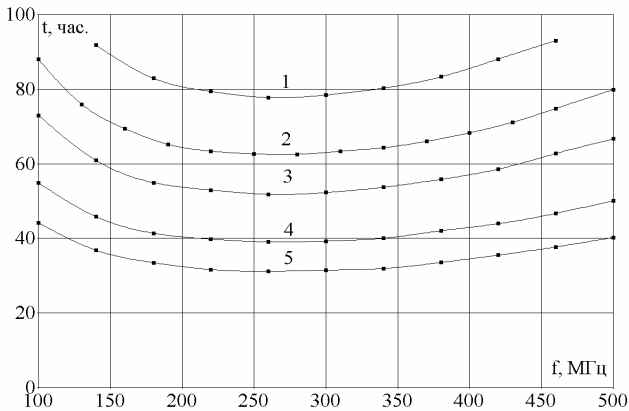


Рис. 1 – Рассчитанные зависимости t – времени, требуемого для увеличения температуры нефти от $T_0 = 10\text{ }^\circ\text{C}$ до температуры, не ниже $T_{н1} = 60\text{ }^\circ\text{C}$ в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при различной мощности источника излучения P (1 – $P = 200\text{ кВт}$, 2 – $P = 250\text{ кВт}$, 3 – $P = 300\text{ кВт}$, 4 – $P = 400\text{ кВт}$, 5 – $P = 500\text{ кВт}$)

Результаты компьютерного моделирования электротепловых процессов для рассматриваемого температурного диапазона (от $T_0 = 10^\circ\text{C}$ до $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$) при использовании 2-х одинаковых источников, расположенных на различном расстоянии от краев цистерны, показаны на рис. 2. При этом полагалось, что первый источник расположен на расстоянии L_1 , а второй – на расстоянии L_2 от одного из краев цистерны. Как видно из рисунка, наименьшее время нагрева достигается при расположении источников на расстояниях $L_1=3.5$ м, $L_2=16.5$ м (кривая 5, рис. 2). Дальнейшее приближение источников к краям цистерны приводит к возрастанию времени нагрева (см. кривую 6, рис. 2).

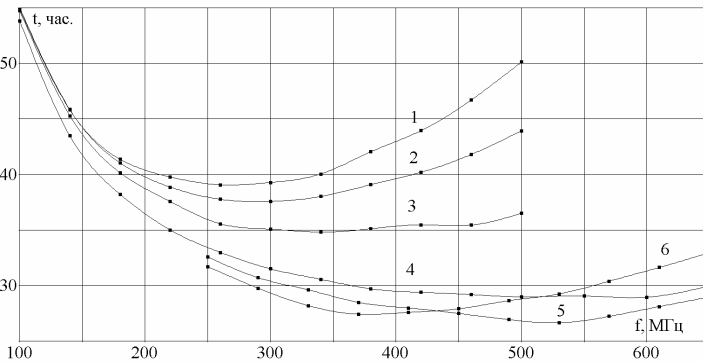


Рис. 2 – Рассчитанные зависимости t - времени, требуемого для достижения температуры нефти от $T_0 = 10^\circ\text{C}$ до температуры, не ниже $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$ в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при расположении 2-х источников на различном расстоянии от краев цистерны при суммарной мощности источников $P_\Sigma = 400$ кВт (1 – один источник, расположенный посередине цистерны; 2 – $L_1 = 6.5$ м, $L_2 = 13$ м; 3 – $L_1 = 5.5$ м, $L_2 = 15$ м; 4 – $L_1 = 4$ м, $L_2 = 16$ м; 5 – $L_1 = 3.5$ м, $L_2 = 16.5$ м; 6 – $L_1 = 3$ м, $L_2 = 17$ м)

На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования процессов нагрева нефти в цистерне от $T_0 = 10^\circ\text{C}$ до $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$ при использовании одного (кривая 1), двух (кривая 2), трех (кривая 3), четырех (кривая 4) и пяти (кривая 5) одинаковых источников, расположенных по линии цистерны на расстояниях $L_1 \dots L_5$ от ее левого края при одной и той же суммарной мощности источников $P_\Sigma = 300$ кВт.

Как видно из результатов проведенных вычислений, наименьшее время нагрева в заданном диапазоне температур обеспечивается при использовании четырех – пяти источников (см. кривые 4, 5 рис. 3).

Как видно из рис. 1 – 3, все зависимости $t(f)$ имеют минимумы, величины которых составляют от 300 до 1000 МГц.

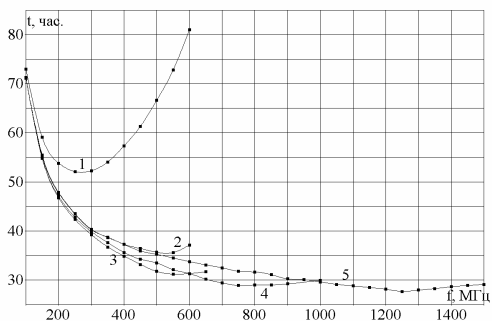


Рис. 3 – Рассчитанные зависимости t - времени, требуемого для достижения температуры нефти от $T_0 = 10^\circ\text{C}$ до температуры, не ниже $T_{н1} = 60^\circ\text{C}$ в объеме цистерны, от частоты приложенного ЭМП при расположении N источников на различном расстоянии от края цистерны при суммарной мощности источников $P_\Sigma = 300$ кВт (1 – $N = 1$, $L_1 = 10$ м; 2 – $N = 2$, $L_1 = 3.5$ м, $L_2 = 16.5$ м; 3 – $N = 3$, $L_1 = 1.5$ м, $L_2 = 10$ м, $L_3 = 18.5$ м; 4 – $N = 4$, $L_1 = 1$ м, $L_2 = 7$ м, $L_3 = 13$ м, $L_4 = 19$ м; 5 – $N = 5$, $L_1 = 1$ м, $L_2 = 5.5$ м, $L_3 = 10$ м, $L_4 = 14.5$ м, $L_5 = 19$ м).

Заключение. С помощью математического моделирования электротепловых процессов нагрева нефтепродуктов, перевозимых в железнодорожной цистерне, от 10°C до 60°C – температуры, превышающей температуру растворения кристаллов парафина, показано, что использование четырех – пяти источников электромагнитного излучения, расположенных по длине цистерны и излучающих электромагнитные волны в обе стороны, время нагрева может быть уменьшено почти в 2 раза по сравнению со случаем применения одного источника, расположенного в центре цилиндрической емкости, при одинаковой суммарной мощности.

Список литературы: 1. Bridges J.E., Krstansky J.J., Taflove A., et. al. The ITRI in-situ RF fuel recovery process // J. Microwave Power. – 1983. – Vol. 18, № 1. – P. 3-14. 2. Кислицын А.А. Численное моделирование прогрева и фильтрации нефти в пласте под действием высокочастотного электромагнитного излучения // ПМТФ. – 1993. – № 7. – С. 97-103. 3. Кислицын А.А., Нигматулин Р.И. Численное моделирование процесса нагрева нефтяного пласта высокочастотным электромагнитным излучением // ПМТФ. – 1990. – № 4. – С. 59-64. 4. Кислицын А.А. Численное моделирование высокочастотного электромагнитного прогрева диэлектрической пробки, заполняющей трубу // ПМТФ. – 1996. – Т. 37, № 3. – С. 75-82. 5. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. ВЧ метод устранения парафиновых пробок в оборудовании нефтяных скважин и нефтяных трубопроводах // Электромагнитные явления. – 1998. – Т. 1, № 4. – С. 552-561. 6. Балакирев В.А., Сотников Г.В., Ткач Ю.В., Яценко Т.Ю. Разрушение асфальто-парафиновых отложений в нефтяных трубопроводах движущимся источником высокочастотного электромагнитного излучения // Журнал технической физики. – 2001. – Т. 71, вып. 9. – С. 1-8. 7. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: Радиосвязь, 1988. – 440 с. 8. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с. 9. [Электронный ресурс]: <http://www.ngpedia.ru/id365000p1.html>. 10. [Электронный ресурс]: <http://www.findpatent.ru/patent/228/2288401.html>.

Поступила в редколлегию 05.04.2013

А.В. БОГОМАЗ, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
А.Е. МИРОШНИКОВ, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

ЭКСПРЕСС-ОБРАБОТКА ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ НА УДАЛЁННОМ СЕРВЕРЕ

В статье описаны особенности экспресс-обработки данных радара некогерентного рассеяния на стороне сервера. Представлено описание разрабатываемого программного обеспечения. Показаны результаты обработки данных на удалённом сервере.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, система обработки данных, удалённый сервер.

У статті описано особливості експрес-обробки даних радара некогерентного розсіяння на стороні сервера. Представлено опис програмного забезпечення, що розроблюється. Показано результати обробки даних на віддаленому сервері.

Ключові слова: некогерентне розсіяння, система обробки даних, віддалений сервер.

In the article the features of express incoherent scatter radar data processing on the server side are described. The description of the developed software is presented. The results of data processing on a remote server are shown.

Keywords: incoherent scatter, data processing system, remote server.

Введение. В настоящее время обработка данных радара некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы производится на многих несвязанных между собой персональных компьютерах (ПК). Этот подход имеет такие недостатки, как дублирование исходных данных, сложность отладки и поддержки кросс-платформенного программного обеспечения (ПО), высокая стоимость системы обработки в целом. Поэтому хранение и обработку данных НР целесообразно производить на удалённом сервере, который доступен с ПК операторов через вычислительную сеть.

Особенности обработки данных НР на удалённом сервере. К преимуществам обработки данных радара НР на удалённом сервере можно отнести [1]:

- быстрый доступ к данным, которые хранятся в базе данных (БД);
- удобство разработки и отладки размещаемого на сервере ПО (т.к. нет необходимости тестировать ПО на различных аппаратных и программных платформах);
- отсутствие дублирования кода программы-сервера программами-клиентами (программы-клиенты не производят обработку исходных данных);
- удобство работы оператора (нет необходимости следить за обновлением программного обеспечения);
- возможность обработки данных на любом компьютере, подключённом

© А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников, 2013

к сети, независимо от его расположения и производительности;

- возможность разгрузки сети за счёт того, что между сервером и клиентом передаются небольшие порции данных – запросы пользователя и ответы сервера (результаты обработки или сообщения об ошибках);

- возможность использования дополнительной информации и результатов предыдущих расчётов;

- возможность ограничения доступа к исходным данным.

Данная схема работы не лишена недостатков:

- неработоспособность сервера делает недееспособной программу обработки (неработоспособным следует считать сервер, производительности которого не хватает на обслуживание всех клиентов, а также, если он находится на ремонте, профилактике и т.п.);

- настройка и поддержание работы сервера требует отдельного специалиста высокой квалификации;

- высокая стоимость серверного оборудования.

Однако вышеперечисленные достоинства работы такой схемы перекрывают недостатки.

Рассмотрим систему экспресс-обработки, работающую на сервере Института ионосферы, задача которой – предоставить пользователю информацию (в текстовом и графическом виде) о присутствующих в БД данных НР: их объёме, качестве (т.е. помеховой обстановке и режимах работы приёмно-передающей аппаратуры радара), гелиогеофизической обстановке во время измерения параметров ионосферы и т.д.

ПО для экспресс-обработки данных НР на удалённом сервере.

Разрабатываемая в Институте ионосферы система экспресс-обработки данных реализует основные этапы обработки данных радара НР [2] и основана на оригинальном программном обеспечении, которое работает совместно с системой управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, программой визуализации данных gnuplot и web-сервером Apache [3]. Схема системы экспресс-обработки показана на рис. 1.

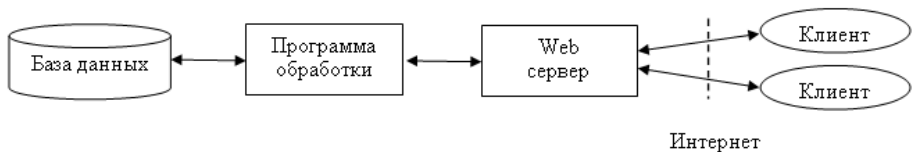


Рис. 1 – Схема системы экспресс-обработки, работающей на стороне сервера

Основное программное обеспечение представляет собой CGI-приложение (CGI – Common Gateway Interface, общий интерфейс шлюза), написанное на языке C++ с использованием фреймворка Qt. Программа запускается по запросу клиента и формирует содержание web-страницы.

В качестве СУБД, которая используется в системе экспресс-обработки данных ИР, была выбрана свободно распространяемая объектно-реляционная СУБД PostgreSQL, являющаяся реальной альтернативой коммерческой базе данных. Преимущества PostgreSQL: надёжность и устойчивость на больших нагрузках, кросс-платформленность, высокий уровень соответствия ISO/ANSI, интерфейс C++, расширяемость, высокое быстродействие, поддержка БД практически неограниченного размера.

В качестве web-сервера был выбран Apache, основными достоинствами которого считаются высокая надёжность и гибкость конфигурации.

Работа с системой экспресс-обработки, расположенной на сервере.

При обработке данных ИР на стороне сервера с использованием вышеописанного программного обеспечения пользователь имеет возможность получать результаты как в табличном (CSV – Comma-Separated Values – значения, разделённые запятой), так и в графическом формате (PNG – Portable Network Graphics – растровый формат хранения графической информации, использующий сжатие без потерь).

Главная страница (рис. 2), к которой обращается пользователь, представляет собой CGI-приложение, где формируется динамическая таблица с датами измерений, данные которых присутствуют в БД, и подготавливает универсальный указатель ресурса (URL – Uniform Resource Locator) для работы основного CGI-приложения экспресс-обработки данных радара ИР.

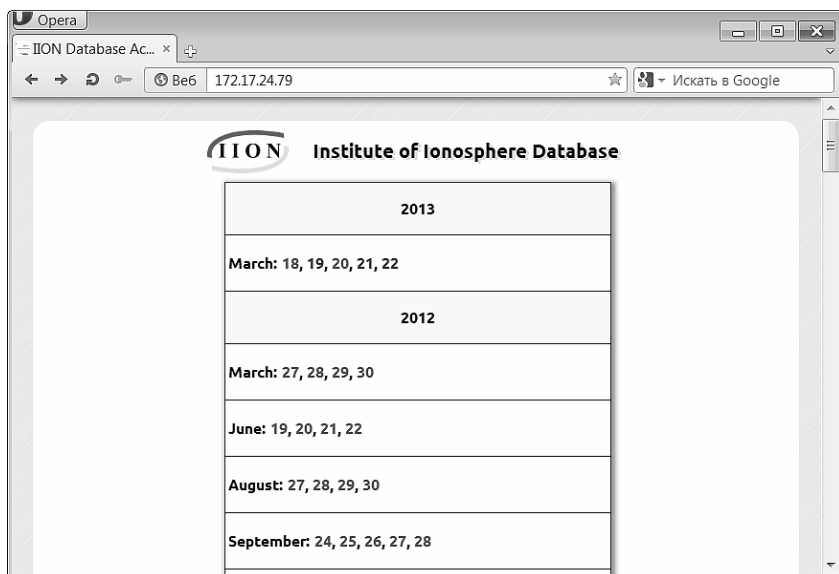


Рис. 2 – Главная страница доступа к БД

Таким образом, даты на главной странице являются ссылками, переход по которым вызывает запуск основного приложения экспресс-обработки. В настоящее время в БД Института ионосферы находятся данные, полученные на многоканальном корреляторе [4] в 2006–2013 гг.

Этапы экспресс-обработки. Обработка данных радара НР выполняется в несколько этапов:

- обработка данных пользователя и формирование запроса (на языке SQL) к БД;
- запрос к БД и получение данных;
- автоматическая фильтрация когерентных помех, присутствующих в данных, по методикам, описанным в [5–7];
- расчёт автокорреляционных функций (АКФ) шума и получение АКФ НР сигнала;
- поиск максимума сечения рассеяния и получение отношения сигнал/шум q ;
- поиск области, в которой результатам обработки из-за малого отношения сигнал/шум доверять нельзя (в которой $q < 0,1$);
- пространственная коррекция данных путём перемещения их с нижних высот [8];
- решение обратной радиофизической задачи на высоте 300 км (в кислородном приближении);
- сохранение результатов на диске и их визуализация – построение графиков суточных вариаций оценок мощности шумов, оценки отношения сигнал/шум в максимуме области F_2 и высоты этого максимума, температур ионов и электронов, области, в которой $q < 0,1$ (см. рис. 3);
- формирование web-страницы (которая, как и главная страница, соответствует стандарту HTML5 [9–10]).

Оптимизация системы экспресс-обработки. Так как основной задачей системы экспресс-обработки является оценка объёма и качества данных НР (т.е. не предъявляются серьёзные требования к точности результатов), а время выполнения обработки является критичным, то в процессе разработки программы производилась оценка времени выполнения основных этапов и оптимизация узких мест программы [11]. В частности, фильтрация помех осуществляется в нескольких потоках, а расчёт температур частиц плазмы производится с использованием рассчитанной заранее библиотеки теоретических АКФ НР сигнала, в которой учтены аппаратные особенности радара.

Выводы. Разрабатываемая в Институте ионосферы система экспресс-обработки данных радара НР, работающая на удалённом сервере, позволяет получать оценки ряда параметров ионосферы, по которым можно судить о качестве данных радара и пригодности их для более детального анализа с помощью пакета программ UPRISE [12].

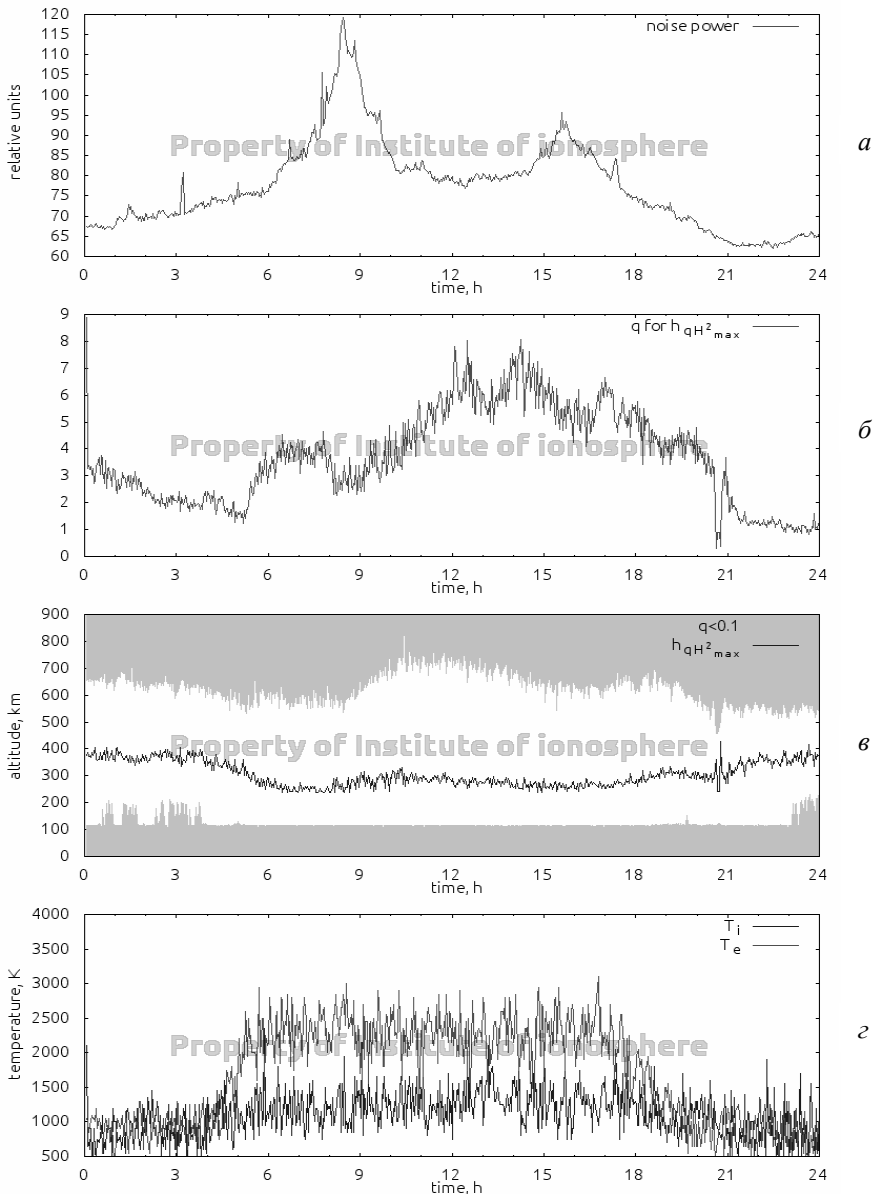


Рис. 3 – Суточные вариации параметров ионосферы для 21.03.2013 г.: *a* – мощность шумов; *б* – отношение сигнал/шум в максимуме области F2 ионосферы, *в* – высота максимума области F2 ионосферы, *г* – температуры ионов и электронов на высоте 300 км

В целом, система экспресс-обработки данных НР, работающая на стороне сервера, является логичным шагом, направленным на повышение удобства пользователей и улучшения качества обработки ионосферной информации.

Список литературы: 1. *Богомаз А.В.* Преимущества обработки данных радара НР на удалённом 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. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. – С. 27–28. 2. *Богомаз А.В.* Этапы обработки данных радара некогерентного рассеяния / *Богомаз А.В.* // Конференция молодых учёных “Дистанционное радиозондирование ионосферы (ИОН-2012)” (Харьков, Украина, 18 – 20 апреля 2012 г.). – Сборник тезисов. – 2012. – С. 7. 3. *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). 4. *Лысенко В.Н.* Корреляционная обработка сигнала некогерентного рассеяния // *В.Н. Лысенко, А.Ф. Кононенко, Ю.В. Черняк* / Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов, тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – №23. – 2004. – С. 49–62. 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 некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоев аппаратуры / *С.В. Панасенко* // Вестник НТУ «ХПИ». Радиофизика и ионосфера. – Харьков. – 2011. – № 44. – С. 40–44. 8. *Богомаз А.В.* Пространственная коррекция данных радара некогерентного рассеяния / *А.В. Богомаз, Д.В. Котов, М.Н. Сюсюк* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2012. – № 57 (963). – С. 35–42. 9. W3C HTML5. – <http://www.w3.org/TR/html5/> – 10.04.2013. 10. W3C Markup Validation Service – <http://validator.w3.org/> – 10.04.2013. 11. *Богомаз О.В.* Оптимізація процесу оцінювання параметрів іоносферної плазми у системі обробки даних радару некогерентного розсіяння / *О.В. Богомаз* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей ХХ міжнародної науково-практичної конференції (15–17 травня 2012 р., Харків). Секція 17. Навколосезний космічний простір. Радиофизика та іоносфера – Харків: НТУ «ХПИ». – 2012. – С. 205. 12. *Богомаз А.В., Котов Д.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* // (см. статью в этом сборнике).

Поступила в редколлегию 10.04.2013

Д.В. КОТОВ, н.с., Институт ионосферы, Харьков;
М.А. ШУЛЬГА, бакалавр, студент, НТУ “ХПИ”

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

В статье представлены результаты моделирования концентрации ионов H^+ в условиях химического равновесия. Моделирование проведено с использованием данных радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Проведено сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений с помощью радара НР.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, моделирование, ионы водорода.

У статті представлено результати моделювання концентрації іонів H^+ в умовах хімічної рівноваги. Моделювання проведено з використанням даних радару некогерентного розсіяння Інституту іоносфери. Виконано співставлення результатів моделювання з даними спостережень за допомогою радару НР.

Ключові слова: некогерентне розсіяння, моделювання, іони водню.

The results of modeling of H^+ ions concentration under a chemical equilibrium conditions are presented. Modeling is carried out using the Institute of the ionosphere incoherent scatter radar data. The comparison of modeled data and the results of observations are made.

Keywords: incoherent scatter, modeling, hydrogen ions.

Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет получать информацию не только о вариациях параметров ионосферной плазмы, которые принято считать основными (концентрация электронов N , температуры ионов T_i и электронов T_e). С помощью метода НР одновременно с упомянутыми параметрами возможно оценить характеристики ионного состава плазмы – абсолютные и относительные концентрации ионов различных сортов [1].

Особую роль в процессах, влияющих на состояние ионосферы Земли, играют ионы водорода H^+ . Это наиболее лёгкие ионы (их масса в 16 раз превышает массу ионов атомарного кислорода и в 4 раза – массу ионов гелия), вследствие чего их высотно-временные вариации в значительной мере подвержены влиянию динамических процессов, ответственных за ионосферно-плазмозферное взаимодействие [2, 3].

Поведение концентрации ионов водорода $N(H^+)$, как и концентрации любого другого иона, описывается уравнениями движения и непрерывности [4]. Уравнение непрерывности для ионов H^+ имеет вид:

$$\frac{\partial N[H^+]}{\partial t} = q(H^+) - L(H^+) - \operatorname{div}\Phi(H^+). \quad (1)$$

© Д.В. Котов, М.А. Шутьга, 2013

Здесь $q(\text{H}^+)$ – скорость образования ионов H^+ , $L(\text{H}^+)$ – скорость потерь за счёт химических процессов, $\text{div } \Phi(\text{H}^+) = \text{div}(N(\text{H}^+) \mathbf{v})$ – источник образования (или потерь) ионов за счёт процессов переноса, \mathbf{v} – скорость переноса.

Уравнение (1) для стационарных условий ($\frac{\partial N[\text{H}^+]}{\partial t} = 0$) может иметь два асимптотических решения, соответствующих химическому либо диффузионному равновесию. Химическое равновесие имеет место при условии $q(\text{H}^+) = L(\text{H}^+)$.

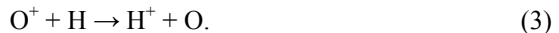
Поскольку моделирование динамических процессов и рассмотрение их влияния на распределение $N(\text{H}^+)$ представляет собой весьма сложную задачу, на первом этапе целесообразно сравнить результаты наблюдений вариаций $N(\text{H}^+)$ с результатами моделирования $N(\text{H}^+)$ в предположении наличия в рассматриваемой области ионосферы условий химического равновесия для ионов H^+ . Полученные результаты позволят качественно оценить сравнительное влияние химических и динамических процессов на наблюдаемые вариации $N(\text{H}^+)$.

Цель работы – провести моделирование суточных вариаций концентрации $N(\text{H}^+)$ в предположении химического равновесия для ионов H^+ , после чего сравнить результаты экспериментальных исследований с результатами моделирования и сделать выводы о степени влияния динамических процессов на вариации ионов водорода, наблюдаемые с помощью радара НР Института ионосферы.

Моделирование. Как известно, поведение ионов водорода в различных областях ионосферы контролируется различными процессами. На нижних высотах главным процессом, определяющим концентрацию ионов H^+ , является процесс резонансного обмена зарядом между ионами водорода и атомами кислорода (O) [2]:



Почти с такой же скоростью процесс обмена зарядом протекает в обратном направлении – ионы O^+ исчезают, отдавая свой заряд нейтральным атомам водорода (2)



В условиях химического равновесия концентрация ионов H^+ определяется двумя указанными выше конкурирующими процессами. Величина этой концентрации может быть оценена с помощью выражения, учитывающего скорости протекания реакций (2) и (3), следующим образом [2]:

$$N[\text{H}^+] = 1.13 \frac{N(\text{O}^+) N(\text{H})}{N(\text{O})} \sqrt{\frac{T_n}{T_i}}. \quad (4)$$

Здесь T_n , T_i – температуры нейтральных атомов и ионов соответственно, $N(\text{O}^+)$, $N(\text{O})$, $N(\text{H})$ – концентрации ионов атомарного кислорода, атомов нейтрального кислорода и водорода соответственно.

При теоретическом моделировании концентрации H^+ необходимо использовать модель нейтральной атмосферы (T_n , $N(\text{O})$, $N(\text{H})$), а также модели температуры ионов и ионного состава ($N(\text{O}^+)$). Наиболее надёжной среди таких моделей является модель нейтральной атмосферы. Модели же температур заряженных частиц и ионного состава до настоящего времени всё ещё не обеспечивают удовлетворительную точность прогнозируемых оценок температур и – в особенности – концентраций ионов [5]. Вследствие этого результаты моделирования $N(\text{H}^+)$ в соответствии с выражением (4) могут содержать значительные систематические ошибки, что не позволит корректно сравнить данные наблюдений и моделирования.

В настоящей работе для моделирования помимо модельных данных (T_n , $N(\text{O})$, $N(\text{H})$) использовались экспериментальные данные ($N(\text{O}^+)$ и T_i). Такой подход позволил получить максимально достоверные результаты моделирования $N(\text{H}^+)$, поскольку измеренные значения $N(\text{O}^+)$ и T_i полностью соответствуют (с точностью до погрешности измерений) значениям, которые эти параметры принимали в рассматриваемых условиях в конкретный момент времени на данной высоте.

Экспериментально полученные для дат, близких к весеннему и осеннему равноденствиям, зимнему и летнему солнцестояниям в минимуме солнечной активности, вариации концентрации ионов водорода, а также результаты моделирования этих вариаций в соответствии с выражением (4) представлены на рисунках 1, 2.

Обсуждение результатов. Рассмотрение результатов наблюдений и соответствующих результатов моделирования позволили выявить следующие основные особенности.

Результаты моделирования $N(\text{H}^+)$ очень хорошо согласуются с данными наблюдений в околополуденные часы. В то же время, для всех сезонов в вечерние и ночные часы расхождения между результатами эксперимента и моделирования весьма значительны, причём результаты наблюдений на порядок превышают модельные значения для зимы, весны и осени, и в 2 – 3 раза – для лета.

По всей видимости, это свидетельствует о возникновении в вечерние часы достаточно сильных потоков плазмы, направленных на протяжении ночных часов из плазмосферы в ионосферу и приводящих к увеличению концентрации ионов водорода на высоте 505 км.

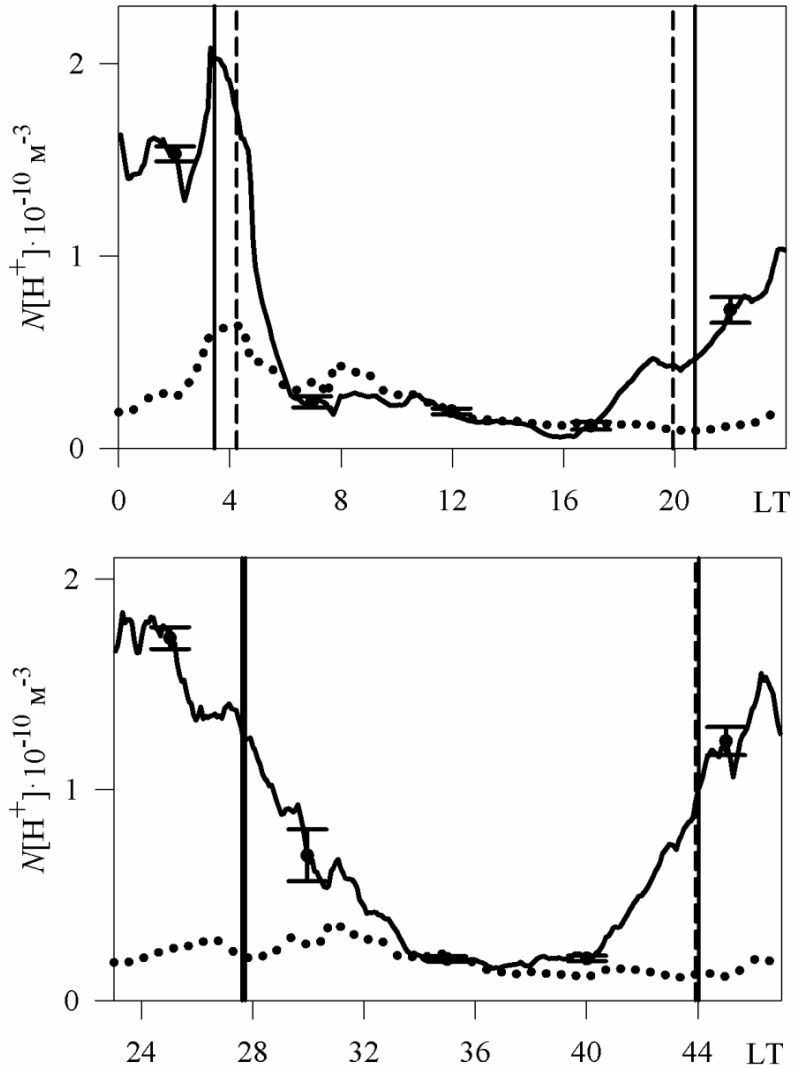


Рис. 1 – Суточные вариации концентрации ионов H^+ на высоте 505 км 25 марта 2009 г. (верхняя панель) и 30 сентября 2009 г. (нижняя панель). Здесь и далее сплошной линией показаны данные радара НР Института ионосферы, точками – результаты моделирования $N(\text{H}^+)$ в предположении химического равновесия для этих ионов

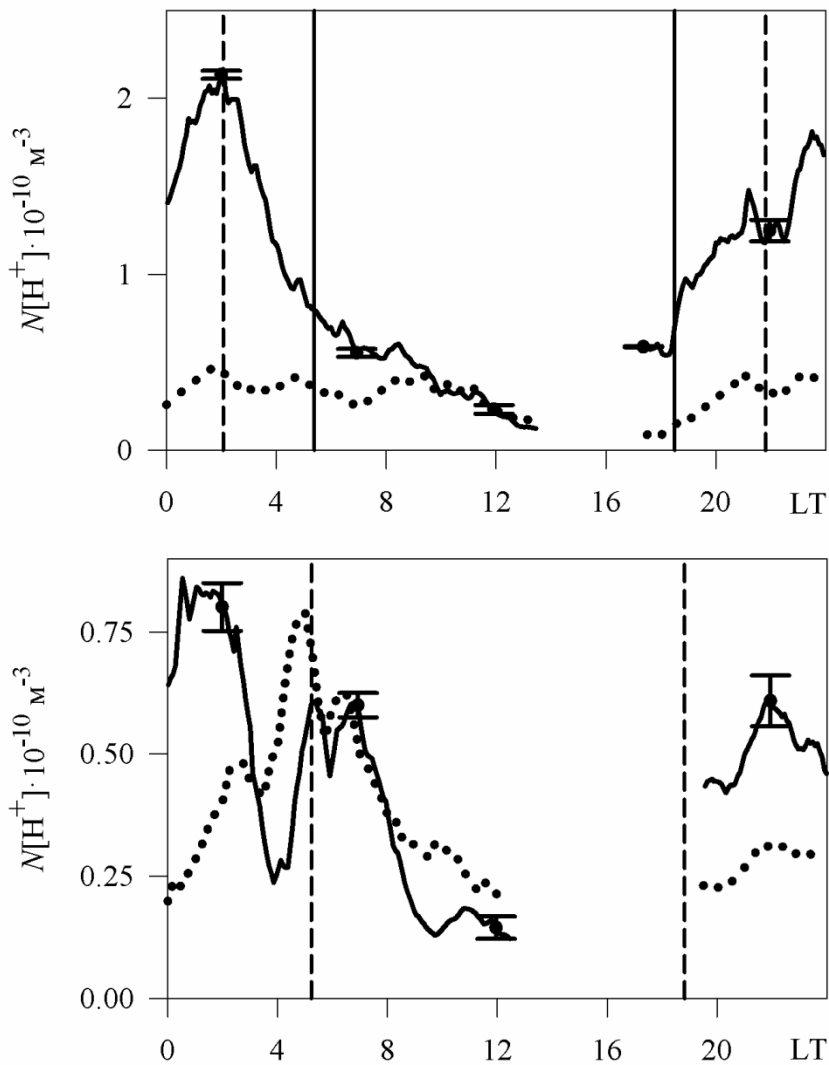


Рис. 2 – Суточные вариации концентрации ионов H^+ на высоте 505 км 20 декабря 2007 г. (верхняя панель) и 23 июня 2010 г. (нижняя панель)

Данное предположение хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований высотно-временных вариаций скорости переноса ионосферной плазмы над радаром Института ионосферы. Согласно

этим исследованиям, в условиях минимума солнечной активности в вечерние и ночные часы наблюдаются нисходящие (направленные из плазмосферы в ионосферу) потоки плазмы. В околополуденные часы около высоты 500 км скорость переноса плазмы близка к нулю. Следовательно, для дневных условий распределение концентрации ионов H^+ оказывается близким к распределению, характерному для условий химического равновесия (или же к условиям статического диффузионного равновесия для случая $N(H^+) \ll N(O^+)$, которое также может реализовываться в дневное время на рассматриваемой высоте [2]).

Список литературы: 1. *Taran V.I.* Hydrogen Ion Study with Incoherent Scatter Method. 1. Comparison of Results Obtained at Kharkov, Arecibo and Millstone Hill Radars / *V.I. Taran, Ye.I. Grigorenko* // X Joint International Symposium "Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics" (July 2–5, 2002, Tomsk.) – 2002. – D3-17. 2. *Брюнелли Б.Е.* Физика ионосферы. / *Б.Е. Брюнелли, А.А. Намгаладзе.* – М.: Наука, 1988. – с. 528. 3. *MacPherson B.* The effects of meridional neutral winds on the $O^+ - H^+$ transition altitude over Arecibo / *B. MacPherson, S.A. Gonzalez, G.J. Barley, R.J. Moffett, M.P. Sulzer* // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103. – №. A12. – P. 29183-29198. 4. *Millward G.H.* A Coupled Thermosphere-Ionosphere-Plasmasphere Model, СТИР. / *G.H. Millward, R.J. Moffett, S. Quegan, T.J. Fuller-Rowell* // STEP Handbook of Ionospheric Models, edited by R.W. Schunk, Utah State Univ. – 1996 b. 5. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. / *Bilitza D., Reinisch B.W.* // Adv. Space Res. – 2008. – № 42. – P. 599-609.

Поступила в редколлегию 17.04.2013

Д.А. ДЗЮБАНОВ, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. отделом,
Институт ионосферы, Харьков;

Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом,
Институт ионосферы, Харьков;

А.А. ЛОЙКО, магистр, студент, НТУ “ХПИ”

ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ МАКСИМУМА F-ОБЛАСТИ ПО ДАНЫМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Приводятся результаты расчета дневного профиля электронной концентрации на основе решения уравнения непрерывности. В расчетах используются экспериментальные значения температур заряженных частиц и данные о скорости движения плазмы на высоте 300 км. В процессе анализа согласованности ионосферных параметров вычисляется вертикальная составляющая скорости движения плазмы, обусловленная термосферным ветром.

Ключевые слова: динамика ионосферы, нейтральная атмосфера, метод некогерентного рассеяния, скорость движения ионосферной плазмы, термосферный ветер.

Наведено результати розрахунку денного профілю електронної концентрації на основі розв'язання рівняння безперервності. В розрахунках використано експериментальні значення температур заряджених частинок та дані про швидкість руху плазми на висоті 300 км. При аналізі узгодженості іоносферних параметрів розраховується вертикальна складова швидкості руху плазми, що обумовлена термосферними вітрами.

Ключові слова: динаміка іоносфери, нейтральна атмосфера, метод некогерентного розсіяння, швидкість руху іоносферної плазми, термосферний вітер.

The results of calculation of daytime electron density profile using continuity equation are presented. Experimental data of charged particle temperatures and plasma transport velocity at 300 km are used. At analysis of ionospheric parameters agreement vertical component of plasma velocity, caused by thermospheric wind is calculated.

Keywords: dynamics of the ionosphere, neutral atmosphere, incoherent scatter method, ionospheric plasma transport velocity, thermospheric wind.

Введение. Динамические процессы играют важнейшую роль в поведении ионизированной и нейтральной составляющих верхней атмосферы. Нейтральная компонента постоянно находится в движении под влиянием большого количества факторов: нагрева солнечным излучением, солнечного и лунного приливов, волновых процессов в атмосфере, передачи энергии из тропосферы на ионосферные высоты во время мощных природных катаклизмов – ураганов, цунами, землетрясений. Картина усложняется еще и силами Кориолиса, обусловленными вращением Земли, и многими другими факторами. В своем движении нейтральная компонента увлекает ионизированную составляющую вследствие относительно низкой степени ионизации плазмы (порядка 10^{-3} на ионосферных высотах).

© Д.А. Дзюбанов, Л.Я. Емельянов, А.А. Лойко, 2013

Ионизированная компонента, кроме этого, диффундирует сквозь нейтральный газ и подвержена электромагнитному дрейфу. Результирующая скорость движения плазмы является суммой скоростей перечисленных факторов (диффузии, переноса нейтральным ветром и электромагнитного дрейфа), вклад каждого из которых меняется в зависимости от гелиогеофизических условий. Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет измерить вертикальную составляющую общей скорости совместно с другими параметрами ионосферы (концентрации электронов, температур ионов и электронов, ионного состава и др.). Результаты измерений дают возможность объяснить вариации ионосферных параметров в течение суток, сезонов и при различных уровнях солнечной активности.

Цель статьи – выделение составляющую скорости движения, плазмы, обусловленную ее увлечением термосферным ветром, с привлечением результатов измерений электронной концентрации, температур заряженных частиц и общей скорости движения плазмы. Это можно сделать, решая уравнение непрерывности и анализируя вклад каждой компоненты скорости.

Физические процессы, обуславливающие движения плазмы на ионосферных высотах. Несомненно, основным движением нейтральной верхней атмосферы является движение под воздействием солнечного излучения от более нагретых областей к более холодным, т.е. с дневной стороны на ночную. Массы вещества в этом процессе снова возвращаются на дневную сторону, формируя при этом картину так называемой глобальной термосферной циркуляции. В силу того, что степень ионизации плазмы на ионосферных высотах составляет примерно 10^{-3} , за счет достаточно интенсивной частоты столкновений нейтральных и ионизированных частиц, происходит увлечение ионосферной плазмы движущимся нейтральным газом. Может, однако, происходить и обратный процесс (увлечение нейтральной составляющей ионосферной плазмы), но постоянные времени этих процессов существенно различны. Так, для высоты 300 км время реагирования ионосферы на движение атмосферы составляет 2 с, а время реагирования атмосферы соответственно 1800 с [1]. Следует отметить, что наличие магнитного поля Земли вынуждает заряженные частицы двигаться вдоль магнитных силовых линий. Это же относится к диффузионному движению под действием сил, обусловленных градиентами давления за счет изменения с высотой температуры и концентрации частиц.

Наличие геомагнитного поля в такой ситуации приводит к двум важным особенностям в динамике плазмы.

1. Частицы движутся вдоль магнитных силовых линий, изменяя направление движения относительно термосферного ветра и сил давления.

2. Тот факт, что геомагнитные полюса не совпадают с географическими (например северный геомагнитный полюс находится на $82^{\circ}07'$ с. ш. $114^{\circ}04'$ з. д.) и что ось магнитного диполя наклонена к оси вращения Земли под углом близким к 11.5° , приводит к отсутствию сферической симметрии

свойств ионизированной части верхней атмосферы. Поэтому эти свойства в любом регионе являются уникальными и данные ионосферных наблюдений в каждом регионе также уникальны. Эффективное построение глобальных моделей ионосферных процессов невозможно при использовании только лишь данных, полученных традиционно в западном полушарии. Данные радара НР Института ионосферы успешно дополняют данные других исследовательских комплексов. Перенос вещества в ионосферной плазме играет не менее важную роль в процессах образования и сохранения ионосферы, чем ионизация и рекомбинация.

Уравнение непрерывности. Вариации электронной концентрации в F-области ионосферы определяются тремя основными процессами: ионизацией нейтрального газа солнечным излучением, рекомбинацией и динамическими процессами. Последние включают в себя диффузию и перенос плазмы под действием термосферных ветров и электрических полей. Если обозначить суммарную скорость переноса как v_i , то изменение концентрации электронов за счет этого процесса определяется дивергенцией потока частиц $n_i v_i$. При использовании общепринятых обозначений q и L для скоростей процессов ионообразования и рекомбинации, уравнение непрерывности, описывающее совместное действие этих процессов, представляется выражением [2, 3]

$$\frac{dn_i}{dt} = q_i - L_i - \text{div}(n_i v_i),$$

где n_i – концентрация ионов.

Это уравнение выполняется для каждой i -й ионизированной составляющей. При этом соблюдается условие электронейтральности плазмы, т.е. электронная концентрация n_e равна суммарной концентрации всех ионных компонент $n_e = \sum n_i$.

В слое F2 ионосферы, где основным ионом является атомный кислород O^+ , распределение электронной концентрации представляется уравнением непрерывности, которое в диффузионном приближении записывается в виде [2]:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{in} \sin^2 I \left(\frac{\partial n_i}{\partial z} + A n_i \right) - w n_i \right] - \beta n_i + q,$$

где D_{in} – коэффициент диффузии ионов O^+ через нейтральный газ,

$$A = \frac{T_e}{n_i T_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{m_i g}{k T_i} + \frac{1}{T_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z}, \quad T_e \text{ и } T_i \text{ – температуры электронов и ионов, } k \text{ –}$$

постоянная Больцмана, β – коэффициент линейной рекомбинации, m_i – масса иона, g – ускорение свободного падения. Вертикальная составляющая движения плазмы за счет термосферного ветра и дрейфа в скрещенных электрическом и магнитном полях w вычисляется по формуле:

$$w = v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_x}{B} \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D,$$

где v_{nx} , v_{ny} – зональная и меридиональная компоненты термосферного ветра, B , I , D – индукция, углы наклона и склонения геомагнитного поля, E_x , E_y – меридиональная и зональная компоненты электрического поля. При этом предполагается, что оси координат направлены: x на юг, y на восток и z вертикально вверх.

Электрическое поле возникает в динамо-области на высоте примерно 110 км. Высокая проводимость ионосферной плазмы способствует переносу электрического поля в F-область. Здесь это поле вызывает дрейф плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Если в последнее выражение подставить значение склонения магнитного поля, которое для Харькова равно 7 градусам, то слагаемое с множителем $\sin D$ будет гораздо меньше слагаемого, содержащего $\cos D$, и им можно будет впоследствии пренебречь. Выражение для вертикальной скорости за счет увлечения термосферными ветрами и электромагнитного дрейфа может быть записано как

$$w = v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D.$$

В самом общем случае, если считать, что с высотой изменяются все ионосферные параметры, включая электронную концентрацию, электронную и ионную температуры, среднюю массу ионов, выражение вертикальной скорости переноса плазмы можно записать в виде

$$v_z = -D_a \sin^2 I \left[\frac{1}{n_i} \frac{\partial n_i}{\partial z} + \frac{m_i g}{k(T_e + T_i)} + \frac{1}{T_e + T_i} \frac{\partial (T_e + T_i)}{\partial z} \right] + v_{nx} \sin I \cos I \cos D - v_{ny} \sin I \cos I \sin D + \frac{E_y}{B} \cos I \cos D,$$

где $D_a = k(T_e + T_i) / m_i v_{in}$ – коэффициент амбиполярной диффузии, v_{in} – частота столкновения ионов с нейтральными частицами. В данном случае основным ионом, который диффундирует в F-области через нейтральный газ будем считать ионы атомного кислорода, так как они являются преобладающими. Нейтральную атмосферу будем считать состоящей из смеси атомного кислорода с концентрацией $n(O)$, молекул кислорода и азота с концентрациями $n(O_2)$ и $n(N_2)$, распределенных по барометрическому закону с температурой T_n .

Решение уравнения непрерывности с привлечением экспериментальных данных. Метод НР позволяет определять скорость перемещения ионосферной плазмы как единого целого. Принцип измерения скорости базируется на известном эффекте Доплера, проявляющемся в том,

что движение плазмы в импульсном объеме вдоль луча радара приводит к частотному смещению спектра рассеянного сигнала. При движении в направлении радара частота принятого сигнала увеличивается, при движении от радара – уменьшается. При несущей частоте радара Института ионосферы около 158 МГц изменение скорости движения плазмы на 1 м/с приводит к изменению доплеровского сдвига спектра рассеянного сигнала примерно на 1 Гц. Поэтому для определения скорости с приемлемой для геофизических задач точностью (несколько метров в секунду) необходимо обеспечить высокую стабильность частоты излучения и радиоприёмной системы [4, 5].

Используя в составе радара ИР Института ионосферы зенитную антенну, осуществляются прямые измерения вертикальной составляющей скорости плазмы v_z . Методика определения v_z с применением корреляционного анализа принятого ИР сигнала описана, например, в [6]. Зондирование ионосферы осуществляется составным двухчастотным радиоимпульсным сигналом, один из элементов которого длительностью около 650 мкс предназначен для определения концентрации электронов, температур ионов и электронов, скорости движения ионосферной плазмы и ионного состава по измеренным корреляционным функциям рассеянного ионосферой сигнала. Второй элемент длительностью 120 мкс используется для определения мощности ИР сигнала с целью коррекции профиля электронной концентрации.

Для исследования физической картины процессов переноса в ионизированной и нейтральной составляющих верхней атмосферы предлагается следующий алгоритм. Определяются высотные зависимости вертикальной составляющей общей скорости переноса плазмы. По данным об электронной концентрации и о температурах заряженных частиц, а также с привлечением ряда модельных представлений вычисляются высотные зависимости диффузионной скорости. Вычитая из общей скорости компоненту, обусловленную диффузией, рассчитывается движение плазмы за счет увлечения её термосферным ветром и за счет электромагнитного дрейфа. Разделить влияние двух последних факторов сложно, несмотря на существование моделей электрических полей. Поскольку влияние термосферных ветров в средних широтах носит определяющий характер, можно считать это влияние основным.

Пользуясь методикой численного решения уравнения непрерывности, изложенной в [2], было рассчитано высотное распределение электронной концентрации для условий летней околополуденной ионосферы при средней солнечной активности. При этом для расчета характеристик рекомбинационных и диффузионных процессов использовались экспериментальные данные о высотных распределениях температур электронов и ионов. Также, в соответствии с изложенным выше, были использованы результаты измерений v_z . Рассчитанный высотный профиль концентрации электронов n_e приведен на рис. 1. На этом же рисунке нанесены измеренные значения n_e .

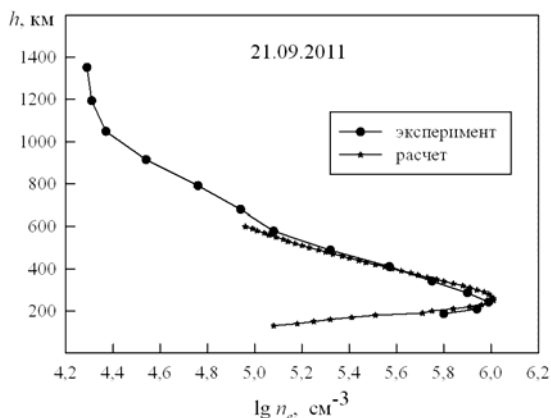


Рис. 1 – Высотные профили концентрации электронов

Видно достаточно хорошее согласие результатов расчёта и эксперимента (отличие на 17 км по высоте максимума и на 0,05 по $\lg n_e$). Также это свидетельствует об адекватности используемой схемы расчётов и о том, что температуры заряженных частиц, использовавшиеся в расчётах, дают правильные значения коэффициентов рекомбинации и характеристик диффузионного потока частиц.

Обсуждение результатов. Помимо профиля концентрации электронов, были получены высотный профиль скорости движения плазмы v_z и значение вертикальной составляющей термосферного ветра на высоте 300 км. Поэтому целесообразно было провести сопоставление измеренного профиля v_z и профиля, полученного при решении уравнения непрерывности. Для анализа величины вертикальной составляющей скорости плазмы, обусловленной увлечением нейтральным ветром, по модели HWM93 был произведен расчёт скорости горизонтального нейтрального ветра на уровне термосферы, а именно на высоте 300 км. Принимая во внимание наклонение и склонение геомагнитного поля, эта скорость была пересчитана на вертикальное направление. Целью такого сопоставления должны быть рекомендации по корректировке модельных представлений, основываясь на данных эксперимента.

На рис. 2 видно качественное согласие высотного хода экспериментальных и расчётных величин скорости движения плазмы. Однако на высоте 300 км эти значения отличаются на 12 м/с. Расчётные же значения на высоте 600 км положительны, в то время как экспериментальные данные говорят о хотя и небольшом, но нисходящем движении плазмы на этой высоте ($v_z < 0$).

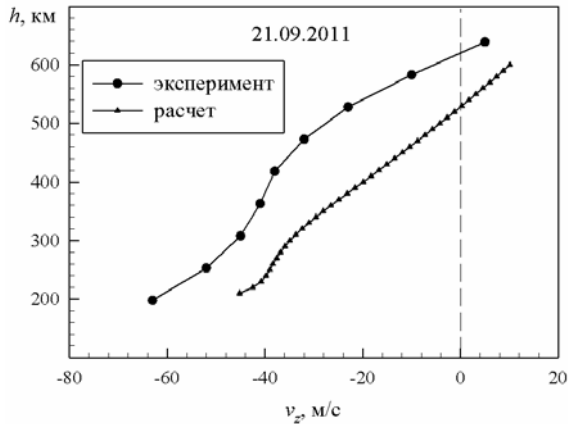


Рис. 2 – Высотные профили вертикальной составляющей скорости движения плазмы

Решение уравнения непрерывности дает значение вертикальной составляющей скорости увлечения нейтральным ветром -3 м/с на высоте F-области (300 км). Расчет же по модели HWM93 дает величину порядка -14 м/с. Разницу в расчётных и модельных значениях этой скорости можно отнести на счет несовершенства модели HWM93, которая постоянно совершенствуется. Различие в направлениях и величинах потоков на границе ионосфера-плазмосфера дает основание для дальнейшего исследования процессов переноса вещества в этой области в дневное время и, при необходимости, корректировки схемы расчета.

Выводы. Решение уравнения непрерывности с использованием экспериментальных данных позволяет оценить вертикальную составляющую скорости движения ионосферной плазмы, обусловленную термосферным ветром.

Список литературы: 1. Ратклифф Дж.А. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. – М.: Мир, 1975. – 296 с. 2. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 190 с. 3. Брюнелли Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с. 4. Емельянов Л.Я., Скляров И.Б., Черняев С.В. Вопросы снижения влияния зондирующего сигнала на точность измерения скорости движения ионосферной плазмы // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2002. – № 9. – С. 25-28. 5. Емельянов Л.Я. Обоснование характеристик радара для определения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск «Радиофизика и ионосфера». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2004. – № 23. – С. 29-36. 6. Yemelyanov L.Ya., Dzyubanov D.A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, № 14. – P. 1313-1327.

Поступила в редколлегию 29.04.2013

С.В. ГРИНЧЕНКО, н.с., Институт ионосферы, Харьков

ПЛАНЕТАРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, МАССОВОЙ ПЛОТНОСТИ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЕТРОВ НЕЙТРАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Приведены высотные профили и планетарные распределения параметров нейтральной атмосферы. Рассмотрен алгоритм построения скалярного поля атмосферных параметров средствами языка Фортран. Температура нейтральных частиц, химический состав нейтрального газа, массовая плотность рассчитывались по модели NRLMSISE00. Меридиональные и зональные составляющие векторов горизонтальной скорости нейтрального газа вычислялись по модели HWM93. Выявлены особенности высотного и широтно-долготного распределения атмосферных параметров.

Ключевые слова: нейтральная атмосфера, модель NRLMSISE00, модель HWM93, Фортран, нейтральная температура, химический состав атмосферы, массовая плотность, горизонтальный ветер.

Наведено висотні профілі і планетарні розподіли параметрів нейтральної атмосфери. Розглянуто алгоритм побудови скалярного поля атмосферних параметрів засобами мови Фортран. Температура нейтральних частинок, хімічний склад нейтрального газу, масова густина розраховувалися за моделлю NRLMSISE00. Меридіональні і зональні складові векторів горизонтальної швидкості нейтрального газу обчислювалися за моделлю HWM93. Проаналізовано особливості висотного і широтно-довготного розподілу атмосферних параметрів.

Ключові слова: нейтральна атмосфера, модель NRLMSISE00, модель HWM93, Фортран, нейтральна температура, хімічний склад атмосфери, масова густина, горизонтальний вітер.

Altitude profiles and planetary distributions of neutral atmospheric parameters are presented. The algorithm of atmospheric parameters scalar field construction by means of Fortran language is considered. Temperature of neutral particles, chemical composition of the neutral gas and mass density are calculated from NRLMSISE00 model. Meridional and zonal components of the horizontal neutral gas velocity were calculated from the model HWM93. The features of atmosphere parameter latitude-longitude distributions are revealed.

Keywords: neutral atmosphere, NRLMSISE00 model, HWM93 model, Fortran, neutral temperature, atmosphere chemical composition, mass density, horizontal wind.

Постановка задачи. Изучение нейтральной атмосферы является актуальным для теоретического моделирования ионосферы, так как фотоионизация нейтральных молекул является первопричиной существования ионосферы. Химический состав нейтральной атмосферы, её тепловой и ветровой режим оказывают влияние на ионосферные параметры (температуру ионов и электронов, концентрацию электронов, ионный состав, скорость движения плазмы). Нейтральная атмосфера и ионосфера находятся во взаимосвязи. Состояние ионосферы оказывает обратное влияние на нейтральную атмосферу. Ионосфера передаёт нейтральному газу энергию

© С.В. Гринченко, 2013

солнечного ионизирующего излучения по цепочке “фотоны → фотоэлектроны → тепловые электроны → ионы → нейтральные частицы атмосферы”. Ионосферные токи посредством соударений с нейтральными частицами изменяют атмосферную динамику в области высот термосферы.

Для теоретических расчётов ионосферных параметров необходимо задаваться параметрами нейтральной атмосферы. Основные параметры нейтральной атмосферы – её температура и концентрации компонент (N_2 , O_2 , N, O, He, H, Ar), скорость горизонтальных ветров. Параметры атмосферы изменяются в зависимости от гелиогеофизических условий. На основании регулярных спутниковых измерений, а также при использовании данных некогерентного рассеяния и других радиофизических методов в настоящее время в мире построен ряд эмпирических моделей нейтральной атмосферы.

Основная задача данной работы – используя эмпирические модели нейтральной атмосферы, выявить особенности широтно-долготного распределения её параметров.

Обзор эмпирических моделей расчёта атмосферных параметров.

Для вычисления температуры и химического состава атмосферы широко используется модель MSIS. В 1977 году появилась первая версия этой модели [1, 2]. В результате накопления экспериментальных данных об атмосферных данных были созданы обновлённые версии этой модели: MSIS83 [3], MSIS86 [4], MSIS90 [5], NRLMSISE00 [6]. Подпрограммы MSIS90 и NRLMSISE00 позволяют рассчитывать параметры нейтральной среды при магнитных бурях. Модель NRLMSISE00 даёт возможность вычислять концентрацию возбуждённого атомарного кислорода.

Входными параметрами модели NRLMSISE00 являются номер дня в году, высота, географические широта и долгота, местное или мировое время, усреднённый индекс $F_{10.7}$ солнечной активности, индекс $F_{10.7}$ в день, предшествующий дню моделирования, набор значений магнитного индекса A_p (среднее значения индекса в день моделирования, трёхчасовые значения за 3, 6, 9 часов до времени вычисления модельных значений, а также усреднённые значения индекса от 12 до 33 часов и от 36 до 57 часов до указанного времени).

Horizontal Neutral Wind Model 93 (HWM93) – эмпирическая модель горизонтального нейтрального ветра. Она основана на данных ветра, полученных с помощью спутниковых измерений. Первая версия модели (HWM87), выпущенная в 1987 году [7], описывала ветры выше 220 км. С включением данных ветра, полученных при помощи радара некогерентного рассеяния и оптических интерферометров, модель HWM90 [8] была расширена вниз до 100 км. С использованием метеорных данных версия модели HWM93 [9] была расширена до поверхности Земли. Модель учитывает вариации солнечной активности и магнитного поля Земли для магнитоспокойных условий.

Модель HWM93 позволяет рассчитывать меридиональный ветер

(положительное значение обозначает северное направление) и зональный ветер (положительное значение которого соответствует восточному направлению). Входными параметрами модели являются номер дня в году, высота, географические широта и долгота, местное время, усреднённый индекс $F_{10.7}$ солнечной активности, индекс $F_{10.7}$ в предыдущий день, магнитный индекс A_p в день моделирования.

Модель HWM07 [10] даёт возможность рассчитывать горизонтальный ветер при магнитных бурях.

В программном коде всех версий модели MSIS наблюдается преемственность. Для версий модели HWM этого нет, фортрановский код модели HWM07 написан заново. Так как модель HWM07 не отражает зависимости величины ветров спокойной ионосферы от уровня солнечной активности, то для дальнейших вычислений распределений параметров нейтральной атмосферы будем использовать модели NRLMSISE00 и HWM93

Алгоритм построения скалярного поля нейтральной температуры.

Создание рисунков планетарного распределения параметров нейтральной атмосферы рассмотрим на примере распределения температур нейтральных частиц атмосферы. Так как температура (как и другие параметры атмосферы) рассчитываются по подпрограммам, написанным в фортрановском коде, то и рисунки представляется удобным создавать средствами языка Фортран. Представленные ниже рисунки – это части изображения экрана компьютера.

Экран растрового дисплея представляется в виде прямоугольной сетки с осями x и y . Начало дискретной координатной сетки находится в верхнем левом углу. Ось x направлена вправо, ось y направлена вниз. Такая модель плоскости растрового дисплея называется растровой плоскостью. Массив прямоугольных ячеек растровой плоскости называется растровым массивом. Каждая ячейка растрового массива соответствует одному пикселю экрана. Растровое изображение создаётся путём закраски ячеек растрового массива в тот или иной цвет. Цветное изображение создаётся комбинацией базовых цветов, в качестве которых используются красный, зелёный и синий цвета (система цветов RGB). RGB -значение каждого пикселя изменяется от 000000_{16} до $FFFFFF_{16}$ в шестнадцатеричной системе счисления. Количество цветов равно $16^6 = 256^3 = 16777216$. Для черно-белой печати достаточно использовать серые цвета, представляющие комбинации одинаково насыщенных красного, зелёного и синего цветов. RGB -значения серых цветов равны $AABBCC_{16}$. Чёрный цвет имеет RGB -значение 000000_{16} , белый цвет определяется RGB -значением $FFFFFF_{16}$. Белый цвет является разновидностью серого цвета с максимальным насыщением составляющих его красного, зелёного и синего цветов. Количество серых цветов равно 256.

При описании алгоритмов построения рисунков следует отличать пиксельные координаты, значения которых определяются разрешимостью экрана, и математические координаты, использующие при задании значений

изображаемых элементов. Далее под координатами экрана будем понимать математические координаты.

Координаты точки расчёта значений температуры нейтральных частиц атмосферы – это географические широта φ (для северного полушария $0 \leq \varphi < \frac{\pi}{2}$) и долгота λ ($0 \leq \lambda < 2\pi$). Начало прямоугольных координат x, y экрана находится в верхнем левом углу. Пусть северный полюс имеет прямоугольные координаты x_0, y_0 . Считая координату φ измеряемой в линейных единицах длины (см. рис. 1), получаем соотношения между координатами φ, λ и x, y :

$$\begin{cases} x = x_0 - r \cos \lambda \\ y = y_0 + r \sin \lambda \end{cases}$$

где $r = \frac{\pi}{2} - \varphi$.

$$\text{Отсюда } \cos \lambda = \frac{x - x_0}{r}, \sin \lambda = \frac{y - y_0}{r}, \operatorname{tg} \lambda = \frac{y - y_0}{x - x_0}.$$

Если $\lambda_0 = \operatorname{arctg} \left| \frac{y - y_0}{x - x_0} \right|$, то при $x \leq x_0, y > y_0$ долгота $\lambda = \lambda_0$, при $x > x_0, y > y_0$

долгота $\lambda = \pi - \lambda_0$, при $x > x_0, y \leq y_0 - \lambda = \lambda_0 + \pi$, а при $x \leq x_0, y \leq y_0 - \lambda = 2\pi - \lambda_0$.

Широта $\varphi = \frac{\pi}{2} - r$, где $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$.

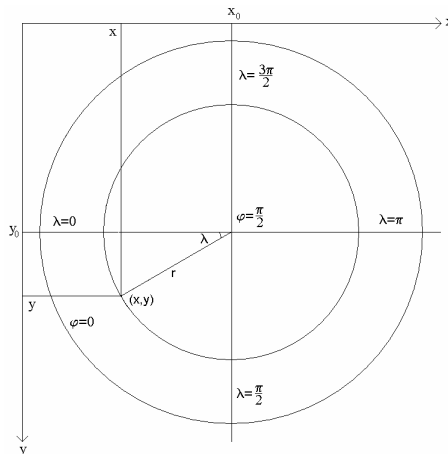


Рис. 1 – Прямоугольные координаты экрана и географические координаты северного полушария Земли

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчётов планетарного распределения нейтральной температуры на уровне поверхности Земли и на высоте 300 км.

Температура приземного слоя атмосферы определяется теплом, которое поверхность Земли передаёт воздуху в длинноволновом диапазоне. Источником тепловой энергии для земной поверхности является солнечная радиация. Её величина зависит от широты места, так как от экватора к полюсам угол падения солнечных лучей уменьшается. Чем меньше угол падения солнечных лучей, тем на большую поверхность распределяется пучок солнечных лучей одинакового сечения, а, следовательно, на единицу площади приходится меньше энергии. Степень нагрева поверхности, а значит и воздуха, зависят, прежде всего, от широты местности. В слое атмосферы, прилегающей к земной поверхности, степень нагрева зависит от высоты над уровнем моря: с подъемом вверх температура воздуха уменьшается в среднем на 0.6 К на 100 м.

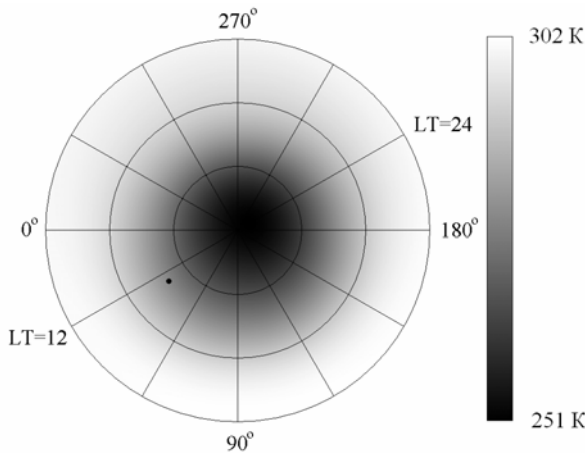


Рис. 2 – Распределение температуры атмосферы у поверхности Земли в равноденствие при $F_{10.7}=100$ и $A_p=2$ (точкой обозначено местоположение радара некогерентного рассеяния Института ионосферы)

Распределение нейтральной температуры на высоте 300 км имеет совершенно иной характер (см. рис. 3). Расчёты по модели NRLMSISE00 показывают, что в спокойных условиях на высотах термпаузы максимум нейтральной температуры T_n находится на дневной стороне в приэкваториальной области в районе меридиана, соответствующего значению местного времени $LT=16$. Это справедливо для всех сезонов.

На рис. 4 приведены высотные профили нейтральной температуры в

точке Харьковского радара некогерентного рассеяния. Как известно, температура нейтральных частиц является основным параметром, по которому производится разделение атмосферы на различные области, поскольку распределение с высотой температуры нейтральных частиц отражает баланс основных энергетических процессов в атмосфере. Баланс учитывает поглощение теплоты различными слоями атмосферы, её потери на излучение и фотохимические реакции, а также отток теплоты к более холодным областям атмосферы вследствие теплопроводности или вертикального перемешивания.

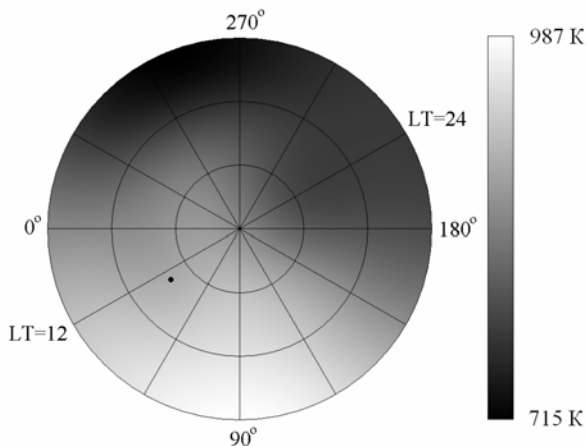


Рис. 3 – Распределение нейтральной температуры атмосферы на высоте 300 км в равноденствие при $F_{10.7}=100$ и $A_p=2$

В тропосфере, приповерхностном слое атмосферы, температура падает с ростом высоты, поскольку здесь роль основного источника нагрева играет поверхность Земли. В стратосфере температура возрастает вследствие появления нового источника тепла – поглощения солнечного УФ-излучения слоем озона и в некоторой степени из-за поглощения молекулами атмосферы инфракрасного излучения. На высотах 50 – 60 км возникает максимум температуры. Выше (в мезосфере) температура вновь уменьшается, так как здесь атмосфера охлаждается за счёт собственного излучения в космос в инфракрасном диапазоне. В термосфере (от 90 до высот около 200 км) происходит быстрый рост температуры с высотой, связанный с поглощением солнечного коротковолнового излучения, а также (в нижней части) теплоты, выделяющейся при объединении (рекомбинации) атомов кислорода в молекулы (при этом в энергию теплового движения частиц превращается энергия солнечного УФ-излучения, поглощённая ранее при диссоциации молекул O_2 на высоте 90 – 120 км). Рост температуры нейтральных частиц,

постепенно замедляясь с высотой, продолжается примерно до 200 – 300 км, причём теплота, выделяющаяся здесь, передаётся вниз вследствие теплопроводности; там она расходуется на различные фотохимические превращения компонентов атмосферы и на ИК-излучение. Выше термосферы нейтральная температура практически постоянна, поскольку в этой области (термопаузе, высотный диапазон которой составляет 300 – 500 км) поглощение солнечного излучения столь незначительно, что его интенсивность практически не меняется с высотой. Ночью температура в термопаузе в годы минимума солнечной активности равна 500 – 700 К, а в годы максимума – 1000-1500 К. Дневная температура примерно на 30 % выше ночной.

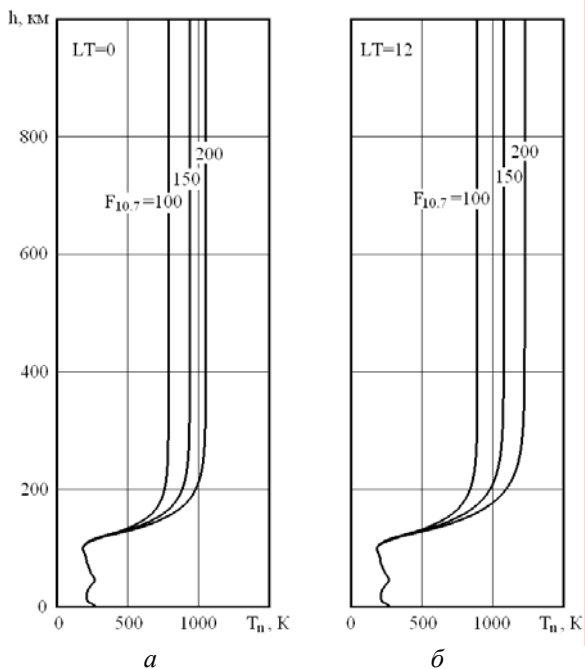


Рис. 4 – Высотные профили нейтральной температуры атмосферы в равноденствие при $F_{10.7}=100, 150, 200$ и $A_p=2$: а – полночь; б – полдень

Распределения массовой плотности нейтральных компонент атмосферы. На рис. 5 и 6 изображены планетарные распределения северного полушария на высоте 300 км плотности нейтрального газа в день равноденствия и в день летнего солнцестояния.

Результаты расчётов показывают, что в распределении плотности нейтрального газа на высоте 300 км в день равноденствия имеется один

максимум, находящийся в экваториальной зоне LT=15. В день летнего солнцестояния максимум планетарного распределения плотности находится в северном полушарии примерно на широте 30° на долготе, соответствующей LT=14.

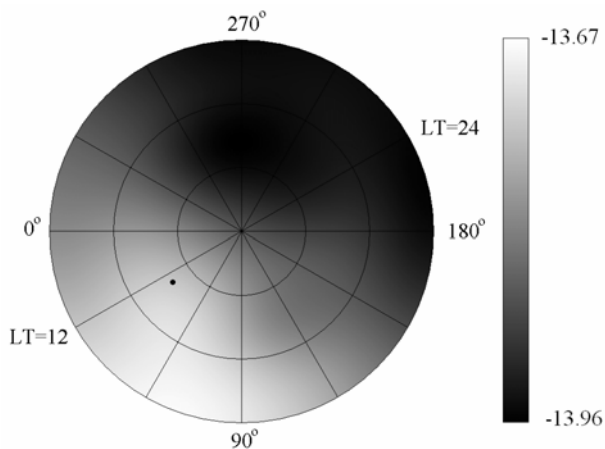


Рис. 5 – Распределение десятичного логарифма массовой плотности на высоте 300 км в равноденствие при $F_{10.7}=100$ и $A_p=2$

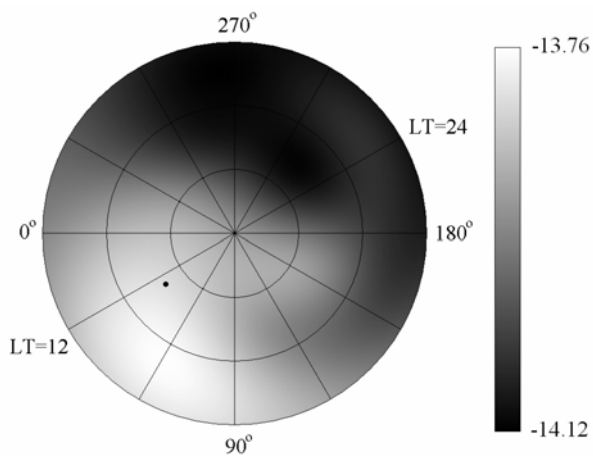


Рис. 6 – Распределение десятичного логарифма массовой плотности на высоте 300 км в день летнего солнцестояния при $F_{10.7}=100$ и $A_p=2$

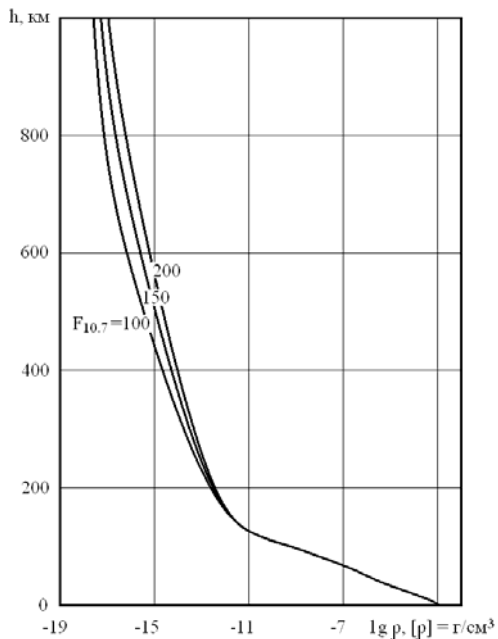


Рис. 7 – Полуденные высотные профили плотности атмосферного газа в равновесии при $F_{10.7}=100, 150, 200$ и $A_p=2$

Характер высотного распределения плотности атмосферного газа (см. рис. 7) определяет различный режим перемешивания в разных слоях атмосферы. В высотном диапазоне тропосферы, стратосферы и мезосферы основными компонентами являются N_2 и O_2 , которые составляют примерно 80 и 20% общего числа частиц соответственно, поэтому средняя молекулярная масса атмосферы слабо изменяется с высотой. Из-за этой общей особенности три указанных слоя вместе называют гомосферой. До высот 110-120 км турбулентное (конвективное) перемешивание обеспечивает постоянство молекулярной массы, 29 г/моль. Выше 110-120 км (турбопаузы, гомопаузы) нейтральные атомы и молекулы распределяются независимо в соответствии с барометрической формулой $n = n_0 \exp(-h/H)$, где n – концентрация частиц на высоте h , H – характерное для каждого компонента значение высоты однородной атмосферы (см. рис. 8). Концентрация тяжёлых атомов убывает быстрее концентрации лёгких, и верхняя атмосфера становится сначала преимущественно атомарно-кислородной, а в самой верхней части – водородной. Выше 1000 – 2000 км водород – основной компонент верхней атмосферы.

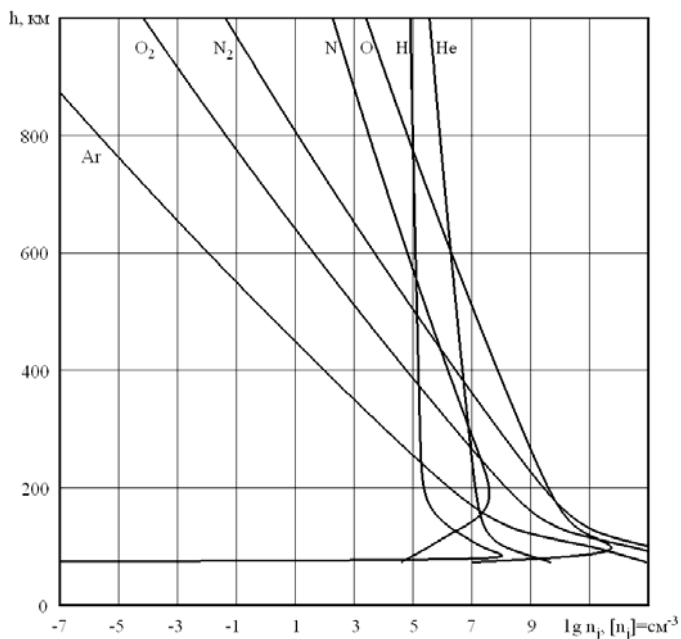


Рис. 8 – Полуденные высотные профили концентрации нейтральных газов атмосферы в равновесии при $F_{10.7}=100$ и $A_p=2$

В гомосфере турбулентное перемешивание атмосферы определяет высотное распределение с некоторым средним значением высоты однородной атмосферы. С высоты 80-90 км в результате воздействия ультрафиолетового излучения значительно возрастает количество атомов O. На высоте около 110 км турбопаузы $[O] \approx (0.1 \div 0.2)[O_2]$. На высоте около 130 км $[O] \approx [O_2]$. Молекулы N_2 не так подвержены диссоциации, как молекулы O_2 .

На высоте 15 – 40 км образуется озон: $O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$. Эта реакция является реакцией «трёх тел», в которой частица M служит для отвода избытка энергии. Такая реакция требует относительно высокого давления, поскольку её эффективность существенно зависит от вероятности тройных соударений. Образованный озон может быть вновь диссоциирован: $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ или $O_3 + O \rightarrow O_2 + O_2$.

В гетеросфере на высотах 120 – 180 км доминируют молекулы N_2 , на высотах 180 – 700 км доминируют атомы O, на высотах 700 – 1500 км преобладает гелий He, выше 1500 км доминирует водород H.

Появление значительного количества атомарного кислорода выше

турбопаузы обусловлено не только «всплыванием» O , но и интенсивным образованием его на высотах 90-120 км в результате фотодиссоциации молекулярного кислорода солнечным излучением с длиной волны короче $\lambda_{O_2} = 242.4$ нм, соответствующей порогу диссоциации O_2 , равному 5.11 эВ: $O_2 + h\nu \rightarrow O + O$, причём некоторые атомы O могут оказаться в возбуждённом состоянии (при $\lambda < 175.0$ нм).

Концентрация нейтральных компонент убывает с ростом высоты быстрее для газов с меньшей высотой однородной атмосферы. В гетеросфере концентрация j -ой составляющей нейтральной атмосферы

$$n_j(h) = n_j(h_0) \cdot \frac{T_n(h_0)}{T_n(h)} \exp\left(-\int_{h_0}^h \frac{dh}{H_j(h)}\right), \quad \text{где} \quad H_j(h) = \frac{kT_n(h)}{m_j \cdot g(h)} - \text{высота}$$

однородной атмосферы j -ой нейтральной компоненты. Если считать ускорение свободного падения постоянным по высоте: $g(h)=g$ и пренебречь с некоторой высоты h_0 изменением нейтральной температуры: $T_n(h) \cong T_n(h > h_0)$, то $H_j(h) \cong H_j$, и

$$n_j(h) = n_{j0} \exp\left(-\int_{h_0}^h \frac{dh}{H_j}\right) = n_{j0} \exp\left(-\frac{h}{H_j} \Big|_{h_0}^h\right) = n_{j0} e^{-\frac{h-h_0}{H_j}}.$$

На интервале $[h_0, h]$ значение $n_j(h)$ уменьшается в $e^{\frac{h-h_0}{H_j}}$ раз. На интервале $\Delta h=H_j$ значение $n_j(h)$ уменьшается в e раз.

Число молекул в единичном столбе $[h_0, \infty)$:

$$N_j = \int_{h_0}^{+\infty} n_j(h) dh = \int_{h_0}^{+\infty} n_{j0} e^{-\frac{h-h_0}{H_j}} dh = -n_{j0} H_j e^{-\frac{h-h_0}{H_j}} \Big|_{h_0}^{+\infty} = n_{j0} H_j.$$

Для высот $h \geq h_0=250$ км условие $T_n(h) \cong T_n(h_0)$ выполняется, поэтому выше 250 км линии $\lg n_j(h)$ можно считать прямыми. С ростом высоты величина $g(h)$ уменьшается, $H_j(h)$ увеличивается и линии $\lg n_j(h)$ становятся слегка выпуклыми вниз.

Вычислим значения высоты однородной атмосферы для профилей нейтральных компонент, приведенных на рис. 8.

Ускорение свободного падения $g(h) = g(0) \left(\frac{R_3}{R_3 + h}\right)^2$. Ускорение

свободного падения у поверхности Земли $g(0) \approx 980.655 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}$. Для широты

49.7° радиус Земли можно считать равным $R_3=6371$ км. Тогда на высоте $h=600$ км ускорение свободного падения

$$g(600 \text{ км}) = 980.655 \cdot \left(\frac{6371}{6371 + 600} \right)^2 = 819.108 \frac{\text{см}}{\text{с}^2}.$$

На высоте 600 км нейтральная температура $T_n=894.26$ К (см. околоравномерный профиль $T_n(h)$ при $F_{10.7}=100$ на рис. 4). При этих данных высота однородной атмосферы имеет следующие значения: для аргона Ar – 22.7 км; для двухатомного кислорода O_2 – 28.4 км; для двухатомного азота N_2 – 32.4 км; для атомарного кислорода O – 56.7 км; для атомарного азота N – 64.8 км; для гелия He – 227 км и для водорода H – 901 км.

Векторное поле горизонтальных нейтральных ветров. Как известно, главным фактором, определяющим циркуляцию атмосферы, является её неравномерный нагрев из-за процессов поглощения атмосферными газами электромагнитного излучения Солнца, излучения земной поверхности и излучения самой атмосферы.

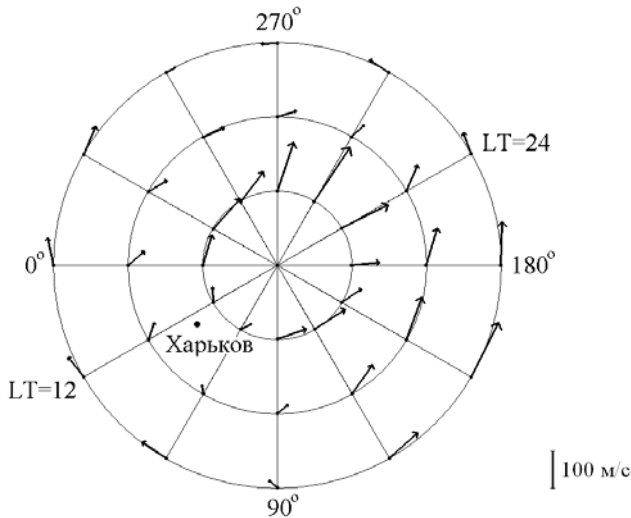


Рис. 9 – Планетарное распределение векторов горизонтальных нейтральных ветров при равноденствии [11]

На рис. 9 показано распределение векторов горизонтального нейтрального ветра при равноденствии на высоте 300 км для спокойных условий магнитного поля ($A_p=2$) и минимума солнечной активности ($F_{10.7}=100$). На рис. 10 приведено распределение абсолютных значений векторов скорости.

Направление и сила горизонтального нейтрального ветра зависят от

геомагнитных условий. В спокойных условиях, когда главную роль в характере нейтральных ветров играет солнечный нагрев, нейтральный газ переносится из дневного полушария от области повышенного давления в ночное. Днём ветер дует преимущественно к полюсам, ночью к – экватору.

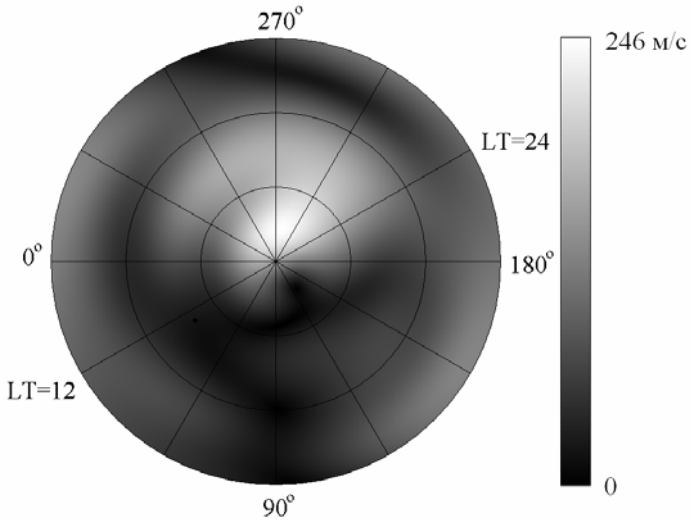


Рис –10. Распределение модулей векторов скорости горизонтальных нейтральных ветров

Горизонтальный нейтральный ветер оказывает влияние на вертикальное движение плазмы. Нейтральный газ атмосферы передаёт горизонтальный импульс заряженным частицам ионосферы (ионам и электронам), в результате чего заряженные частицы движутся по спиралевидным линиям вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Ионы и электроны, вращаясь навстречу друг другу, движутся по спиралам различных радиусов в одну сторону вдоль силовой линии магнитного поля. Заряженные частицы движутся в сторону положительной проекции меридионального ветра на направление силовой линии геомагнитного поля. Таким образом, меридиональный горизонтальный ветер (а частично, и зональный, если учитывать расхождение географических и магнитных полюсов) в дневное время определяет составляющую вектора движения заряженных частиц, направленную вниз. В ночное время составляющая вектора движения, обусловленная горизонтальными ветрами нейтральной атмосферы, направлена вверх.

В средней атмосфере компоненты вектора скорости горизонтальных ветров могут существенно изменяться с высотой (см. рис. 11). Известно, что на высотах выше 100 км заряженные частицы ионосферы могут оказывать

влияние на движение нейтральных частиц, т.е. на нейтральный ветер. Это связано с тем, что с увеличением высоты частота ион-нейтральных соударений, пропорциональная плотности нейтралов, убывает и выше некоторого высотного уровня становится меньше гирочастоты ионов. Нейтральный газ при столкновении с ионами испытывает так называемое ионное торможение. При наличии электрического поля возможно движение ионов и увлечение ими нейтральных частиц.

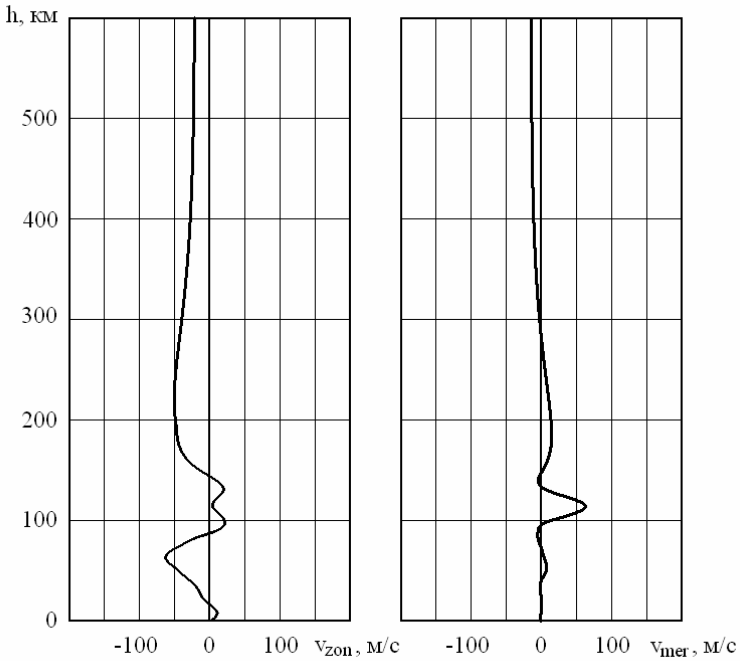


Рис. 11 – Полуденные высотные профили зональных и меридиональных ветров

Выводы. С одной стороны, построенные рисунки планетарных и высотных распределений параметров нейтральной атмосферы соответствуют теоретическим представлениям о физике атмосферы и её взаимосвязи с ионосферой. С другой стороны, широтно-долготные распределения позволяют обнаружить особенности планетарного распределения нейтральных параметров. Так, для всех сезонов в спокойных условиях на высотах термопаузы максимум нейтральной температуры находится на дневной стороне в приэкваториальной области в районе меридиана, соответствующего значению местного времени $LT=16$. Результаты расчётов показывают, что в распределении плотности нейтрального газа на высоте

300 км в день равноденствия имеется один максимум, находящийся в экваториальной зоне $LT=15$. В день летнего солнцестояния максимум планетарного распределения плотности находится в северном полушарии примерно на широте 30° на долготе, соответствующей $LT=14$. В векторном поле горизонтальных ветров в районе полюсов имеются по одному вихревому образованию.

Список литературы: 1. *Hedin, A.E., et al.* A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 1. N_2 density and temperature // *J. Geophys. Res.* – 1977. – Vol. 82, № 16. – P. 2139-2147. 2. *Hedin, A.E., et al.* A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 2. Composition // *J. Geophys. Res.* – 1977. – Vol. 82, № 16. – P. 2148-2156. 3. *Hedin, A.E.* A revised thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data: MSIS-83 // *J. Geophys. Res.* – 1983. – Vol. 88, № A12. – P. 10170-10188. 4. *Hedin, A.E.* MSIS-86 thermospheric model // *J. Geophys. Res.* – 1987. – Vol. 92, № A5. – P. 4649-4662. 5. *Hedin, A.E.* Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96, № A2. – P. 1159-1172. 6. *Picone, J.M., et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1468-1483. 7. *Hedin A.E., Spencer N.W., Killeen T.L.* Empirical Global Model of Upper Thermosphere Winds Based on Atmosphere and Dynamics Explorer Satellite Data // *J. Geophys. Res.* – 1988. – Vol. 93. – P. 9959-9978. 8. *Hedin A.E., et al.* Revised Global Model of Thermosphere Winds Using Satellite and Ground-Based Observations // *J. Geophys. Res.* – 1991. – Vol. 96. – P. 7657-7688. 9. *Hedin, A.E., et al.* Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1996. – Vol. 58. – P. 1421-1447. 10. *Drob, D.P., et al.* An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 // *J. Geophys. Res.* – 2008. – Vol. 113, № A12304, doi:10.1029/2008JA013668. 11. *Гринченко С.В.* Построение векторного поля горизонтальных нейтральных ветров // *Вестник НТУ “ХПИ”*. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – 2011. – № 44. – С. 130-137.

Поступила в редколлегию 30.05.2013

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Живолуп Т.Г.</i> Вариации параметров слоя F2 в период осеннего равноденствия 2012 г. по данным радаров некогерентного рассеяния Харьков и EISCAT.....	3
<i>Богомаз А.В., Котов Д.В., Сюсюк М.Н.</i> Чувствительность получаемых оценок концентрации тяжелых ионов к неопределенностям задаваемых температур заряженных частиц в методе некогерентного рассеяния	10
<i>Чепурный Я.Н., Емельянов Л.Я., Искра Д.А.</i> Измерение диаграммы направленности антенны НДА-100 по отражениям от техногенных космических объектов	14
<i>Богомаз А.В., Пидручная Н.А., Пуляев В.А.</i> Результаты обработки сигнала НР с учетом ширины спектра зондирующего импульса.....	21
<i>Темерев М.О., Пуляев В.О.</i> Розробка аналізатора спектра на основі швидкого перетворення Фур'є.....	25
<i>Богомаз А.В., Котов Д.В.</i> Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния <i>Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments</i> (UPRISE).....	29
<i>Емельянов Л.Я., Лялюк А.И., Рогожкин Е.В., Храмов Е.А.</i> Математическое и программное обеспечение комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы.....	38
<i>Пуляев В.А., Белозеров Д.П., Мирошников А.Е.</i> Запись ионосферных параметров в формате базы данных <i>Madrigal</i>	46
<i>Фисун А.В., Скворцов Т.А.</i> Оптимальная оценка эффекта Фарадея в линейном поляризованном базисе при частично поляризованном сигнале	53
<i>Домнин И.Ф., Резинкина М.М., Резниченко А.И.</i> Использование компьютерного моделирования электротепловых процессов при высокочастотном нагреве нефтепродуктов для выбора оптимальной частоты и количества источников	57
<i>Богомаз А.В., Мирошников А.Е.</i> Экспресс-обработка данных радара некогерентного рассеяния на удалённом сервере	63
<i>Котов Д.В., Шульга М.А.</i> Моделирование вариаций концентрации ионов водорода с использованием данных радара некогерентного рассеяния	69
<i>Дзюбанов Д.А., Емельянов Л.Я., Лойко А.А.</i> Оценка скорости движения нейтральной атмосферы на высотах максимума F-области по данным некогерентного рассеяния	75
<i>Гринченко С.В.</i> Планетарные распределения температуры, массовой плотности и горизонтальных ветров нейтральной атмосферы	82

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

**Національного технічного університету
“Харківський політехнічний інститут”**

Збірник наукових праць

Серія

Радіофізика та іоносфера

№ 28 (1001)

Науковий редактор: д.т.н., проф. Пуляєв В.О.

Технічний редактор: к.ф.-м.н. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск: к.т.н. Обухова І.Б.

Адреса редколегії: 61002, м. Харків, МСП, вул. Червонопрапорна, 16
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

Об. вид. № 170-12

Підписано до друку 07.06.2013 р. Формат 60×90 1/16.

Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.

Умовн. друк. арк. 6,00. Наклад 300 прим. Зам. № 085061.

Видавничий центр НТУ “ХПІ”. Свідоцтво про державну реєстрацію
суб’єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Надруковано у СПДФО Ізраїлев Є.М.

Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16