

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Радіофізика та іоносфера

№ 34 (1206) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2016

ISSN 2078-9998

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 34 (1206). – 100 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

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 наказом МОН України від 21.12.15 р. № 1328 (додаток 8).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України (**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. С. 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. ЄПІФАНОВ, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. ЗАЙЦЕВ, канд. техн. наук, проф.;
П. О. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.; В. Б. КЛЕПІКОВ, д-р техн. наук, проф.;
С. І. КОНДРАШОВ, 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. НІКОЛАЄНКО, 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.; М. 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, с.н.с.

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. Черногор, д-р фіз.-мат. наук, проф.;
І.В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Радіофізика та іоносфера», індексується в наукометричних базах **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 4 листопада 2016 р.

УДК 628.396

В.О. ПУЛЯЄВ, Є.В. РОГОЖКІН**ПОКРАЩАННЯ ВИСОТНОГО РОЗРІЗНЕННЯ В МАКСИМУМІ ІОНІЗАЦІЇ ПРИ ЦИФРОВІЙ ОБРОБЦІ СИГНАЛУ НЕКОГЕРЕНТНОГО РОЗСІЯННЯ**

Розглянуто приклад реалізації процедури, яка дозволяє відновлювати висотний профіль потужності сигналу некогерентного розсіяння (НР), базового для розрахунку висотного розподілу концентрації електронів. Метою процедури є зменшення похибок та покращання висотного розрізнення цих параметрів. Відновлення досягається за рахунок вводу в розрахунки допоміжної аналітичної функції, що характеризується поліномом n -ї степені. Ця функція додатково пов'язує між собою значення відліків потужності сигналу розсіяння від сусідніх іоносферних ділянок і дозволяє реалізувати процедуру, що компенсує ефект згладжування, який визвано використанням довгого зондувального радіоімпульсу.

Ключові слова: сигнал розсіяння, профіль потужності, імпульсне згладжування, висотне розрізнення.

Рассмотрен пример реализации процедуры, которая позволяет восстанавливать высотный профиль мощности сигнала некогерентного рассеяния (НР), базового для расчета высотного распределения концентрации электронов. Целью процедуры является уменьшение погрешности и улучшение высотного разрешения этих параметров. Восстановление достигается за счет ввода в расчеты вспомогательной аналитической функции, характеризующейся полиномом n -й степени. Эта функция дополнительно связывает между собой значения отсчетов мощности сигналов, рассеянных от соседних ионосферных участков, и позволяет реализовать процедуру, компенсирующую эффект сглаживания, вызванный использованием длинного зондирующего радиопульса.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, профиль мощности, импульсное сглаживание, высотное разрешение.

An example of the implementation procedure, which allows you to restore the height profile of the incoherent scatter (IS) signal power is presented. It is the basis for calculating the distribution along the altitude of the electron density. The aim of the procedure is to reduce errors and improve the high-altitude resolution of these parameters. Recovery is achieved by entering into the calculations supporting the analytical function, which is characterized by a polynomial of n -th degree. This feature further connects the value of the power readings from adjacent of ionospheric plots. She allows realizing the procedure, which compensates the smoothing effect caused by using a long probing radiopulse.

Keywords: scattering of the signal, power profile, pulse smoothing, high-rise resolution.

Вступ. Коректність визначення висотних розподілів іоносферних параметрів за характеристиками сигналу, утвореного в межах висотного об'єму розсіяння, при існуючих методиках імпульсного зондування безпосередньо пов'язана з висотним розрізненням розподілу потужності $P(h)$ сигналу НР [1]. Особливо це стосується області максимуму іонізації іоносфери.

В теперішній час методи цифрового запису знімають не тільки питання про розробку спеціалізованого процесора, але й істотно розширюють інформаційні можливості програмно-алгоритмічного забезпечення. У статті показано, що точність розрахунку параметрів в значній мірі визначається обраним співвідношенням між тривалістю імпульсу зондування і кроком знімання цифрових відліків з виходу радіоприймального пристрою.

Мета роботи – синтез алгоритмів цифрової обробки сигналу НР, призначених для покращення висотного розрізнення в максимумі іонізації.

Аналіз стану питання. Відомо про спосіб [2] покращання висотного розрізнення шляхом відновлення висотного профілю потужності сигналу НР. У ньому запропоновано допоміжний аналіз та обробка прийнятих радаром НР цифрових відліків, суть же розрахунків полягає у наступному.

Так як згідно радіолокаційній теорії іоносфера представляє собою безліч безперервно розподілених у просторі елементарних цілей (іонізованих часток), то в будь-який момент часу потужність розсіяння складається з суми складових сигналу від тих висотних ділянок плазми, що захоплюються дискретами зондувального імпульсу. У цьому способі

зондувальний імпульс розглядається як пара здвоєних дискрет зі змінною відстанню між ними.

Представивши зондувальний імпульс як кодований, тобто у вигляді амплітудо-маніпульованої послідовності, де елементи "1" – це активні дискрети, а "0" – проміжок між ними у якості неактивних дискрет, запропоновано використовувати спеціальний алгоритм декодування (шляхом інвертування) одержуваних після системи обробки відліків. До того ж з метою статистичного накопичення результатів радар по черзі випромінює не один, а ряд таких амплітудо-маніпульованих імпульсів, які можна представити у вигляді строк матриці. За рахунок їх сумарної дії спосіб дає можливість мінімізувати вплив "заважаючих" сигналів, що не відносяться до досліджуваної висотної ділянки, і цим наблизити висотне розрізнення до значення, яке задає протяжність елементарної дискрети коду.

Недолік цього способу у тому, що введення нульових зондувальних дискрет імпульсу призводить до втрати ефективної випромінюваної потужності і до зниження відношення сигнал/шум, що дуже критично для надійного виявлення та обробки сигналу в методі некогерентного розсіяння. Крім того, в даному способі мінімум вкладу потужностей від "заважаючих" ділянок не вдається повністю перетворити на нульовий, в результаті чого спосіб не можна назвати оптимальним.

Ще один із підходів [3] базується на роботі радара вже з довгим зондувальним імпульсом і на спробі врахувати визвані ним спотворення, пов'язані з ефектом імпульсного згладжування. Рекомендується

© В. О. Пуляєв, Є. В. Рогожкін, 2016

$$P(h_i) = a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 + a_3 h_i^3 + \dots + a_n h_i^n. \quad (4)$$

При підстановці цього поліному на місце кожної висотної складової у виразі (3) отримаємо по відношенню до ділянки за номером i наступне:

$$P_{\Sigma}(h_i) = a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 + a_3 h_i^3 + a_4 h_i^4 + \dots + a_n h_i^n +$$

$$+ a_0 + a_1 h_{i+1} + a_2 h_{i+1}^2 + a_3 h_{i+1}^3 + a_4 h_{i+1}^4 + \dots + a_n h_{i+1}^n +$$

$$+ a_0 + a_1 h_{i+2} + a_2 h_{i+2}^2 + a_3 h_{i+2}^3 + a_4 h_{i+2}^4 + \dots + a_n h_{i+2}^n +$$

$$\dots$$

$$+ a_0 + a_1 h_{i+n} + a_2 h_{i+n}^2 + a_3 h_{i+n}^3 + a_4 h_{i+n}^4 + \dots + a_n h_{i+n}^n.$$

Упорядкування цього виразу приводить до більш компактного запису:

$$P_{\Sigma}(h_i) = (n+1) \cdot a_0 + a_1 c_{1,1} + a_2 c_{2,1} + a_3 c_{3,2} + \dots + a_n c_{n,1},$$

де

$$\begin{cases} c_{1,1} = h_i + h_{i+1} + h_{i+2} + \dots + h_{i+n}, \\ c_{2,1} = h_i^2 + h_{i+1}^2 + h_{i+2}^2 + \dots + h_{i+n}^2, \\ \dots \\ c_{n,1} = h_i^n + h_{i+1}^n + h_{i+2}^n + \dots + h_{i+n}^n. \end{cases}$$

Аналогічні результати можна отримати для всіх $n + 1$ залучених ділянок вже у вигляді наступної системи за номером (5):

$$\begin{cases} P_{\Sigma}(h_i) = (n+1) \cdot a_0 + a_1 \cdot c_{1,1} + a_2 \cdot c_{2,1} + \dots + a_n \cdot c_{n,1}, \\ P_{\Sigma}(h_{i+1}) = (n+1) \cdot a_0 + a_1 \cdot c_{1,2} + a_2 \cdot c_{2,2} + \dots + a_n \cdot c_{n,2}, \\ P_{\Sigma}(h_{i+2}) = (n+1) \cdot a_0 + a_1 \cdot c_{1,3} + a_2 \cdot c_{2,3} + \dots + a_n \cdot c_{n,3}, \\ \dots \\ P_{\Sigma}(h_{i+n}) = (n+1) \cdot a_0 + a_1 \cdot c_{1,n+1} + a_2 \cdot c_{2,n+1} + \dots + a_n \cdot c_{n,n+1}. \end{cases}$$

для якої знаходяться всі останні елементи цієї системи при коефіцієнтах a_0, a_1, \dots, a_n , а саме

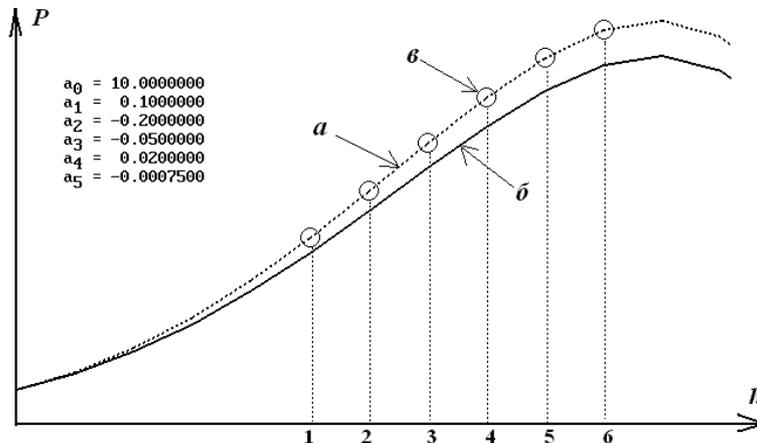


Рис. 1 – Моделювання профілю потужності сигналу розсіяння (а) з використанням поліному степені $n = 5$, його згладжування (б) та зворотне відновлення після згладжування (в)

$$\begin{cases} c_{1,2} = h_{i+1} + h_{i+2} + h_{i+3} + \dots + h_{i+n+1}, \\ c_{2,2} = h_{i+1}^2 + h_{i+2}^2 + h_{i+3}^2 + \dots + h_{i+n+1}^2, \\ \dots \\ c_{n,2} = h_{i+1}^n + h_{i+2}^n + h_{i+3}^n + \dots + h_{i+n+1}^n, \\ \dots \\ c_{1,n+1} = h_{i+n} + h_{i+n+1} + h_{i+n+2} + \dots + h_{i+2n}, \\ c_{2,n+1} = h_{i+n}^2 + h_{i+n+1}^2 + h_{i+n+2}^2 + \dots + h_{i+2n}^2, \\ \dots \\ c_{n,n+1} = h_{i+n}^n + h_{i+n+1}^n + h_{i+n+2}^n + \dots + h_{i+2n}^n. \end{cases}$$

Таким чином, маємо $n + 1$ лінійних алгебраїчних рівнянь виду (5) відносно невідомих коефіцієнтів a_0, a_1, \dots, a_n , для знаходження яких достатньо залучити стандартні методи розв'язання подібних систем.

Результати чисельного моделювання. Для підтвердження викладеної методики на рис. 1 наведено потужності сигналу розсіяння $P(h)$, що отримані при моделюванні з використанням поліному степені $n = 5$, а саме

$$P(h_i) = a_0 + a_1 h_i + a_2 h_i^2 + a_3 h_i^3 + \dots + a_5 h_i^5.$$

Цей поліном по відношенню до ділянок з номерами $i = 1, 2, \dots, 6$ був заданий за допомогою підібраних коефіцієнтів $a_0 = 10, a_1 = 0.1, a_2 = -0.2, a_3 = -0.05, a_4 = 0.02, a_5 = -0.00075$ (лінія а). Відносно цього профілю, використовуючи ширину апертури 6, наступним кроком було змодельовано процес його імпульсного згладжування за допомогою виразу

$$P_{\Sigma}(h_i) = P(h_i) + P(h_{i+1}) + P(h_{i+2}) + P(h_{i+3}) + P(h_{i+4}) + P(h_{i+5})$$

і отримано профіль виду $P_{\Sigma}(h)$. Результат такого ковзного згладжування після нормування та співставлення ліній вздовж осі h наведено у вигляді лінії б.

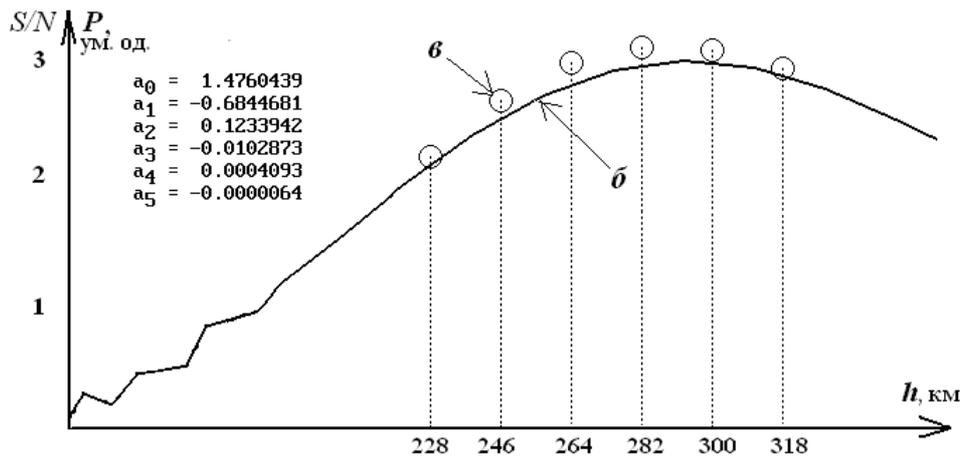


Рис. 2 – Реальний профіль потужності сигналу розсіяння (б) та результат його відновлення (б)

Якщо тепер запустити процедуру знаходження коефіцієнтів a_0, a_1, \dots, a_5 шляхом розв'язання системи (5), яка має 6 лінійних алгебраїчних рівнянь, то будуть отримані ті ж самі значення коефіцієнтів, що і задавалися по умові. Це демонструє приклад з відновленим профілем на рис. 1 (точки *б*). В цілому ж дане моделювання говорить про дієздатність запропонованого методу відновлення профілю.

Щоб підтвердити можливість використання запропонованого методу на реальних даних, на рис. 2 наведено результати його дії, але вже з залученням профілю потужності $P_{\Sigma}(h)$ сигналу розсіяння, отриманого за допомогою радара НР 22.03.2015 р. (лінія *б*). На осі ординат цього рисунку відображено ще й додаткову інформацію про відношення S/N сигнал/шум, при якому цю потужність отримано. Маючи довжину радіоімпульсу зондування, якому відповідає висотне розрізнення у 108 км, частота дискретизації сигналу була вибрана таким чином, щоб відліки фіксувалися через 18 км, тобто виконувалася умова $(n + 1) = 6$. Для регулярної іоносфери у максимумі іонізації використання подібного поліному 5-ї степені цілком достатньо.

Як можна спостерігати, результат дії запропонованого методу відновлення профілю потужності сигналу розсіяння позитивний (точки *с*). Навіть використовуючи довгий зондувальний радіоімпульс і аналізуючи лише кінцевий відрізок профілю, метод демонструє можливість отримання високого розрізнення, забезпечуючи цим більш точну передачу характеру поведінки іоносферних параметрів.

Висновки. В статті приведено опис обчислювальних підходів та результатів чисельного моделювання, що включають в себе процедури відновлення форми висотного профілю потужності сигналу НР, який є базою для розрахунку розподілу концентрації електронів. З метою зменшення похибок та покращання висотного розрізнення цих параметрів в розрахунках присутня допоміжна аналітична функція, яка характеризується поліномом n -ї степені.

Ця функція додатково описує зв'язок між собою значень складових потужності сигналів на сусідніх іоносферних ділянках і демонструє приклад реалізації алгоритмів, за допомогою яких компенсується результат згладжування, зв'язаний з впливом довгого зондувального радіоімпульсу.

Список літератури

1. *Эванс Дж. В.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн / *Дж. В. Эванс* // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 139–175.
2. *Котов Д.В.* Оптимальное декодирование как способ увеличения высотного разрешения при измерениях профиля мощности НР / *Д.В. Котов, В.А. Пуляев* // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Сер: Автоматика и приборостроение. – 2006. – № 31. – С. 77–83.
3. *Пуляев В.О.* Обчислювальні процедури при аналізі НР в іоносферній плазмі : монографія / *В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз.* – X : НТУ «ХПІ», 2014. – 272 с.
3. *Рогожкін Е.В.* Улучшение высотного разрешения в максимуме ионизации при цифровой обработке сигнала НР / *Е.В. Рогожкин, В.А. Пуляев, А.И. Лялюк* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції. Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера. (19–21 травня 2016 р., Харків). – X. : НТУ «ХПІ», 2016 – Ч. III. – С. 366.

References (transliterated)

1. *Evans Dzh. V.* *Teoreticheskiye y prakticheskiye voprosy issledovaniya yonosfery metodom NR radyovoln* // TYYER, 1969, vol. 57, no. 4, pp. 139–175.
2. *Kotov D.V., Pulyayev V.A.* *Optymal'noe dekodirovaniye kak sposob uvelycheniya vysotnoho razresheniya pry yzmereniyakh profilya moshchnosty N* // Vestn. NTU "KhPI". Avtomatyka y pryborostroeniye, 2006, no. 31, pp. 77–83.
3. *Pulyayev V.O., Rohozhkin Ye. V., Bohomaz O. V.* *Obchyslyval'ni protsedury pry analizi NR v ionosferniy plazmi : monohrafiya.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. 272 p.
3. *Rohozhkin E.V., Pulyayev V.A., Lyalyuk A.I.* *Uluchsheniye vysotnoho razresheniya v maksymume yonyzatsyy pry tsyfrovoy obrabotke syhnala NR / XXIV Mizhn. nauk.-prakt. konf.: Informatsiyani tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya.* (MicroCAD-2016) (Kharkiv, Ukrainya, 19–21 travnya 2016 r.). Zbirn. tez dopovidey. Sektsiya 17. Navkolozemnyy kosmichnyy prostir. Radiofizyka ta ionosfera. Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, ch. III, p. 366.

Надійшла (received) 05.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Покращання висотного розрізнення в максимумі іонізації при цифровій обробці сигналу некогерентного розсіяння / В.О. Пуляєв, Є.В. Рогожкін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 3–7. Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-9998.

Улучшение высотного разрешения в максимуме ионизации при цифровой обработке сигнала некогерентного рассеяния / В.А. Пуляев, Е.В. Рогожкин // Весник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 3–7. Библиогр.: 4 назв. – ISSN 2078-9998.

Improving the high resolution in the ionization maximum point in digital processing of incoherent scattering signal / V.A. Pulyayev, E.V. Rogozhkin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysic and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 3–7. – Bibliogr.: 4. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пуляєв Валерій Олександрович – доктор технічних наук, професор, заступник директора Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua.

Пуляев Валерий Александрович – доктор технических наук, профессор, заместитель директора Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua.

Pulyayev Valeriy Olexandrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua.

Рогожкін Євген Васильович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри радіоелектроніки НТУ «ХПІ», м. Харків; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: rogojkiner@ukr.net.

Рогожкин Евгений Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектроники НТУ «ХПІ», г. Харьков; тел.: (057) 707-62-21; e-mail: rogojkiner@ukr.net.

Rogozhkin Evgen Vasilovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Radio Electronics of NTU "KhPI", Kharkiv; phone: (057) 707-62-21; e-mail: pulrogojkiner@ukr.net.

УДК 550.388

С. В. КАЦКО, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

НАБЛЮДЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ НАД ХАРЬКОВОМ В ТЕЧЕНИЕ ФАЗЫ РЕЛАКСАЦИИ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 14–17 МАРТА 2016 Г.

Наведено результати спостереження ефектів в іоносферній плазмі над Харківом під час фази релаксації помірної геомагнітної бурі 14–17 березня 2016 р. Спостереження проведені за допомогою радару некогерентного розсіяння та цифрового іонозонду, розташованих поблизу м. Харкова. Магнітна буря супроводжувалася іоносферною бурєю зі змінними фазами.

Ключові слова: геомагнітна буря, іоносфера, некогерентне розсіяння, критична частота, швидкість переносу плазми.

Приведены результаты наблюдения эффектов в ионосферной плазме над Харьковом во время фазы релаксации умеренной геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. Наблюдения проведены с помощью радару некогерентного рассеяния и цифрового ионозонда, расположенных вблизи г. Харькова. Магнитная буря сопровождалась ионосферной бурей со знакопеременными фазами.

Ключевые слова: геомагнитная буря, ионосфера, некогерентное рассеяние, критическая частота, скорость переноса плазмы.

The study results ionosphere plasma effects observing over Kharkiv during the relaxation phase of moderate geomagnetic storm on March 14–17, 2016 are presented. The observations are carried out by the Kharkiv incoherent scatter radar and the digital ionosonde. The magnetic storm was accompanied by ionospheric storm with sign-variable phases.

Key words: geomagnetic storm, ionosphere, incoherent scatter, critical frequency, plasma transport velocity.

Введение. Исследование ионосферных эффектов в результате воздействия космической погоды остается важной проблемой геофизики. Основное внимание уделяется поиску закономерностей пространственно-временного распределения параметров ионосферной плазмы во время магнитовозмущенных условий как на основе использования анализа экспериментальных данных, так и с помощью результатов моделирования [1–3].

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований ионосферы над г. Харьков в течение фазы релаксации геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. с помощью радару некогерентного рассеяния Института ионосферы (г. Харьков) и цифрового ионозонда, расположенного в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Наблюдения проводились с 18:00 UT 16 марта 2016 г. по 05:00 UT 18 марта 2016 г. (здесь и далее время в UT – universal time).

Средства радиозондирования геокосмоса.

Радар некогерентного рассеяния. В Ионосферной обсерватории Института ионосферы расположен единственный в среднеширотной Европе радар некогерентного рассеяния (НР). Радар с зенитной двухзеркальной параболической антенной диаметром 100 м работает на частоте 158 МГц, коэффициент усиления антенны около 12700. Импульсная мощность радиопередающего устройства равнялась 2 МВт.

Диапазон исследуемых высот зависит от режима работы радара и составляет 100–1500 км. Работа радара НР в режиме применения составного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс) импульсом обеспечивает высотное разрешение примерно 20 и 100 км в диапазонах высот 100–550 и 200–1000 км соответственно.

Для уменьшения статистической погрешности измерения мощности и корреляционной функции НР сигнала, по которым определяются параметры ионосферы, был выбран интервал обработки сигнала

15 мин. При этом относительная погрешность оценивания мощности сигнала не превышает 1–3 %. Подробное описание устройств радара дано в [4, 5].

Цифровой ионозонд. Ионозонд Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина использует для излучения и приема радиоволн вертикальные широкополосные ромбические антенны Айзенберга. Высота подвеса антенн равняется 18 м, а их горизонтальный размер достигает 50 м. Зондирующие радиоимпульсы длительностью 100 мкс с частотой следования 125 Гц, несущей частотой в диапазоне 1–16 МГц и мощностью до 1.5 кВт в импульсе излучаются широкополосным радиочастотным усилителем мощности передатчика «Бриг-2».

Геомагнитная обстановка. В результате воздействия области коротации между быстрыми и медленными потоками солнечного ветра на магнитосферу Земли H -компонента геомагнитного поля 14 марта с 17:15 (см. рис. 1) начала резко увеличиваться, что и определило начало геомагнитной бури.

В свою очередь B_z -компонента межпланетного магнитного поля около 18:00 (см. рис. 2) достигла максимального значения 11.7 нТл, после чего быстро начала уменьшаться до отрицательных значений. Максимального положительного значения геомагнитный индекс D_{st} также достиг в 18:00 и составил 47 нТл, а затем он уменьшился до –55 нТл. После этого начался рост планетарного индекса K_p до 5 в интервале времени 00:00–03:00 15 марта. Последующие увеличения индекса K_p до значений 5 и 5+ отмечались 15 и 16 марта.

Ионосферные эффекты. *Вариации критической частоты.* С началом измерений в Ионосферной обсерватории индекс K_p увеличился с 1.3 до 3.0, а затем составлял 4.7 с 21:00 16 марта до 06:00 17 марта.

В свою очередь 16 марта над Харьковом около 21:00 (увеличение индекса K_p с 3.0 до 4.7) произошла

© С. В. Кацко, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор, 2016

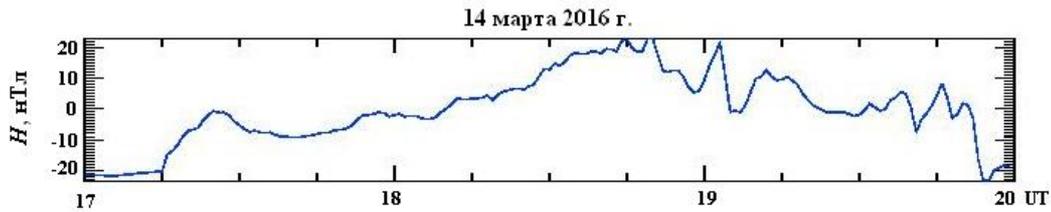


Рис. 1 – Одноминутные вариации H -компоненты геомагнитного поля 14 марта 216 г. с 17:00 до 20:00 UT.

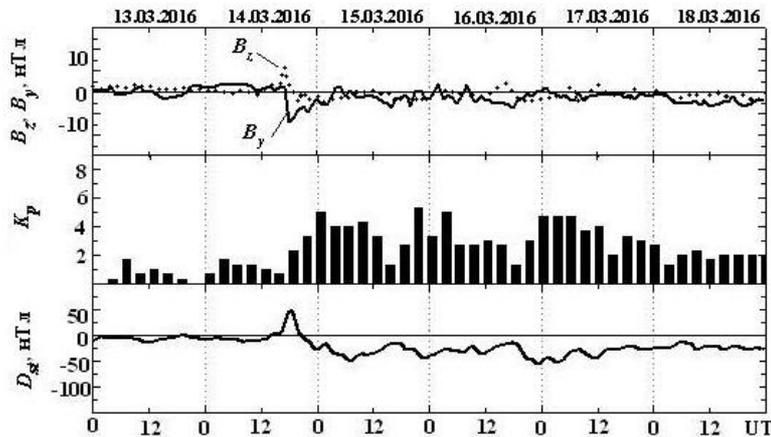


Рис. 2 – Состояние космической погоды: временные вариации B_y - (точки) и B_z -компонент (линия) межпланетного магнитного поля, индексов геомагнитной активности K_p и D_{st} в период 13–18 марта 2016 г.

смена фазы отрицательного ионосферного возмущения на положительное, что определяется вариациями критической частоты f_oF2 слоя F2 (см. рис. 3). При этом отклонение критической частоты δf_oF2 изменилось с -34% до $+30\%$ соответственно (рис. 3). Для оценки эффектов использовались данные ионозонда, расположенного на той же широте, что и радар НР, в Прухонице (Чехия) с учетом сдвига относительно местного времени, которые получены при спокойном состоянии ионосферы 13 марта 2016 г. Увеличение критической частоты длилось около 3-х часов. В это время значения индекса D_{st} были минимальными за весь период возмущения с 14 по 17 марта и составили -55 нТл. После чего значения критической частоты снова стали уменьшаться по сравнению с предшествующими невозмущенными условиями 13 марта 2016 г., и относительное отклонение δf_oF2 достигало -20% . С последующим увеличением индекса K_p до 4.7 (в интервале времени 00:00–06:00) и 3.7 (с 06:00 до 09:00) 17 марта δf_oF2 составило около -20% , -30% и -28% соответственно. После этого значения δf_oF2 приближались к нулю.

Следующие значительные изменения δf_oF2 составили -20% около 15:00 (во время увеличения K_p с 2.0 до 3.3) и $+22\%$ около 22:00 (уменьшение K_p с 3.0 до 2.7).

На рис. 3 также приведены временные вариации концентрации электронов в максимуме слоя F2 N_mF2 , поведение которых определяется соответственно вариациями критической частоты.

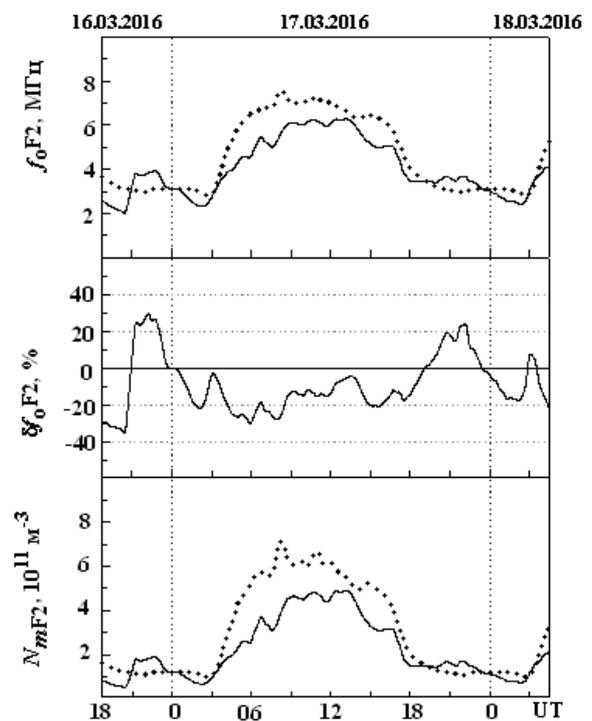


Рис. 3 – Временные вариации критической частоты f_oF2 , ее относительного отклонения δf_oF2 и концентрации электронов N_mF2 в максимуме слоя F2 в период измерений с 16 по 18 марта 2016 г. (линия) и в магнитоспокойный день 13 марта 2016 г. (точечная кривая)

В то время как отклонение δf_oF2 составило около -34% 16 марта концентрация N_mF2 уменьшилась приблизительно в 2.3 раза по сравнению с невозмущенными условиями. При увеличении δf_oF2 до $+30\%$ в этот же день концентрации увеличилась приблизительно в 2 раза. Последующие колебания значений N_mF2 не превышали указанных пределов.

Высота максимума слоя F2. На рис. 4 приведены временные вариации высоты максимума слоя F2 z_mF2 и его относительного отклонения δz_mF2 . Как видно, отклонение δz_mF2 не превышало $15-16\%$, а значит текущая геомагнитная обстановка слабо повлияла на вариации высоты максимума слоя F2.

Ранее в Ионосферной обсерватории наблюдалось проявление сильных ионосферных возмущений, вызванных умеренной магнитной бурей. Так, буря 20–21 марта 2003 г. с индексом $K_{pmax} = 5$ послужила причиной сильной отрицательной фазы ионосферного возмущения, за которой последовала умеренная фаза [6–9].

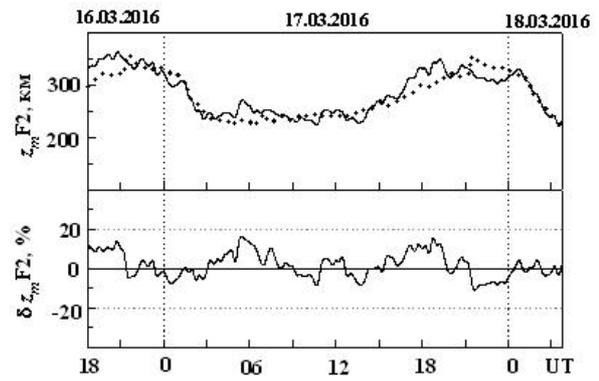


Рис. 4 – Временные вариации высоты максимума слоя F2 z_mF2 и ее относительного отклонения δz_mF2 в период измерений с 16 по 18 марта 2016 г. (линия) и в магнитоспокойный день 13 марта 2016 г. (точечная кривая).

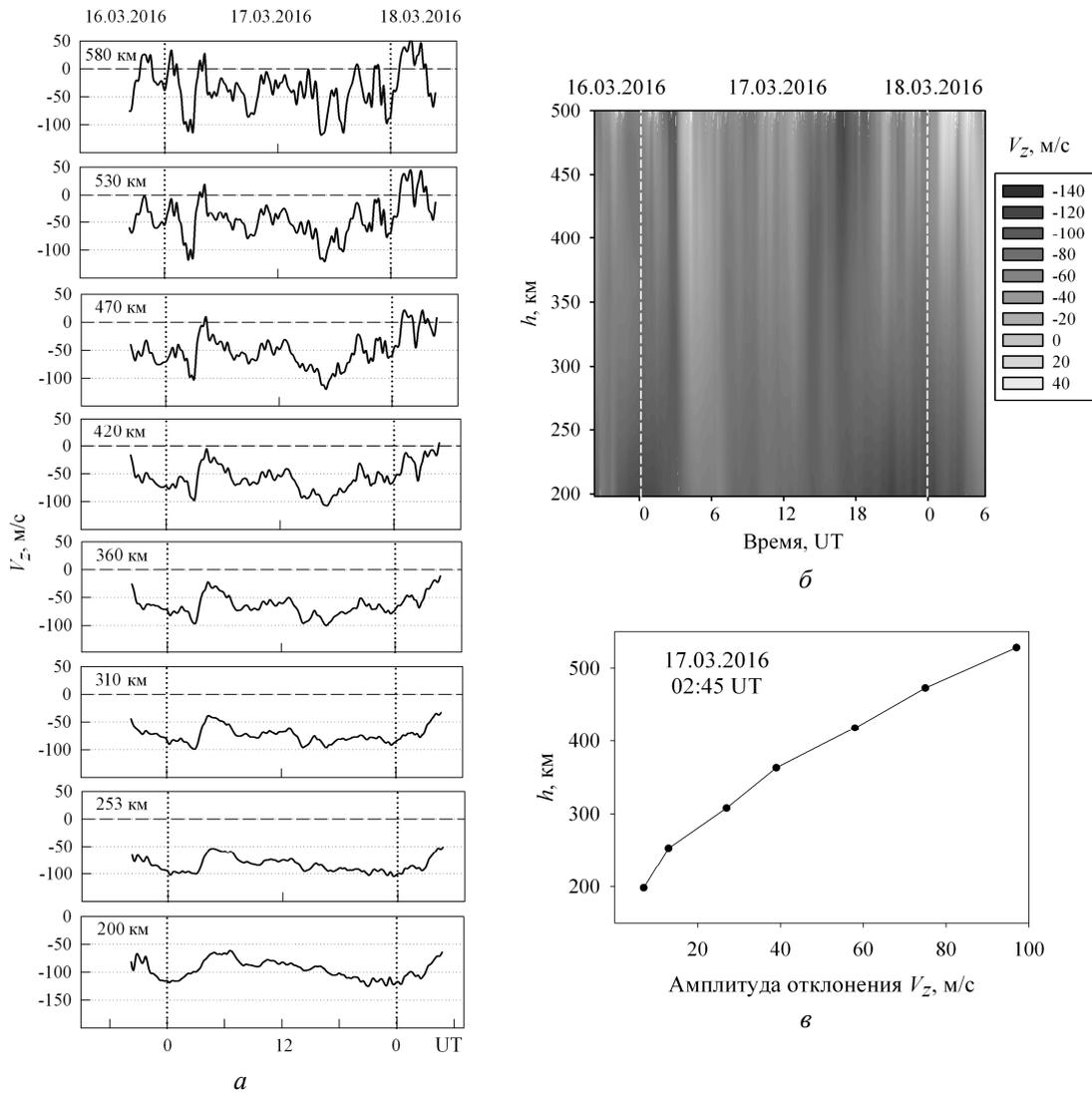


Рис. 5 – Результаты наблюдения вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z : а – временные вариации скорости V_z для ряда высот ионосферы, б – высотно-временные диаграммы вариаций V_z , в – зависимость амплитуды отклонения V_z от высоты в 02:45 17 марта 2016 г.

Вариации скорости движения ионосферной плазмы. Геокосмическая буря повлияла на суточные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z . На рис. 5,а,б приведены результаты наблюдения скорости V_z .

Видно, что в начале суток 17 марта произошло увеличение скорости нисходящего ($V_z < 0$) движения плазмы с максимумом в 02:45 и последующее ее уменьшение (рис. 5,а,б). Отклонение в вариациях скорости имело место после возрастания индекса K_p с 1 до 5–, которое произошло 16 марта с 18:00 до 24:00, и изменения индекса D_{st} в этот же период времени с –16 до –56 нТл (см. рис. 2). С ростом высоты амплитуда отклонения скорости увеличивалась и составила 7, 13, 27, 39, 58, 75, 97 м/с на высотах 200, 250, 310, 360, 420, 470, 530 км соответственно (рис. 5,в). При этом моменты максимального изменения V_z для рассматриваемых высот совпали (в 02:45), что видно на рис. 5,б.

17 марта в промежутке времени с 12:00 до 18:00 на высотах 200–420 км обнаружены квазигармонические колебания V_z с периодом 2 ч 15 мин и амплитудой около 10 м/с (см. рис. 5,а). Вероятно, это была реакция на изменение геомагнитной активности – в том же промежутке времени индекс K_p к 15:00 уменьшился с 4 до 2, а затем вырос до 3+.

Выводы. Геомагнитная обстановка 14–17 марта 2016 г. была возмущенной в результате последовавших друг за другом нескольких суббурь. Индекс K_p достигал значений 5–5.3, что характерно для умеренной геомагнитной бури [10, 11]. Индекс D_{st} достигал –55 нТл.

Эффекты магнитной бури проявились в вариациях критической частоты 16–17 марта во время измерений в Ионосферной обсерватории. Так в вечернее время 16 марта наблюдалась смена фаз ионосферных возмущений с отрицательного (с уменьшением f_oF2 2.3 раза) на положительное (с увеличением f_oF2 в 2 раза). Последующее уменьшение частоты было слабым, относительное отклонение δf_oF2 не превышало 22 %.

Умеренная магнитная буря слабо повлияла на вариации высоты максимума слоя F2 в фазу релаксации, отклонение $\delta z_m F2$ не превышало 15–16 %.

Что касается динамики ионосферной плазмы, то 17 марта наблюдалось увеличение скорости нисходящего движения плазмы V_z с максимумом в 02:45 и последующее ее уменьшение. Амплитуда отклонения V_z возрастала с высотой и составляла 7–97 м/с на высотах 200–530 км.

17 марта в промежутке времени с 12:00 до 18:00 на высотах 200–420 км обнаружены квазигармонические колебания V_z с периодом 2 ч 15 мин и амплитудой около 10 м/с, что, очевидно, связано с изменением геомагнитной активности.

Список литературы

1. Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин. – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 407 с.
2. Черногор Л. Ф. Результаты наблюдения ионосферных процессов над Украиной в 2012–2014 гг. / Л. Ф. Черногор, И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, С. В. Кацко, Д. В. Котов, М. В. Ляшенко, С. В. Панасенко // Космічні дослідження в Україні. 2012–2014 / Ред.: О. П. Федоров. – К.: Академперіодика, 2014. – С. 21–28.
3. Домнин И. Ф. Ионосферные процессы, сопровождавшие геокосмическую бурю 5–6 августа 2011 г. / И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, С. В. Харитонова, Л. Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 320–332.
4. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
5. Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния / В. И. Таран // Геомагнетизм и аэрономия. – 2001. – Т. 41, № 5. – С. 659–666.
6. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 г. / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, С. А. Пазюра, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 1. – С. 4–11.
7. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 20–23 марта 2003 г.: результаты измерений и моделирования / Е. И. Григоренко, С. А. Пазюра, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2005. – Т. 11, № 3/4. – С. 4–19.
8. Григоренко Е. И. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года: результаты наблюдений на харьковском радаре некогерентного рассеяния / Е. И. Григоренко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор, С. В. Черняев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 4. – С. 4–20.
9. Григоренко Е. И. Особенности ионосферной бури 20–23 марта 2003 г. / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 6. – С. 789–802.
10. Григоренко Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 1 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 58–76.
11. Григоренко Е. И. Анализ и классификация ионосферных бурь в средних широтах Европы. 2 / Е. И. Григоренко, В. Н. Лысенко, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т. 13, № 5. – С. 77–96.

References (transliterated)

1. Chernogor L. F., Domnin I. F. *Fizika geokosmicheskikh bur'* [Physics of Geospace Storms: monograph]. H.: HNU imeni V. N. Karazina, 2014, 407 p.
2. Chernogor L. F., Domnin I. F., Emel'janov L. Ja., Kacko S. V., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Panasenko S. V. Rezul'taty nabljudeniya ionosfernnykh processov nad Ukrainoj v 2012–2014 gg. [Results of Observation of Ionospheric Processes over Ukraine in 2012–2014]. *Kosmichni doslidzhennja v Ukraini. 2012–2014* [Space Research in Ukraine. 2012–2014] / Red.: O. P. Fedorov. K.: Akademperiodika, 2014, pp. 21–28.
3. Domnin I. F., Emel'janov L. Ja., Ljashenko M. V., Haritonova S. V., Chernogor L. F. Ionosfernye processy, soprovozhdavshie geokosmicheskiju burju 5–6 avgusta 2011 g. [Ionospheric Processes During the Geospace Storm on August 5–6, 2011]. *Radiofizika i radioastronomija* [Radio Physics and Radio Astronomy]. 2012, vol. 17, no. 4, pp. 320–332.
4. Domnin, I. F., Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.]. “Kharkiv Incoherent Scatter Facility.” *Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”*. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
5. Taran V. I. Issledovanija ionosfery v estestvennom i iskusstvenno vozmushhenom sostojanijah metodom nekogerentnogo rassejanija [Ionosphere Research in Natural and Artificially Disturbed by Incoherent Scattering States]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2001, vol. 41, no. 5, pp. 659–666.

6. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Pazjura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Anomal'naja ionosfernaja burja 21 marta 2003 g. [Anomalous Ionospheric Storm of March 21, 2003]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2004, vol. 10, no. 1, pp. 4–11.
7. Grigorenko E. I., Pazjura S. A., Taran V. I., Chernogor L. F. Anomal'naja ionosfernaja burja 20–23 marta 2003 g.: rezul'taty izmerenij i modelirovanija [Anomalous Ionospheric Storm of March 20–23, 2003. : Measurements and Modeling]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2005, vol. 11, no. 3/4, pp. 4–19.
8. Grigorenko E. I., Taran V. I., Chernogor L. F., Chernjaev S. V. Anomal'naja ionosfernaja burja 21 marta 2003 goda: rezul'taty nabljudenij na har'kovskom radare nekogerentnogo rassejanija [Anomalous Ionospheric Storm of March 21, 2003: Observations at the Kharkiv Incoherent Scatter Radar]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [The Advances of Modern Radioelectronics]. 2005, no. 4, pp. 4–20.
9. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Osobennosti ionosfernoj buri 20–23 marta 2003 g. [Properties Ionospheric Storm on 20–23 March 2003]. *Geomagnetizm i aeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2005, vol. 45, no. 6, pp. 789–802.
10. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analiz i klassifikacija ionosfernyh bur' v srednih shirotah Evropy. 1 [Analysis and classification of ionospheric storms at middle latitudes of Europe. 1]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2007, vol. 13, no. 5, pp. 58–76.
11. Grigorenko E. I., Lysenko V. N., Taran V. I., Chernogor L. F. Analiz i klassifikacija ionosfernyh bur' v srednih shirotah Evropy. 2 [Analysis and classification of ionospheric storms at middle latitudes of Europe. 2]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space Science and Technology]. 2007, vol. 13, no. 5, pp. 77–96.

Поступила (received) 10.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Спостереження іоносферних ефектів над Харковом під час фази релаксації геомагнітної бурі 14–17 березня 2016 р. / С. В. Кацко, Л. Я. Ємельянов, Л. Ф. Черногор // – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 8–12. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Наблюдение ионосферных эффектов над Харьковом в течение фазы релаксации геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г. / С. В. Кацко, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 8–12. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

The ionosphere effects observing over Kharkiv during the relaxation phase of geomagnetic storm on March 14–17, 2016 / S. V. Katsko, L. Ya. Emelyanov, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 8–12. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кацко Софія Валеріївна – кандидат фізико-математичних наук, Інститут іоносфери, науковий співробітник, м. Харків; тел. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

Кацко Софья Валериевна – кандидат физико-математических наук, Институт ионосферы, научный сотрудник, г. Харьков; тел. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

Katsko Sifia Valeryivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Institute of Ionosphere, Researcher, Kharkiv; tel. 057-706-22-87; e-mail: sophiaharytonova@gmail.com.

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

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

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

Черногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Карабіна, професор кафедри космічної радіофізики, м. Харків; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Черногор Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, профессор кафедры космической радиофизики, г. Харьков; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Chernogor Leonid Feoktistovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, V. N. Karazin Kharkiv National University, Professor at the Department of Space Radiophysics, Kharkiv; tel. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

УДК 621.314.26

О. О. ЛЕВОН, О. О. ТОКАРЕВ**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ОБОЛОНКИ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

Розробка програмної оболонки на мові *Matlab* з метою мінімізації часу необхідного для моделювання і проведення експериментальних досліджень електронних систем.

Ключові слова: формувач, високовольтний випрямляч, модуляційний пристрій, блок керування, некогерентне розсіяння.

Разработка программной оболочки на языке *Matlab* с целью минимизации времени, необходимого для моделирования и проведения экспериментальных исследований электронных систем.

Ключевые слова: формирователь, высоковольтный выпрямитель, модуляционное устройство, блок управления, некогерентное рассеяние.

Development of the program environment *Matlab* language to minimize the time required for the simulation and experimental studies of electronic systems.

Keywords: conditioners, high voltage rectifier, modulation device, control unit, incoherent scattering.

Вступ. З розвитком цифрової техніки актуальність використання радіоелектронних систем постійно збільшується. Радіоелектронні пристрої є невід'ємною частиною нашого життя. Не менш важливим питанням стає спрощення користування такими системами. Тому актуальною задачею є розробка універсального програмного коду, котрий реалізує алгоритм проведення експериментальних

досліджень математичної моделі об'єкта моделювання.

Об'єктом дослідження є режими роботи високовольтного випрямляча системи живлення формувача потужних зондуючих імпульсів із системою імпульсно-фазового керування (СІФК) математична модель якого виконана у програмному продукті *Matlab Simulink* [5,6].

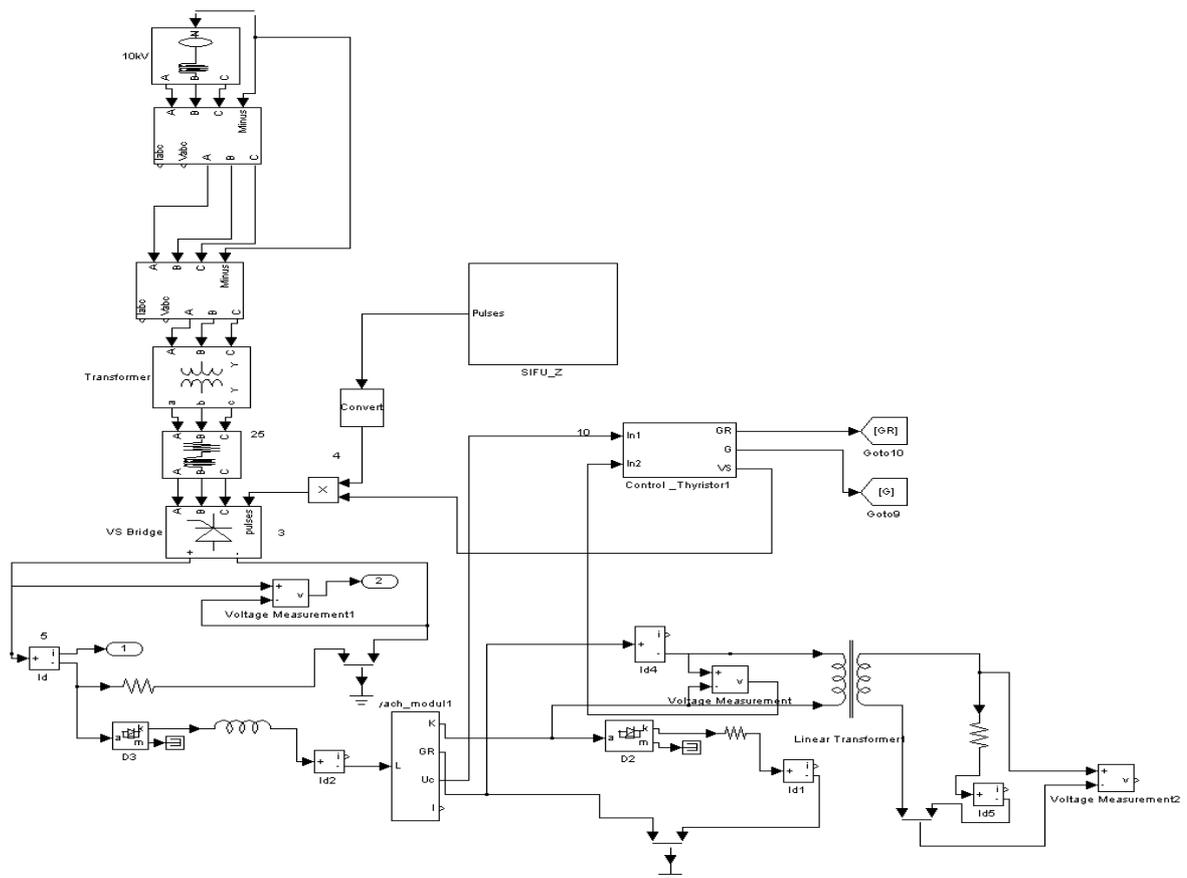


Рис. 1 – *Matlab* – модель системи живлення формувача потужних зондуючих імпульсів

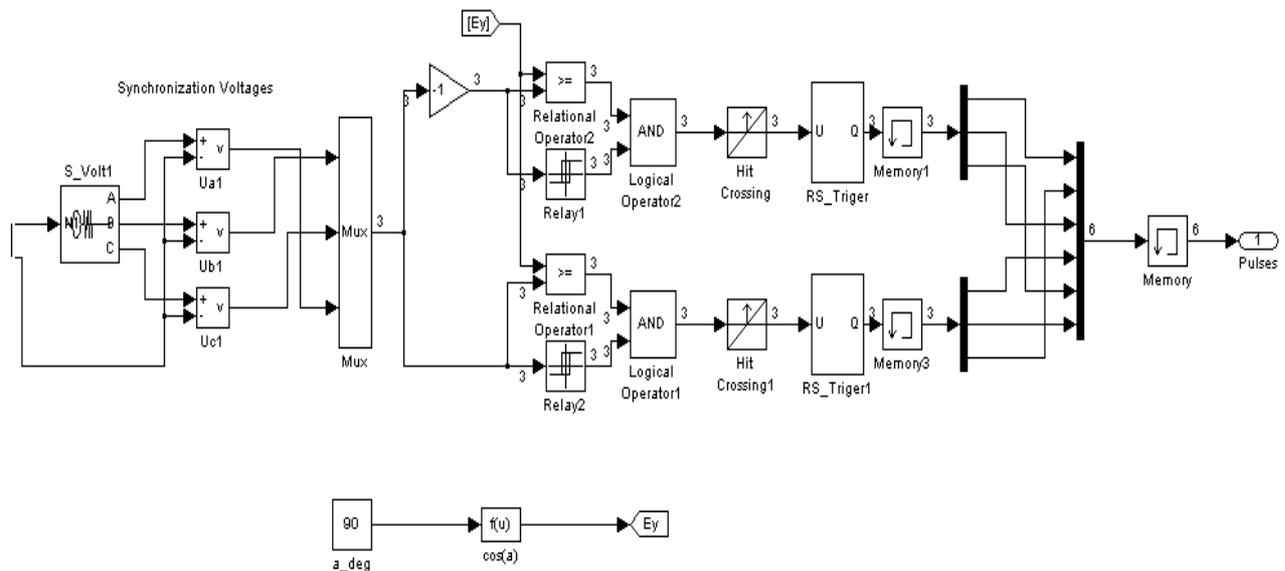


Рис. 2 – Matlab – модель СІФК високовольтним випрямлячем

Matlab – модель системи живлення формувача потужних зондуючих імпульсів представлена на рис. 1.

Модель складається з блоків, що імітують реальні елементи схеми. Блоки живлення підключаються до схеми через блок VS Bridge – модель комірок випрямляча. Блок представляє собою мостову схему, керування якою здійснюється блоком фазового контролю (Phase Control) і одним з виходів блоку Control_Thyristor.

На рисунку блок VS Bridge – високовольтний випрямляч; SIFU-Z – блок керування; Control_Thyristor1 – СІФК випрямлячем; Voltage Measurement1 – датчик напруги; Id – датчик струму. Як і в реальній схемі блок випрямляча під’єднано до блоку комірок модулятора через зарядний дросель L та зарядний вентиль (на схемі блок D3). Також в схемі присутні блоки кола стабілізації (D2), навантаження – блок імпульсного трансформатора. Для знімання показників до важливих точок схеми підключені осцилографи.

Matlab – модель СІФК високовольтним випрямлячем показано на рис. 2. На рисунку a_deg – параметр, що задає кут керування; Ey – кут керування; Pulses – вихідний сигнал.

Розроблена програма запускає модель при різних кутах керування 30, 60 та 90, тобто три рази запускається моделювання схеми, після кожного моделювання програма зберігає на диск графіки сигналів як в графічному вигляді так і в масив даних.

Об’єктом дослідження є режими роботи високовольтного випрямляча зі СІФК.

На рис. 3 представлено початкове вікно роботи розробленої програми.

На рис. 4 представлено вікно роботи програми після запуску.

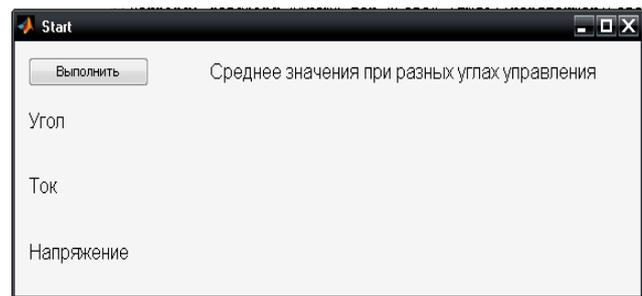


Рис. 3 – Початкове вікно програми

З рисунку 4 видно, що виводяться дані про кути і середні значення датчиків струму і напруги, отримані при моделюванні схеми.

Среднее значения при разных углах управления			
Угол	30	60	90
Ток	74.1504	41.5463	11.5405
Напряжение	549.316	277.856	89.4693

Рис. 4 – Результат роботи програми

Для запуску симуляції необхідно натиснути на кнопку «Виконати». Після чого кнопка стане недоступною, щоб виключити повторний запуск симуляції схеми. У свою чергу запуститься алгоритм програми, який працює за таким принципом. У кодї програми є змінна a_deg, яка зберігає вектор значень кутів керування схеми. Для запуску основного модуля симуляції fnzi його необхідно спочатку ініціалізувати, що робиться за допомогою системної функції load_system('fnzi'). Потім запускається цикл, який послідовно буде запускати основний модуль симуляції

$fmzi$ з різними параметрами кута. Передача значення кута проводиться за допомогою функції $set_param('fmzi/SIFU_Z/a_deg', 'Value', num2str(a_deg(i)))$. Запуск основного модуля симуляції проводиться за допомогою функції $sim('fmzi',1)$. В результаті симуляції на кожному кроці циклу повертаються такі значення:

$$[T, X, Out_Id, Out_Vd],$$

де:

T – вектор значення часу;

X – розрахункове стандартне відхилення модельованого відгуку для лінійних або нелінійних моделей;

Out_Id – вектор значень датчика струму;

Out_Vd – вектор значень датчика напруги.

На кожному кроці циклу, на підставі отриманих даних, будується два графіка струму і напруги, значення яких зберігаються в змінних Out_Id і Out_Vd . Дані графіки не відображаються користувачу, а зберігаються в графічний файл $fig_XXX.png$. Так само зберігаються значення за якими був побудований графік в файли $data_Id_XXX.txt$ і $data_Vd_XXX.txt$, де XXX – кут при якому була проведена симуляція схеми. Також за допомогою функції $average()$ розраховується середнє значення даних датчика струму і напруги, які зберігаються в змінні $a_i(i)$ та $a_v(i)$.

По завершенню циклу в основне вікно програми, як показано на рис. 4, виводяться дані про кути і середні значення датчиків струму і напруги, отримані при моделюванні. Також стає доступною кнопка «Виконати».

За даними, що були отримані при моделюванні, будуються графіки при різних кутах керування (30, 60, 90).

На рис. 5, показано моделювання випрямляча з кутом керування 30 градусів.

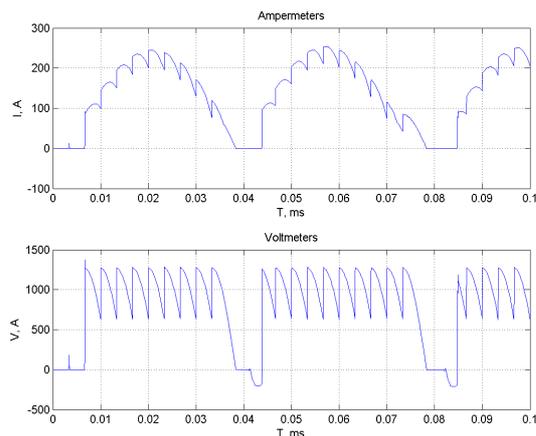


Рис. 5 – Моделювання випрямляча (кут керування 30 градусів)

На рис. 6 показано моделювання випрямляча з кутом керування 60 градусів.

На рис. 7 показано моделювання випрямляча з кутом керування 90 градусів.

Даний програмний код може використовуватись

у подальшому, для досліджень будь-яких електронних систем та пристроїв, наприклад для дослідження напівпровідникових перетворювачів електроенергії з цифровими системами керування [1-3]. Результати моделювання підтвердили ефективність розробленої програмної оболонки.

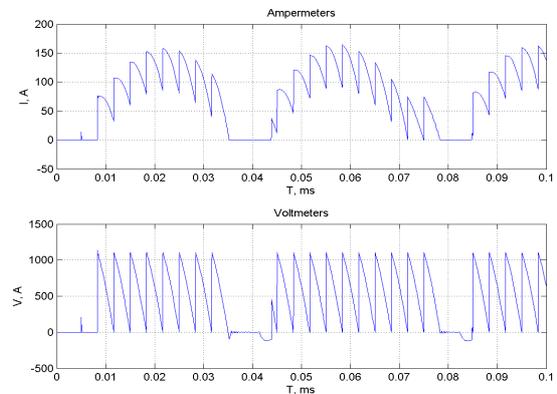


Рис. 6 – Моделювання випрямляча (кут керування 60 градусів)

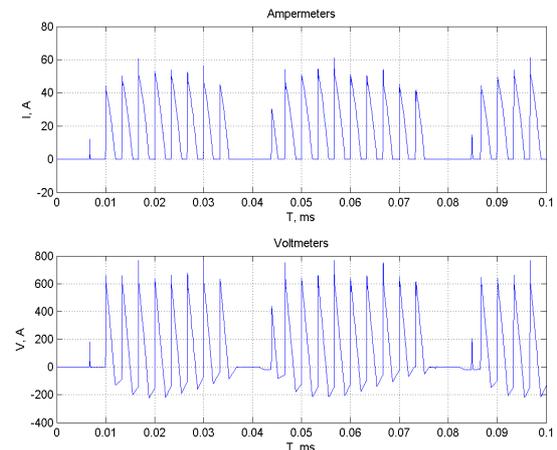


Рис. 7 – Моделювання випрямляча (кут керування 90 градусів)

Висновки. Розроблено програмний код, універсальний для будь-якого об'єкта моделювання, який реалізує алгоритм проведення експериментальних досліджень математичної моделі об'єкта моделювання. Було проведено дослідження роботи високовольтного випрямляча й порівняння ефективності роботи оболонки на програмному та призначеному для користувача рівнях.

Програмна оболонка розроблена з метою мінімізації часу необхідного для моделювання і проведення експериментальних досліджень електронних систем. Моделювання було виконане за допомогою пакетів прикладних програм *Matlab*.

Даний програмний код може використовуватись у подальшому, для досліджень або для навчання, результати моделювання підтвердили його ефективність.

Список літератури

1. Домнин И. Ф. Динамические характеристики двухмостового низкочастотного канала компенсатора неактивной мощности /

- И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда* // Технічна електродинаміка. – 2009. – Ч. 4. – С. 63–67.
2. Домнин И. Ф. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И. Ф. Домнин, Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2010. – Ч. 2. – С. 44–47.
 3. Кайда Е. А. Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е. А. Кайда // Технічна електродинаміка. – 2011. – Ч. 1. – С. 184–188.
 4. Левон Е. А. Оптимизация параметров цифрового нечеткого регулятора / Е. А. Левон, И. Ф. Домнин, В. П. Северин // Технічна електродинаміка. – 2012. – Ч. 2. – С. 91–94.
 5. Domnin I. F. Fuzzy logic based control system of converter for powerful sounding pulses generator / I. F. Domnin, O. O. Levon, V. V. Varvyanskaya // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2014. – № 47 (1089). – С. 22–27.
 6. Левон О. О. Напівпровідниковий двоканальний регульований компенсатор неактивних складових повної потужності: дис... канд. техн. наук: 05.09.12 / Левон Олена Олександрівна. – Х., 2015. – 200 с.
- References (transliterated)**
1. Domnin I. F., Kaida E. A. Dinamicheskie karakteristiki dvuhmostovogo nizkochastotnogo kanala kompensatora neaktivnoi moshnosti [The dynamic characteristics of double-bridge channel low-frequency reactive power compensator]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodyamics]. 2009, ch. 4, pp. 63–67.
 2. Domnin I. F., Kaida E. A. Mnogokonturnaya Sistema upravleniya filitrokompensiruyushim ustroystvom [Multi-loop control system of filter compensating device]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodyamics]. 2010, ch. 2, pp. 44–47.
 3. Kaida E. A. Nechetkoe regulirovanie ustroystvom kompensacii neaktivnuh sostavlyashih polnoi moshnosti [Fuzzy control devices compensate for the inactive components of total power]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodyamics]. 2011, ch. 1, pp. 184–188.
 4. Domnin I. F., Levon E. A., Severin V. P. Optimizaciya parametrov cifrovogo nechetkogo regulyatora [Optimization of parameters of digital fuzzy controller]. *Tekhnichna elektrodynamika* [Technical electrodyamics]. 2012, ch. 2, pp. 91–94.
 5. Domnin I. F., Levon O. O., Varvyanskaya V. V. Fuzzy logic based control system of converter for powerful sounding pulses generator. *Visnuk Nacionalnogo texnichnogo universitetu "Kharkivskiy politechniy institut"* [Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"]. 2014, no. 47 (1089), pp. 22–27.
 6. Levon O. O. Napivprovodnikovuy dvokanalnuy regulyovanuy kompensator neaktivnuh skladovuh povnoi potugnosti: diss... Ph.D.: 05.09.12. Levon Olena Oleksandrovna. Kharkiv. 2015, 200 p.
- Надійшла (received) 05.09.2016*

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розробка програмної оболонки для моделювання та дослідження електронних систем / О. О. Левон, О. О. Токарев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 13–16. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Разработка программной оболочки для моделирования и исследования электронных систем / Е. А. Левон, О. О. Токарев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 13–16. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Program environment developing for the modeling and study of electronic systems / О. О. Levon, О. О. Tokarev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 13–16. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левон Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніки; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Левон Елена Александровна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры радиоэлектроники; тел.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Levon Olena Oleksandrivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of radioelectronics; tel.: (068) 890-04-38; e-mail: elena_levon@ukr.net.

Токарев Олег Олегович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (050) 651-38-83; e-mail: lebron94@mail.ru.

Токарев Олег Олегович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (050) 651-38-83; e-mail: lebron94@mail.ru.

Tokarev Oleg Olegovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (050) 651-38-83; e-mail: lebron94@mail.ru.

УДК 621.391

А.В. БРЕЗГУНОВ

ВЫЧИСЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО КОЛЕБАНИЯ УЗКОПОЛОСНОГО РАДИОИМПУЛЬСА

Розглянута ідея щодо визначення амплітуди, початковою фазою високочастотних коливань вузькосмугових радіоімпульсів і амплітуди, що впливають на них гауссових шумів, використовуючи значення комплексної огинаючої прийнятого радіоімпульсу і значень відгуків кореляторів, з різними початковими фазами коливань опорних генераторів.

Ключові слова: сигнал, шум, корелятор, початкова фаза сигналу, амплітуда, потужність.

Рассмотрена идея по определению амплитуды, начальной фазой высокочастотных колебаний узкополосных радиоимпульсов и амплитуды, воздействующих на них гауссовых шумов, используя значения комплексной огибающей принятого радиоимпульса и значений откликов кореляторов, с разными начальными фазами колебаний опорных генераторов.

Ключевые слова: сигнал, шум, коррелятор, начальная фаза сигнала, амплитуда, мощность.

Considered the idea to determine the amplitude and initial phase of high-frequency narrowband radio pulses and amplitude, induced Gaussian noise, using the values of the complex envelope of the received pulse and the values of the responses of the correlators with different initial phases of oscillations of the reference generator.

Keywords: signal, noise, correlator, the initial phase of the signal, amplitude, power.

Введение. В системах связи и радиолокации широко используются радиоимпульсы с прямоугольной огибающей с изменяющейся амплитудой и начальной фазой высокочастотных колебаний [1, 2]. Постоянно растущие требования по повышению энергетической эффективности радиотехнических систем способствовали совершенствованию способов обработки радиосигналов, в том числе и корреляционного приёма [1, 2], однако, исследования показывают новые возможности по определению параметров узкополосных радиоимпульсов и воздействующих на них флуктуационных гауссовых шумов.

Цель статьи – рассмотреть идею по определению амплитуды A , начальной фазы φ_{0i} узкополосных радиоимпульсов $S_i(t) = A \cos(\omega t + \varphi_{0i})$ длительностью T_{II} с частотой несущего высокочастотного колебания ω и амплитуды B , воздействующих на них флуктуационных гауссовых шумов $n(t)$, используя значения комплексной огибающей принятого радиоимпульса и значений откликов корреляторов, начальные фазы $\varphi_{0\Pi}$ колебаний опорных генераторов которых изменяются с шагом $\Delta\varphi_{0\Pi}$.

Основная часть. I. Пусть из линии связи с флуктуационным гауссовым шумом $n(t)$ поступает узкополосный сигнал

$$S^*(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n(t). \quad (1)$$

После частотной фильтрации в тракте приёма флуктуационный (без разрывов или скачков фазы) гауссов шум $n(t)$ с центральной частотой ω изменяется по частоте в полосе пропускания Π относительно ω на величину $\pm\Delta\omega(t)$ и имеет амплитуду $B(t)$ [2] ($\Delta\omega/\omega \ll 1$):

$$n(t) = B(t) \cdot \cos[(\omega t + \Delta\omega(t))]. \quad (2)$$

Так как $n(t)$ – узкополосный шум, то из-за небольшого значения набега его фазы φ_n на малом интервале времени $\Delta t_i \ll T_{II}$ Δt_i будем считать, что $\Delta\omega(t)$ незначительно изменяется, и на малом Δt_i , пренебрегая изменением частоты $\Delta\omega(t)$, $n(t)$ можно рассматривать как отрезок гармонического колебания с начальной фазой φ_{ni} :

$$n(t)|_{\Delta t_i} = B_i \cdot \cos(\omega t + \varphi_{ni}), \quad (3)$$

где B_i – среднее значение амплитуды шума $n(t)$, на интервале времени Δt_i .

Т.е. на малом интервале времени Δt_i узкополосные сигнал $S(t)$ и шум $n(t)$ имеют одинаковую форму и $S^*(t) = S(t) + n_0(t)$ – результат сложения двух гармонических колебаний $S(t)$ и $n(t)$ с разными амплитудами и начальными фазами.

За длительность $T_{II} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_N$ модель “дискретного” шума $n^*(t)$:

$$n^*(t) = B_1 \cdot \cos(\omega t + \varphi_{n1}) + B_2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_{n2}) + \dots + B_N \cdot \cos(\omega t + \varphi_{nN}). \quad (4)$$

Определим максимальное значение интервала времени Δt_i для шума $n^*(t)$ при корреляционном приёме.

Так как в корреляционной схеме подавление шумов в основном определяется отличием их фазы от фазы опорного колебания, определим значение набега фазы за время Δt_i при начальном значении частоты шума $n(t)$, ω_B – верхнее значение полосы пропускания тракта и ω_H – нижнее значение полосы пропускания тракта, т.е. когда набег фазы наибольший.

Найдём время Δt_i , за которое энергия $S_i(t) \cdot n(t)$ изменится на незначительную величину ε .

1. Пусть за время Δt_i значение частоты шума неизменно. Тогда, используя известное соотношение:

© А. В. Брезгунов, 2016

$$\cos a \cdot \cos b = 0,5[\cos(a - b) - \cos(a + b)], \quad (5)$$

запишем для верхнего значения ω_B :

$$S_i(t) \cdot n(t)|_{\Delta t_i} = 0,5 \cdot A_i \cdot B_i \cdot \{ \cos[(\omega_B - \omega)t + \varphi_{ni} - \varphi_0] - [\cos(\omega_B + \omega)t + \varphi_{ni} + \varphi_0] \}. \quad (6)$$

Первый член суммы (6) – это низкочастотное колебание. После интегрирования в (1) значение второго члена суммы (6) будет стремиться к нулю (и равно нулю при равном количестве положительных и отрицательных полупериодов частоты $\omega_B + \omega$).

Число периодов j колебаний для верхнего значения ω_B :

$$j = \omega_B t = \omega t + 2\pi l,$$

где l – количество частей периодов ω_0 , т.е. значение набега фазы в частях периода (0,5; 0,25; 0,75 и др.), набег фазы $l_i = 1$ соответствует набегу фазы $\psi_i = 2\pi$ ($\psi = 2\pi l$). Тогда набег фазы для ω_H найдём из:

$$\omega_H t = \omega_0 t - l, \text{ или } \psi = 2\pi(\omega_0 - \omega_H)t = \pi l t.$$

Набег фазы для ω_B :

$$\psi = 2\pi(\omega_B - \omega_0)t = \pi l t.$$

При $\psi = 11,25^\circ$ ($\pi/16$) значение $S_i(t) \cdot n(t) = \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t + \pi/16)$ уменьшится относительно $\psi = 0^\circ$ на $\varepsilon < 1,93\%$ за $\Delta t_i = 1/16T$, а при $\psi = 22,5^\circ$ ($\pi/8$) за $\Delta t_i = 1/8T - \varepsilon < 7,62\%$. Но, если $\psi = 78,75^\circ$, то значение $S_i(t) \cdot n(t)$ уменьшится относительно $\psi = 67,5^\circ$ на $\varepsilon \approx 50\%$, однако здесь значение $S_i(t) \cdot n(t)$ будет в $k > 5$ раз меньше $S_i(t) \cdot n(t)$ при $\psi = 0^\circ$.

2. Нетрудно убедиться, что при линейном изменении частоты или при постоянных значениях частот $(\omega_0 - \omega_H)/2$ и $(\omega_0 + \omega_H)/2$:

$$\psi = \pi(\omega_0 - \omega_H)t = \pi l t / 2 \text{ и } \psi = \pi(\omega_B - \omega_0)t = \pi l t / 2.$$

Т.е. здесь за $\Delta t_i = 1/8T$ $\varepsilon < 1,93\%$, а за $\Delta t_i = 1/4T - \varepsilon < 7,62\%$.

Понятно, что чем меньше значение Δt_i , тем меньше ε . Так как реально частота шума $n(t)$ изменяется и флюктуирует обычно не по линейному закону, то значение Δt_i может быть выбрано равным:

$$\Delta t_i \leq 1/(16T \dots 32T). \quad (7)$$

II. Поступивший узкополосный сигнал (1) с учётом (4) можно записать:

$$S^*(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n^*(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + B_1 \cdot \cos(\omega t + \varphi_{n1}) + B_2 \cdot \cos(\omega t + \varphi_{n2}) + \dots + B_N \cdot \cos(\omega t + \varphi_{nN}). \quad (8)$$

За каждый интервал времени Δt_i на выходах K корреляторов, полагая для упрощения записи, что

сигналы с опорных генераторов корреляторов имеют единичную амплитуду получаем K откликов:

$$Y_j = \int [A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + B_i \cdot \cos(\omega t + \varphi_{ni})] \cdot \cos(\omega t + \varphi_{0j}) dt, \quad (9)$$

где $j = 1 \dots K$.

После интегрирования (9), используя (5) (компоненты полученной суммы с $2\omega t$ будут стремиться к нулю) можно записать для интервала времени Δt_i :

$$Y_j = A_{II} \cos(\varphi_0 - \varphi_{0j}) + B_{III} \cos(\varphi_{ni} - \varphi_{0j}), \quad (10)$$

где в результате интегрирования компонент постоянных составляющих суммы в (9) по линейному закону

$$A_{II} = 0,5 \cdot \Delta t_i \cdot A, \quad B_{III} = 0,5 \cdot \Delta t_i \cdot B_i. \quad (11)$$

III. Имея возможность на каждом (коротком) интервале времени Δt_i получать значение комплексной огибающей принятого радиоимпульса $S^*(t)$, выделим интервалы, где значение огибающей максимально и минимально. Из (8) видно, что амплитуда $S^*(t)$ на интервале Δt_k будет:

- максимальна $S_{МАКС}$ на интервале Δt_k и равна $(A + B_k)$ если $\varphi_0 = \varphi_{nk}$;
- минимальна $S_{МИН}$ на интервале Δt_m , когда $\varphi_0 = -\varphi_{nm}$, равна $(A - B_m)$ на интервале Δt_m при $A > B_k$ и равна $(B_k + 2A)$ при $A < B_k$ (фаза ВЧ колебания $\varphi_{\Sigma k}$ противоположного знака фазе ВЧ колебания радиоимпульса φ_0).

Для такого варианта с двумя интервалами Δt_m и Δt_k можно ориентировочно определить значения значения амплитуды радиоимпульса и шума амплитуды полагая, что $B_k \approx -B_m$ для $(A > B_k)$:

$$A_{km} \approx 0,5(S_{МАКС} + S_{МИН}); \quad B_{km} \approx 0,5(S_{МАКС} - S_{МИН}), \quad (12)$$

а для $A < B_k$:

$$B_{km-} \approx 0,5(S_{МАКС} + S_{МИН}); \quad A_{km-} \approx 0,5(S_{МАКС} - S_{МИН}). \quad (13)$$

Так как B_k может отличаться от B_m и B_i и от амплитуд шума на других интервалах, то могут быть ещё интервалы времени Δt_i с $\varphi_0 = \varphi_{ni}$ и $\varphi_0 = -\varphi_{ni}$.

Из (12) или (13) получаем, что максимальная погрешность значений A_{km} и B_{km} определяется максимальной $B_{МАКС}$ и минимальной $B_{МИН}$ амплитудой шума

$$\delta_{МАКС} \approx 2(B_{МАКС k} - B_{МИН m}). \quad (14)$$

Уменьшить погрешность δ можно при более точном вычислении амплитуды шума, получив его среднее значение $B_{СР}$, используя значение откликов корреляторов.

IV. Для вычисления амплитуды шума будем использовать значения откликов коррелятора, начальная фаза опорного генератора которых $\varphi_{0\Pi-\pi/2}$ сдвинута относительно начальной фазы колебаний опорного генератора $\varphi_{0\Pi}$ с максимальным значением отклика $Y_{iМАКС} = Y_j$ на интервале Δt_k на $\pi/2$ и значения откликов коррелятора, начальная фаза опорного генератора которых совпадает с начальной фазой φ_0 ВЧ колебания.

Полагаем, что начальные фазы ВЧ колебания и шума на интервале Δt_k равны $\varphi_0 = \varphi_{ni}$, тогда значение отклика коррелятора с начальной фазой опорного генератора $\varphi_{0\Pi-\pi/2}$ на интервале Δt_k

$$Y_{j-\pi/2} = A_{II} \cos(\varphi_0 - \pi/2) + B_{II} \cos(\varphi_{ni} - \pi/2) = 0. \quad (15)$$

Выбрав интервалы Δt на которых значение отклика коррелятора стремится к значению, при котором сдвиг фаз между фазой $\Delta\varphi = \varphi_0 \pm \varphi_{ni}$ не приводит к значительной погрешности значений A_{II} и B_{II} ,

$$Y_{j-\pi/2} = A_{II} \cos(\varphi_0 - \pi/2) + B_{II} \cos(\varphi_0 \pm \Delta\varphi_{ni} - \pi/2) \leq \Theta, \quad (16)$$

определим среднее значение суммы амплитуды радиоимпульса A и амплитуды шума, почти синфазного с ВЧ колебанием радиоимпульса B_+ для наибольших N значений комплексной огибающей принятого радиоимпульса $S_{МАКС1}, S_{МАКС2}, \dots, S_{МАКСN}$:

$$(A+B_+)_{CP} = (S_{МАКС1} + S_{МАКС2} + \dots + S_{МАКСN})/N. \quad (17)$$

Для наименьших значений комплексной огибающей принятого радиоимпульса, число которых удовлетворяет условию (16) может быть равно M для $Y_{j-\pi/2}$ положительного знака: $S_{МИН1}, S_{МИН2}, \dots, S_{МИНM}$ и равно L для $Y_{j-\pi/2}$ отрицательного знака: $S_{МИН-1}, S_{МИН-2}, \dots, S_{МИН-L}$.

Если знак $Y_{j-\pi/2}$ положителен, то

$$(A-B_+)_{CP} = (S_{МИН1} + S_{МИН2} + \dots + S_{МИНM})/M. \quad (18)$$

Если знак $Y_{j-\pi/2}$ отрицателен, то шум и ВЧ колебание радиоимпульса противофазны, а

$$(B_- - A)_{CP} = (S_{МИН-1} + S_{МИН-2} + \dots + S_{МИН-L})/L. \quad (19)$$

При знании средних значений $(A+B_+)_{CP}$, $(A-B_+)_{CP}$ и $(B_- - A)_{CP}$, определим значения значения амплитуды радиоимпульса и шума амплитуды для $(A > B_k)$:

$$\begin{aligned} A_{CP} &\approx 0,5[(A+B_+)_{CP} + (A-B_+)_{CP}]; \\ B_{km} &\approx 0,5[(A+B_+)_{CP} - (A-B_+)_{CP}], \end{aligned} \quad (20)$$

а для $A < B_k$

$$\begin{aligned} B_{CP} &\approx 0,5[(A+B_+)_{CP} + (A-B_+)_{CP}]; \\ A_{CP} &\approx 0,5[(A+B_+)_{CP} - (A-B_+)_{CP}]. \end{aligned} \quad (21)$$

Значения $S_{МАКС}$ и $S_{МИН}$ можно вычислять по значениям откликов корреляторов, используя (11).

С учётом (16) значение Θ , используемое для отбора откликов корреляторов, зададим таким образом, чтобы нормированные отклики $Y_{j-\pi/2}^* = Y_{j-\pi/2}/0,5\Delta t_i B_{km-}$ и $Y_{j-\pi/2}^* = Y_{j-\pi/2}/0,5\Delta t_i B_{km}$ имели значение $0,053 \dots 0,1$, что соответствует расхождению фаз между фазой шума и опорным колебанием сдвинутым на $\pi/2$ в (16) при $\varphi_0 = 0$:

$$\Delta\varphi_{ni} = (\pm\pi/128 \dots \pm\pi/64) \text{ или } (\Delta\varphi_{ni} = \pm 6,125^\circ \dots \pm 3,0625^\circ). \quad (22)$$

Для откликов корреляторов с Y_j , при отличиях фазы шума и опорного колебания на $\Delta\varphi_{ni} = (\pm\pi/128 \dots \pm\pi/64)$ значение изменится в $0,9986 \dots 0,9943$ раза.

Если значение максимального отсчёта $(A+B)_{МАКС}$ больше значения $Y_{iМАКС}/0,5\Delta t_i$, то это значение можно использовать для подстройки фаза опорного генератора коррелятора на угол:

$$\varphi_{ПОД} = \arcsin[(A+B)_{МАКС} - Y_{iМАКС}/0,5\Delta t_i] / (A+B)_{МАКС}. \quad (23)$$

Начальная фаза колебания опорного генератора $\varphi_{ОТС}$ одного из корреляторов относительно которой, отсчитываются значения начальных фаз других колебаний и будет показывать начальную фазу ВЧ колебанием радиоимпульса φ , которая у нас ранее для компактности записи считалась равной нулю $\varphi_0 = 0$. Зная φ , с учётом (22), можно принимать решения о переданном сигнале с любой фазовой модуляцией с минимальным отличием фаз $\Delta\varphi_{МИН} < 2\pi/64$, а зная амплитуду A ВЧ колебания радиоимпульса можно демодулировать и сигналы с квадратурной амплитудной модуляцией QAM (при $\Delta\varphi_{МИН} < 2\pi/64$):

$$A_I = A \cos\varphi \text{ и } A_Q = A \cos(\varphi - \pi/2), \quad (24)$$

где A_I – амплитуда синфазной компоненты сигнала и A_Q – амплитуда квадратурной компоненты сигнала.

V. Если в радиоимпульсе $S^*(t)$ после подстройки фазы опорного генератора коррелятора ($\varphi_0 = \varphi_{0\Pi}$) получить значения отсчётов S^*_i, S^*_j и т.д. в точках, где значения ВЧ колебания радиоимпульса без шумов должны быть равны нулю ($\varphi_0 = 0, \pi, 2\pi$ и т.д.), то вычислив среднее этих отсчётов, можно подучить ориентировочное значение амплитуды шума B^*_{CP} . Это можно использовать для сравнения с результатами (12), (13) и (20), (21).

Зная сопротивление нагрузки, на котором выделяется напряжение $S^*(t)$ и ориентировочное значение мощности шума, можно определить ориентировочное значение вероятности ошибки приёма сигнала (например, QAM) для обычного корреляционного метода [1]. Для многих видов манипуляции широко распространены зависимости вероятности ошибки бита от отношения мощности сигнала к мощности шума для различных методов приёма [1].

В зависимости от требований к достоверности, скорости передачи использую (12), (13) или (20), (21) или значение амплитуды шума B^*_{CP} (при известном значении A) можно реализовать адаптивную обработку приёмником.

При необходимости приёма в условиях изменяющейся несущей частоты, одним из решений может быть многоканальная схема, в каждом из каналов, настроенным на определённую частоту которой осуществляется обработка с использованием выше рассмотренных идей. По каналу с наибольшим значением A и определяется несущая частота.

Выводы. 1. Рассмотренная идея определения амплитуды A , начальной фазы φ_{0i} узкополосных радиоимпульсов $S_i(t)$ и амплитуды B , воздействующих на них флюктуационных гауссовых шумов $n(t)$, используя значения комплексной огибающей принятого радиоимпульса и значений откликов корреляторов, может быть использована при реализации систем обработки различных сигналов.

2. Возможность осуществления принятия решений о параметрах переданного сигнала в условиях, когда уровень узкополосного сигнала ниже уровня шумов, может позволить реализовать энергетически высокоэффективные радиотехнические системы, снизить их негативное влияние на живые организмы.

3. Рассмотренный подход может рассматриваться как обработка сигнала по “наиболее надёжным временным интервалам сигнала”, когда количество

этих интервалов выбирается исходя из степени адаптации системы обработки к условиям приёма.

4. Каждый вариант определения амплитуды A , начальной фазой φ_{0i} радиоимпульсов и амплитуды B шумов может использоваться самостоятельно в конкретных радиотехнических системах.

5. Реализация рассмотренной идеи сдерживается временными затратами на обработку принятого сигнала $S^*(t)$, но постоянное увеличение быстродействия элементной базы аппаратуры вызывает оптимизм.

Список литературы

1. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К.: Вища шк., 1986. – 238 с.
2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. “Радиотехника”/ С. И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2005. – 462 с.

References (transliterated)

1. Kuzmin I. V., Kedrus V. A. *Osnovy teorii informacii i kodirovaniya* [Fundamentals of information theory and coding]. – Kiev, High school Publ., 1986, 238 p.
2. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cipi i signaly: Ucheb. dlja vuzov po spec. “Radiotekhnika”* [Radio Circuits and Signals: Proc. for by special institutions. “Radio engineering”]. – Moscow: High school Publ., 2005, 462 p.

Поступила (received) 05.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Обчислення амплітуди і початкової фази високочастотного коливання вузькосмугового радіоімпульсу / О. В. Брезгунов // Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ “ХПІ”, 2016. – № 34 (1206). – С. 17–20. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

Вычисление амплитуды и начальной фазы высокочастотного колебания узкополосного радиоимпульса / А. В. Брезгунов // Вестник НТУ “ХПИ”. Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2016. – № 34 (1206). – С. 17–20. – Библиогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

The calculation of the amplitude and initial phase of high-frequency fluctuations of narrowband radar pulse / О. V. Brezgunov // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2016. – No. 34 (1206). – P. 17–20. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, старший викладач кафедри радіоелектроніки; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

Брезгунов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, старший преподаватель кафедры радиоэлектроники; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

Brezgunov Oleksandr Vladivirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Associate Professor at the Department of Radioelectronics; tel.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

УДК 621.391

А.В. БРЕЗГУНОВ, С.А. БРЕЗГУНОВ

ФИЛЬТРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ШУМА

Розглянуто ідею обробки сигналів, за допомогою шуму, що генерується в пристрої фільтрації. У статті проведено оцінку значення шумової компоненти сигналу після фільтрації.

Ключові слова: сигнал, шум, кореляція, фільтрація, амплітуда, потужність.

Рассмотрена идея обработки сигналов, с помощью шума, генерируемого в устройстве фильтрации. В статье проведена оценка значения шумовой компоненты сигнала после фильтрации.

Ключевые слова: сигнал, шум, корреляция, фильтрация, амплитуда, мощность.

We consider the idea of signal processing by the noise generated in the filtering device. The article evaluated value of the noise signal component after filtering.

Keywords: signal, noise, correlation, filtration, amplitude, power.

Введение. Фильтрация электрических сигналов широко используется для уменьшения влияния помех каналов связи $n_0(t)$ на решение о переданном сигнале $S(t)$ в системах связи, локации и др. [1, 2]. В условиях, когда мощность P_S принятого сигнала $S^*(t)=S(t)+n_0(t)$ мала по сравнению с мощностью принятой помехи P_N , для повышения соотношения P_S/P_N можно многократно передавать сигнал $S(t)$ и использовать отличие помех в принятых реализациях – $n_i(t) \neq n_j(t)$ [1]. Если сигнал $S(t)$ не может быть передан несколько раз, то для повышения соотношения P_S/P_N , можно на принятый сигнала $S^*(t)$ воздействовать пропущенным через фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega$ равной полосе пропускания $\Delta\omega$ устройства приёма сигнала $S^*(t)$, флуктуационным гауссовым шумом $n_1(t)$, имеющим среднюю мощность P_{N1} равную средней мощности принятой помехи P_{N0} . Полученный сигнал $S^{**}(t)=S(t)+n_0(t)+n_1(t)$ может быть определённым образом ограничен по амплитуде и пропущен через фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega$ для того, чтобы средняя мощность шума $n_{\Sigma}=n_0(t)+n_1(t)$ P_{Σ} не превышала мощности принятой помехи P_{N0} и шум $n_{\Sigma}(t)$ максимально отличался во временной области от помехи $n_0(t)$. Выбор определённых подходов для оценки пригодности определённых отрезков $\Delta t_i S^{**}(t)$ из конкретной реализации сигнала $S^{**}(t)$ может позволить подобрать наиболее подходящие отрезки $\Delta t_i S^{**}(t)$ из реализаций, полученных при различных “формах” флуктуационного гауссового шума, для повышения соотношения P_S/P_N принятого сигнала.

Цель статьи – разработать предложения по повышению соотношения P_S/P_N , на основании изучения изменения на интервале времени: принятого сигнала $S^*(t)=S(t)+n_0(t)$; помехи (шума) канала связи $n_0(t)$; флуктуационного гауссового шумом $n_1(t)$, после узкополосной фильтрации; сигнала, полученного из $S^*(t)$ после воздействия флуктуационного гауссового шума $S^{**}(t)=S(t)+n_0(t)+n_1(t)$ при различных сдвигах фаз $\Delta\varphi$ шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$, а также предложить метод фильтрация широкополосного сигнала $S^*(t)$ с помощью шума $n_1(t)$.

Основная часть. Пусть из линии связи с флуктуационным гауссовым шумом (помехой), на

несущей частоте ω с начальной фазой φ_0 и амплитудой A поступает узкополосный сигнал (рис. 1)

$$S(t)=A \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) + n_0(t). \quad (1)$$

После частотной фильтрации в тракте приёма флуктуационный гауссов шум $n_0(t)$ с центральной частотой ω изменяется по частоте в полосе пропускания $\Delta\omega$ относительно ω на величину $\pm\Delta\omega(t)$ и имеет амплитуду $B(t)$ [2] ($\Delta\omega/\omega \ll 1$):

$$n_0(t)=B(t) \cdot \cos[(\omega t + \Delta\omega(t))]. \quad (2)$$

Так как $n_0(t)$ – узкополосный шум, то из-за небольшого значения набега его фазы φ_n на малом интервале времени Δt_i будем считать, что $\Delta\omega(t)$ незначительно изменяется, и на малом Δt_i , пренебрегая изменением частоты $\Delta\omega(t)$, $n_0(t)$ можно рассматривать как отрезок гармонического колебания с начальной фазой φ_{ni} (рис. 1):

$$n_0(t)|_{\Delta t_i} = B_{i0} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{ni}), \quad (3)$$

где B_i – среднее значение амплитуды шума $n_0(t)$, на интервале времени Δt_i .

Т.е. полагаем, что на малом интервале времени Δt_i узкополосные сигнал $S(t)$ и шум $n_0(t)$ имеют одинаковую форму – это отрезки косинусных функций.

Принятый сигнал на интервале времени Δt_i $S^*(t)=S(t)+n_0(t)$ – результат сложения двух гармонических колебаний $S(t)$ и $n_0(t)$ с разными амплитудами и начальными фазами (рис. 1).

Если использовать внешний генератор флуктуационного гауссового шума, то можно, применяя частотный фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega$, зная среднюю мощность принятой помехи P_{N0} , получить шум $n_0(t)$, имеющий среднюю мощность P_{N1} равную средней мощности принятой помехи P_{N0} . Тогда, не трудно получить сигнал $S^{**}(t)=S(t)+n_0(t)+n_1(t)$. Но, без ограничения по амплитуде средняя мощность $P_{CP\Sigma}$ шума

© А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов, 2016

$n_{\Sigma}(t) = n_0(t) + n_1(t)$ будет равна $P_{N0} + P_{N1}$ (шумы $n_0(t)$ и $n_1(t)$ не коррелированы), что может привести только к уменьшению соотношения P_S/P_N . Поэтому, введём «плавное» амплитудное ограничение сигнала $S^{**}(t)$ (амплитудная фильтрация) таким образом, чтобы его амплитуда не превышала амплитуды сигнала $S^*(t)$ в те же моменты времени. Тогда, на интервале времени, где амплитуды шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ имеют разные знаки, мощность шума n_{Σ} будет уменьшаться, а амплитуда сигнала $S^{**}(t)$ будет изменяться не по гармоническому закону (рис. 1). После прохождения сигнала $S^{**}(t)$ через частотный фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega$ (частотная фильтрация) соотношение P_S/P_N будет возрастать на этом интервале времени. Также, на этом интервале времени «форма» шума $n_{\Sigma}(t)$ будет существенно отличаться от «формы» шума $n_0(t)$, т.е. шумы $n_{\Sigma}(t)$ и $n_0(t)$ будут существенно декоррелированы.

Введя кроме ограничителя амплитуды по закону сигнала $S^*(t)$ два пороговых устройства разных полярностей, обеспечивающих прохождение через них части сигнала $S^{**}(t)$, превысившего амплитудный порог полупериодов $S^*(t)$ положительной и отрицательной полярности, можно контролировать значение мощности P_{N1} шума $n_1(t)$ на этом интервале времени.

Введя также два пороговых устройства разных полярностей с порогами $S_{*i}^*(t)$, инверсными порогами $S^*(t)$, можно обеспечить прохождение через них части шума $n_1(t)$, превысившего амплитудный порог полупериодов шума $n_1(t)$ положительной и отрицательной полярности, можно определять моменты времени, с превышением шумом $n_1(t)$ порога $S_{*i}^*(t)$, когда знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ не совпадают.

Когда знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ совпадают, то сигнал $S^*(t)$ и шум $n_1(t)$ синфазны, когда амплитуда B_{in1} шума $n_1(t)$ максимальна (амплитуда сигнала $S^*(t)$ больше амплитуды шума $n_1(t)$), и противофазны, когда амплитуда B_{i1} шума $n_1(t)$, превысившего порог $S^*(t)$, равна нулю. Когда знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ не совпадают, то сигнал $S^*(t)$ и шум $n_1(t)$ синфазны, когда часть амплитуды ΔB_{in1} шума $n_1(t)$, превысившая порог $S^*(t)$ максимальна (амплитуда шума $n_1(t)$ больше амплитуды сигнала $S^*(t)$), и противофазны, когда часть амплитуды ΔB_{in1} шума $n_1(t)$, превысившая порог $S_{*i}^*(t)$ максимальна, а амплитуда B_{in1} шума $n_1(t)$, превысившего порог $S^*(t)$, равна нулю.

Таким образом, можно получить шесть каналов для обработки сигнала $S^*(t)$:

- первый канал, обеспечивающий выделение сигнала $S^{**}(t)$ ограниченного амплитудным порогом $S^*(t)$;
- второй канал, обеспечивающий выделение сигнала $S^{**+}(t)$, превысившего амплитудный порог $S^*(t)$ полупериода положительной полярности;

- третий канал, обеспечивающий выделение сигнала $S^{**-}(t)$, превысившего амплитудный порог $S^*(t)$ полупериода отрицательной полярности;
- четвёртый канал, обеспечивающий выделение части шума $n_1(t)$, превысившего амплитудный порог $S_{*i}^*(t)$ полупериода отрицательной полярности;
- пятый канал, обеспечивающий выделение части шума $n_1(t)$, превысившего амплитудный порог $S_{*i}^*(t)$ полупериода положительной полярности;
- канал с выхода частотного фильтра, обеспечивающего формирование шума $n_1(t)$, позволяющего измерять значение мощности P_{N1} .

Когда знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ совпадают (см. рис. 1), при одинаковых амплитудах B_i шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ на малом интервале времени Δt_i ($B_{in0} = B_{in1}$) длительность временных интервалов сигнала $S^{**}(t)$, оставшихся без изменения относительно сигнала $S^*(t)$ от воздействия шума $n_1(t)$ (интервалы $-\delta$) существенно зависит от сдвига фаз $\Delta\phi$ шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$. Амплитуда шума $n_{\Sigma}(t)$ значительно уменьшается при приближении сдвига фаз $\Delta\phi$ шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ к 180° и естественно будет равна нулю при $\Delta\phi = 180^\circ$. Чем меньше амплитуда сигнала $S(t)$, тем меньше временные интервалы сигнала $S^{**}(t)$, оставшиеся без изменения.

Из результата графического сложения шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ (рис. 1) можно увидеть, что для $\Delta\phi > 135^\circ$, если $A(t) \ll B(t)$, то амплитуда B_{Σ} шума $n_{\Sigma}(t)$ на интервале Δt_i будет меньше амплитуды B_{in0} шума $n_0(t)$ и равна:

$$B_{\Sigma} |_{\Delta t_i} \approx 0,7 B_{in0}, \quad (4)$$

а сдвиг фаз $\Delta\phi$ шума $n_{\Sigma}(t)$ относительно шума $n_0(t)$ будет около $22,5^\circ$. Средняя амплитуда шума $n_{\Sigma}(t)$ для рассмотренного сигнала $S^*(t)$ уменьшится почти до нуля.

Выбрав отрезки сигналов $S^{**}(t)$, полученных описанным выше способом (временная фильтрация) для K повторов сигнала $S^*(t)$, для которых амплитуда шума $n_1(t)$ после порогового устройства с порогом $S^*(t)$ мала ($\Delta\phi > 135^\circ$) или равна нулю ($\Delta\phi = 180^\circ$), можно реализовать несколько вариантов фильтрации сигнала $S^*(t)$.

Вариант 1 – фильтрация узкополосного сигнала $S^*(t)$. Сигнал $S^*(t)$ длительностью τ делится на отрезки длительностью Δt_i , на которых среднее значение амплитуды B_i и A_i шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ и их сдвиг фаз с определённой степенью точности можно считать постоянными. Идея уменьшения мощности шумов основана на том, что в i -ом временном отрезке сигнала $S^{**}_1(t)$ в 1-ой реализации, шум $n_{\Sigma}(t)$ отличается от реализации шума $n_{\Sigma}(t)$ i -той реализации сигнала $S^{**}_2(t)$, т.е. эти шумы значительно декоррелированы между собой, а сигнал $S(t)$ во всех реализациях одинаков. Из-за того, что реально амплитуды B_i шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ на малом интервале времени Δt_i в большинстве случаев будут отличаться ($B_{in0} \neq B_{in1}$), а также и B_{in1} будут отличаться от средней

совпадают), амплитуда $B_{in\Sigma} \ll B_{in0}$. Разность $n_1(t) - S^*(t) \approx S'(t)$ (знаки $n_0(t)$ и $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ противоположны).

Если для шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ при сдвиге их фаз $\Delta\phi_{n_0n_1} = 180^\circ$ амплитуд B_{in0} и B_{in1} не равны (в реальном

случае), то возможны изменения не только амплитуды сигнала $A(t)$ сигнала $S(t)$, но и его полярности (см. рис. 3).

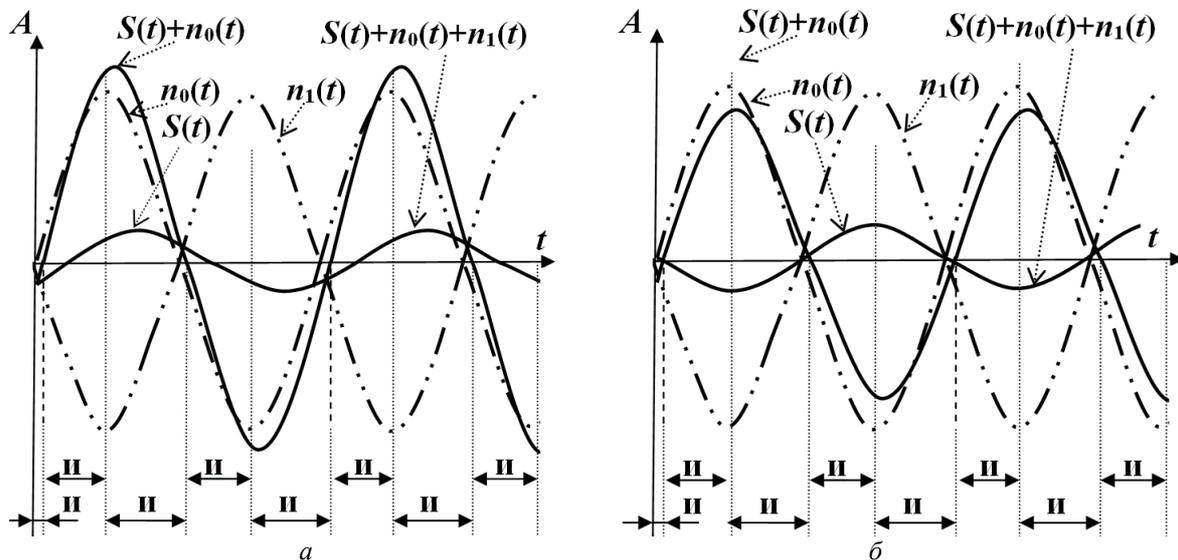


Рис. 2 – Изменения на интервале времени Δt_i переданного сигнала $S(t)$; принятого сигнала $S^*(t)=S(t)+n_0(t)$; помехи канала связи $n_0(t)$; флуктуационного гауссового шума $n_1(t)$, после узкополосной фильтрации; сигнала $S^{**}(t)=S(t)+n_0(t)+n_1(t)$ при сдвиге фаз $\Delta\phi = 180^\circ$ шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ равной амплитуды $B_{in0} = B_{in1}$: а – знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ совпадают; б – знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ противоположны

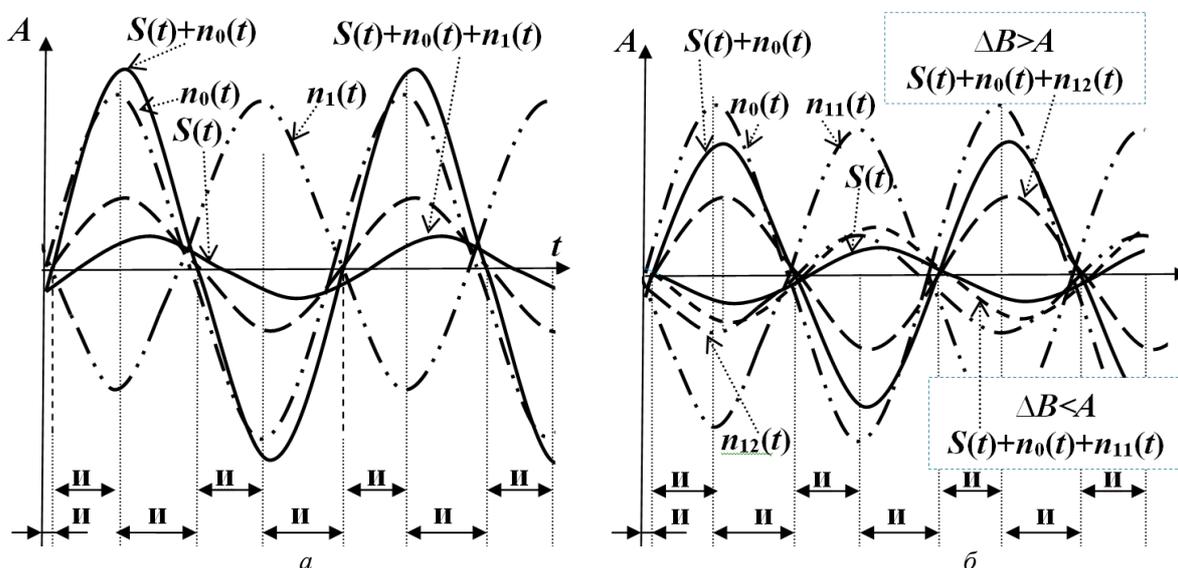


Рис. 3 – Изменения на интервале времени Δt_i переданного сигнала $S(t)$; принятого сигнала $S^*(t)=S(t)+n_0(t)$; помехи канала связи $n_0(t)$; флуктуационного гауссового шума $n_1(t)$, после узкополосной фильтрации; сигнала $S^{**}(t)=S(t)+n_0(t)+n_1(t)$ при сдвиге фаз $\Delta\phi = 180^\circ$ шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ не равной амплитуды $B_{in0} \neq B_{in1}$: а – знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ совпадают; б – знаки шума $n_0(t)$ и сигнала $S(t)$ на большей части полупериода $S(t)$ противоположны

Для получения усреднённой реализации со сдвигом фаз шумов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ и среднего значения амплитуд B_{CPn1} шума $n_1(t)$, можно сложить K

реализаций набора (5), и выполнение условия $\Delta\phi_{n_0n_1} \approx 180^\circ$ будет более реально. Тогда, минимальная мощность шума $P_{CP\Sigma\text{мин}}$ будет:

$$P_{CP\Sigma\text{МИН}} = (\sqrt{P_{N0\text{CP}}} + \sqrt{P_{N0j}})^2. \quad (7)$$

Таким образом, выигрыш в соотношении P_S/P_N определяется отличием амплитуд шума $n_0(t)$ конкретной j -ой реализации от средней амплитуды шума $n_{0CP}(t)=n_{1CP}(t)$ ($n_{1CP}(t)$ – средней амплитуды шума $n_1(t)$). Реально, точно выполнить равенство $n_{0CP}(t)=n_{1CP}(t)$ и обеспечить $\Delta\varphi_{n_{0n1}} = 180^\circ$ весьма затруднительно, поэтому можно указать лишь максимально возможное соотношение P_S/P_N

$$(P_S/P_N)_{\text{МАКС}} = \frac{P_S}{(\sqrt{P_{N0\text{CP}}} + \sqrt{P_{N0j}})^2}. \quad (8)$$

Вариант 2 – фильтрация широкополосного сигнала $S^*(t)$. При широкополосном сигнале $S^*(t)$ необходимо учесть, что здесь не узкополосная фильтрация и флуктуационный гауссов шум $n_0(t)$ после полосовой фильтрации мало изменяет свою начальную форму и представляет последовательность суммы разнополярных импульсов формы близкой к треугольной, отличающихся длительностью и амплитудой [1, 2]. Если мы реализуем тот же подход с шестью каналами для обработки сигнала $S^*(t)$, что и для узкополосной фильтрации, то подбор фазы шума $n_1(t)$, противоположной фазе шума $n_0(t)$ представляется несколько проблематичней из-за неперIODичности и отличия импульсов шума $n_0(t)$ друг от друга [1, 2]. Рассмотрим сложение K реализаций $S^{**}(t)$ (5), но с шумами “негармонической формы”.

Для оценки величины возможного повышения соотношения P_S/P_N , вначале оценим на сколько возросла средняя мощность шума $n_\Sigma(t)=n_0(t)+n_1(t)$ $P_{CP\Sigma}$ после сложения K реализаций $S^{**}(t)$ без введения ограничителей амплитуды. Так как шумы $n_1(t)$ всех K реализаций между собой не коррелированы, то средняя мощность $P_{CP\Sigma}$ шума $n_\Sigma(t)$ возрастёт в M раз:

$$M = (K/2 + \sqrt{K/2})^2 / K^2.$$

При возрастании K значение M уменьшается, например, при $K = 100$ $M \approx 1,2$ раза.

Отметим, что после сложения импульсов $n_0(t)$ и $n_1(t)$ в каждой реализации $S^{**}(t)$ (5), могут появиться импульсы шума $n_\Sigma(t)$, которые шире наиболее широких импульсов $n_0(t)$ или уже наиболее коротких импульсов $n_0(t)$ по длительности в результате взаимодействия импульсов $n_0(t)$ и $n_1(t)$, отличающихся друг от друга на этих интервалах амплитудой, длительностью и полярностью. После прохождения сигнала каждой из реализаций $S^{**}(t)$ через частотный фильтр с полосой пропускания $\Delta\omega$ часть энергии видоизменённых расширенных и суженных импульсов шума $n_\Sigma(t)$ будет уменьшена частотным фильтром и соотношение P_S/P_N для неё будет

возрастать. Также, “форма” шума $n_\Sigma(t)$ будет существенно отличаться от “формы” шума $n_0(t)$, т.е. шумы $n_\Sigma(t)$ и $n_0(t)$ будут существенно декоррелированы.

Весьма ориентировочная оценка уменьшения средней мощности $P_{CP\Sigma}$ шума $n_\Sigma(t)$ может быть получена, если предположить, что в (5) количество интервалов шумов $n_0(t)|_{\text{«бj»}}$ и $n_{\Sigma1}(t)|_{\text{«вj»}}$ в среднем приблизительно одинаково, а амплитуда шума $n_{\Sigma1}(t)$ за счёт ограничений и частотной фильтрации уменьшена относительно $n_0(t)$ вдвое, и все шумы $n_{\Sigma1}(t)$ не коррелированы:

$$1/M = K^2 / (K/2 + \sqrt{K/2})^2.$$

При $K = 10$ соотношение P_S/P_N для данного подхода по фильтрации широкополосного сигнала $S^*(t)$ возрастает в $1/M \approx 1,91$ раз, при $K = 100$ $1/M \approx 3,07$ раза, при $K = 200$ $1/M \approx 3,3$ раза, а при $K = 1000$ $1/M \approx 3,663$ раза.

Т.е. данный подход по фильтрации широкополосного сигнала $S^*(t)$ может позволить повысить соотношение P_S/P_N в несколько раз, а зависимость соотношения P_S/P_N от числа реализаций $S^{**}(t)$ мала. Естественно, несмотря на большие приближения при получении результатов, можно предположить о целесообразности этого подхода для фильтрации, как широкополосных электрических сигналов радиочастоты, так и низкочастотных, например, речевых. Повысить соотношение P_S/P_N можно за счёт подбора для фильтрации только частей реализаций $S^{**}(t)$, в которых превышение амплитудного порога $S^*_и(t)$ полупериода максимально, а превышение амплитудного порога $S^*(t)$ полупериода минимально ($n_0(t)$ и $n_1(t)$ на большей части времени противофазны).

Выводы. 1. Разработанные предложения по фильтрации узкополосного сигнала $S^*(t)$ позволяют восстановить переданный сигнал $S(t)$ с погрешностью равной отличию амплитуд шума $n_0(t)$ конкретной j -ой реализации от средней амплитуды шума $n_{1CP}(t)$, используемого для осуществления с его использованием фильтрации.

2. Подход по фильтрации широкополосного сигнала $S^*(t)$ может позволить повысить соотношение P_S/P_N в несколько раз, но соотношение P_S/P_N может быть ещё увеличено за счёт подбора частей реализаций $S^{**}(t)$, которые получили наибольшие изменения при фильтрации.

3. Рассмотренный метод фильтрации представляется наиболее востребованным в системах с частотной модуляцией, доплеровским сдвигом частоты, а так же при обработке речевых сигналов, но его внедрение сдерживается временными затратами на обработку принятого сигнала $S^*(t)$.

Список литературы

1. Кузьмин И. В. Основы теории информации и кодирования / И. В. Кузьмин, В. А. Кедрус. – К. : Вища шк., 1986. – 238 с.

2. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: Учеб. для вузов по спец. "Радиотехника" / С. И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2005. – 462 с.
2. Baskakov S. I. *Radiotekhnicheskie cepi i signaly: Ucheb. dlja vuzov po spec. "Radiotekhnika"* [Radio Circuits and Signals: Proc. for by special institutions. "Radio engineering"]. – Moscow: High school Publ., 2005, 462 p.

References (transliterated)

1. Kuzmin I. V., Kedrus V. A. *Osnovy teorii informacii i kodirovanija* [Fundamentals of information theory and coding]. – Kiev, High school Publ., 1986, 238 p.

Поступила (received) 05.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Фільтрація електричних сигналів за допомогою шуму / О. В. Брезгунов, С. О. Брезгунов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПИ", 2016. – № 34 (1206). – С. 21–26. – Бібліогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

Фильтрация электрических сигналов с помощью шума / А. В. Брезгунов, С. А. Брезгунов // Вестник НТУ "ХПИ". Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ "ХПИ", 2016. – № 34 (1206). – С. 21–26. – Библиогр.: 2 назв. – ISSN 2078-9998.

Filtering the electrical signals using noise / O. V. Brezgunov, S. O. Brezgunov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 21–26. – Bibliogr.: 2. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Брезгунов Олександр Володимирович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший викладач кафедри радіоелектроніки; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

Брезгунов Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", старший преподаватель кафедры радиоэлектроники; тел.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

Brezgunov Olexandr Vladivirovych – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of radioelectronics; tel.: (066) 097-32-85; e-mail: Brezgunov@inbox.ru.

Брезгунов Сергій Олександрович – спеціаліст, м. Київ, приватний підприємець-інженер; тел.: (066) 659-43-23; e-mail: Bigsun@inbox.ru.

Брезгунов Сергей Александрович – специалист, г. Киев, частный предприниматель-инженер; «тел.: (066) 659-43-23; e-mail: Bigsun@inbox.ru.

Brezgunov Sergey Olexandrovych – specialist, Kiev, entrepreneur-engineer; tel.: (066) 659-43-23; e-mail: Bigsun@inbox.ru.

УДК 533.9.01:550.388.2

С. В. ГРИНЧЕНКО

ОБЩЕЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОЙ ЧАСТИЦЫ В СКРЕЩЁННЫХ МАГНИТНОМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЯХ

Наведено загальне рішення системи диференціальних рівнянь, що описують рух зарядженої частинки в скрещених магнітному та електричному полях при довільному векторі початкової швидкості частки. Дано математичне обґрунтування методу дрейфового наближення для знаходження швидкості електричного дрейфу. Для прямокутної системи координат, що пов'язана з географічними координатами Землі (вісь x спрямована на географічну північ, вісь y – на схід, вісь z – до центру Землі), отримані формули для розрахунку швидкості електричного дрейфу іоносферної плазми.

Ключові слова: іоносфера, рух зарядженої частинки в магнітному і електричному полях, електричний дрейф іоносферної плазми

Приведено общее решение системы дифференциальных уравнений, описывающих движение заряженной частицы в скрещённых магнитном и электрическом полях при произвольном векторе начальной скорости частицы. Дано математическое обоснование метода дрейфового приближения для нахождения скорости электрического дрейфа. Для прямоугольной системы координат, связанной с географическими координатами Земли (ось x направлена на географический север, ось y – на восток, ось z – к центру Земли), получены формулы для расчёта скорости электрического дрейфа ионосферной плазмы.

Ключевые слова: ионосфера, движение заряженной частицы в магнитном и электрическом полях, электрический дрейф ионосферной плазмы.

The general solution of the system of differential equations, describing motion of charged particle in the crossed magnetic and electric fields at the arbitrary initial velocity vector of particle is resulted. The mathematical substantiation of drift approximation method for finding of electric drift velocity is given. For rectangular coordinate system connected with the geographical coordinates of the Earth (x -axis is directed to the geographical north, y -axis – to the east, z -axis – to the center of the Earth), the formulas for calculating of the electric drift velocity of the ionospheric plasma are deduced.

Keywords: ionosphere, motion of charged particle in magnetic and electric the fields, electric drift of ionospheric plasma.

Постановка задачі. Одной из составляющих скорости движения ионосферной плазмы является электрический дрейф плазмы в магнитном поле Земли и электрическом поле, генерируемом в ионосфере в результате различных механизмов. Для описания ионосферной плазмы области F2 применяют одночастичное приближение, при котором движение частиц плазмы описывается уравнениями без учёта воздействия других частиц на рассматриваемую частицу [1-7]. Одним из результатов такого описания движения частиц плазмы является вывод о наличии дрейфового движения в электрическом и магнитном полях, называемого электрическим дрейфом. В литературе из-за громоздкости вычислений обычно рассматривают частные случаи движения заряженных частиц.

Целью статьи является получение решения уравнений, описывающего движение заряженной частицы в общем случае – в скрещённых магнитном и электрическом полях при произвольном векторе начальной скорости частицы, а также вывод формулы электрического дрейфа ионосферной плазмы с учётом особенностей электрического и магнитного полей в области F2 ионосферы.

Общий вид уравнения движения заряженной частицы в электрическом и магнитном полях. На частицу с зарядом q , находящуюся в электрическом поле с напряжённостью \vec{E} , действует сила Кулона $\vec{F}_K = q\vec{E}$. Также на заряженную частицу, движущуюся со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует сила Лоренца $\vec{F}_L = q(\vec{v} \times \vec{B})$. Второй закон Ньютона представляет собой общий вид уравнения движения частицы в электрическом и магнитном полях: $m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$.

Векторы $\vec{v} = v_x \vec{e}_x + v_y \vec{e}_y + v_z \vec{e}_z$, $\vec{E} = E_x \vec{e}_x + E_y \vec{e}_y + E_z \vec{e}_z$, $\vec{B} = B_x \vec{e}_x + B_y \vec{e}_y + B_z \vec{e}_z$, где \vec{e}_x , \vec{e}_y , \vec{e}_z – орты осей прямоугольной системы.

Векторное произведение

$$\vec{v} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = \vec{e}_x (v_y B_z - v_z B_y) + \vec{e}_y (v_z B_x - v_x B_z) + \vec{e}_z (v_x B_y - v_y B_x).$$

Векторное уравнение $m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$ можно записать в виде системы трёх скалярных уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = qE_x + q(v_y B_z - v_z B_y); \\ m \frac{dv_y}{dt} = qE_y + q(v_z B_x - v_x B_z); \\ m \frac{dv_z}{dt} = qE_z + q(v_x B_y - v_y B_x). \end{cases}$$

Уравнение траектории движения заряженной частицы в скрещённых постоянных электрическом и магнитном полях в случае произвольного взаимного расположения полей. Ось Oz направим вдоль вектора магнитной индукции \vec{B} . Вектор напряжённости электрического поля разложим на две составляющие: вектор \vec{E}_\perp , лежащий в плоскости xOy , и вектор \vec{E}_\parallel , направленный вдоль Oz (рис. 1).

Без потери общности решения задачи Oy можно направить вдоль вектора \vec{E}_\perp (рис. 2). В этом случае проекция вектора \vec{E} на ось Ox оказывается равной нулю ($E_x = 0$).

© С. В. Гринченко, 2016

Так как вектор \vec{B} направлен вдоль оси Oz : $\vec{B} = B \cdot \vec{e}_z$ ($B_z = B = const \neq 0, B_x = 0, B_y = 0$), а вектор \vec{E} лежит в плоскости yOz : $\vec{E} = E_y \cdot \vec{e}_y + E_z \cdot \vec{e}_z = E_{\perp} \cdot \vec{e}_y + E_{\parallel} \cdot \vec{e}_z$ ($E_x = 0$), то система скалярных уравнений, описывающих движение частицы, принимает вид:

$$\begin{cases} m \frac{dv_x}{dt} = qv_y B; \\ m \frac{dv_y}{dt} = qE_{\perp} - qv_x B; \\ m \frac{dv_z}{dt} = qE_{\parallel}. \end{cases}$$

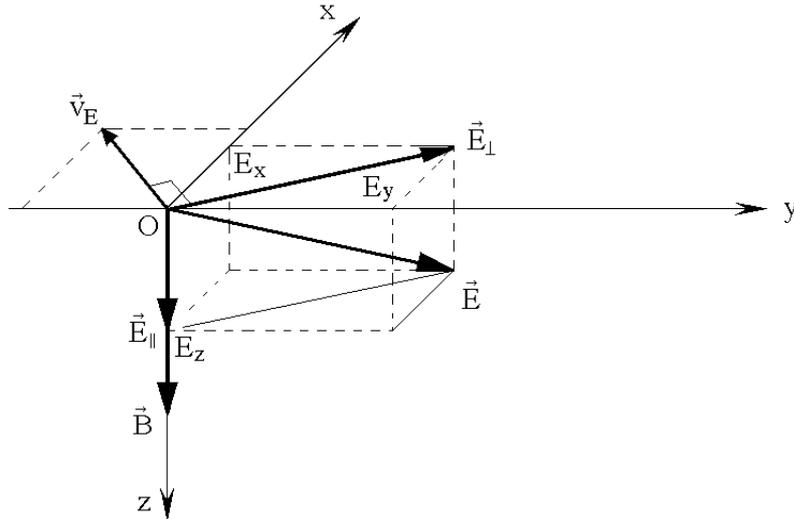


Рис. 1 – Общий случай расположения вектора \vec{E} электрического поля в пространстве xOz

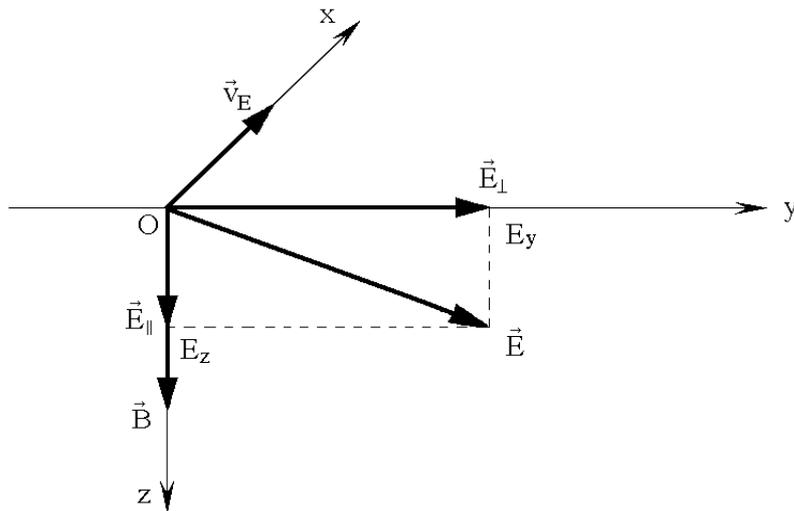


Рис. 2 – Расположение вектора \vec{E} в плоскости yOz

Найдём общее решение полученной системы, удовлетворяющее начальным условиям: $v_x(0) = v_{x0}, v_y(0) = v_{y0}, v_z(0) = v_{z0}, x(0) = 0, y(0) = 0, z(0) = 0$.

Так как $\frac{dv_z}{dt} = \frac{q}{m} E_{\parallel}$, то $v_z(t) = \frac{q}{m} E_{\parallel} t + v_{z0}$, $z(t) = \frac{q}{2m} E_{\parallel} t^2 + v_{z0} t$. Вдоль оси Oz заряженная частица совершает равноускоренное (или равнозамедленное) движение.

Анализируя первые два уравнения системы, получим уравнение движения в плоскости xOy . Из первого уравнения: $v_y = \frac{m}{qB} \cdot \frac{dv_x}{dt}$. Подставим это выражение во второе уравнение:

$$\frac{m^2}{qB} \frac{d^2 v_x}{dt^2} = qE_{\perp} - qv_x B.$$

Обозначим $\frac{q^2 B^2}{m^2} = \omega_0^2$. Будем для определённости считать $q > 0$. Тогда $\omega_0 = \frac{qB}{m}$.

Уравнение принимает вид: $\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega_0^2 v_x = \omega_0^2 \frac{E_{\perp}}{B}$.

Найдём общее решение v_x полученного неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами: $v_x(t) = v_{xобщ}(t) + v_{xчаст}(t)$. Здесь $v_{xобщ}(t)$ – общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения $\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega_0^2 v_x = 0$; $v_{xчаст}(t)$ – любое частное решение исходного неоднородного дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega_0^2 v_x = \omega_0^2 \frac{E_{\perp}}{B}.$$

Найдём $v_{xобщ}(t)$. Характеристическое уравнение однородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами записывается следующим образом: $k^2 + \omega_0^2 = 0$. Его корни $k_{1,2} = \pm i\omega_0$. Общее решение $v_{xобщ}(t) = A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t$.

Правая часть неоднородного дифференциального уравнения – константа. Поэтому частное решение $v_{xчаст}(t)$ будем искать в виде константы: $v_{xчаст}(t) = C_1$. Подставляя $v_{xчаст}(t) = C_1$ в исходное неоднородное дифференциальное уравнение $\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega_0^2 v_x = \omega_0^2 \frac{E_{\perp}}{B}$ получаем: $0 + \omega_0^2 C_1 = \omega_0^2 \frac{E_{\perp}}{B}$, $C_1 = \frac{E_{\perp}}{B}$. Частное решение $v_{xчаст}(t) = \frac{E_{\perp}}{B}$.

Таким образом, общее решение неоднородного дифференциального уравнения:

$$v_x(t) = v_{xобщ}(t) + v_{xчаст}(t) = A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t + \frac{E_{\perp}}{B}.$$

$$\begin{aligned} \text{Скорость } v_y &= \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{dv_x}{dt} = \\ &= \frac{1}{\omega_0} \cdot \frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{\omega_0} (-A_1 \omega_0 \sin \omega_0 t + B_1 \omega_0 \cos \omega_0 t) = \\ &= -A_1 \sin \omega_0 t + B_1 \cos \omega_0 t \end{aligned}$$

Итак,

$$\begin{cases} v_x = A_1 \cos \omega_0 t + B_1 \sin \omega_0 t + \frac{E_{\perp}}{B}; \\ v_y = -A_1 \sin \omega_0 t + B_1 \cos \omega_0 t. \end{cases}$$

В координатах x, y модуль скорости $|\vec{v}|$ не является постоянной величиной. Но изменение модуля скорости имеет периодический характер. Период вариации значения модуля скорости равен

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi m}{qB}.$$

Учтём начальные условия $v_x(0) = v_{x0}$, $v_y(0) = v_{y0}$.

Тогда $v_x(0) = A_1 + \frac{E_{\perp}}{B} = v_{x0}$, $A_1 = v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B}$, $v_y(0) = B_1 = v_{y0}$.

Компоненты вектора скорости

$$\begin{cases} v_x = \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \cos \omega_0 t + v_{y0} \sin \omega_0 t + \frac{E_{\perp}}{B}; \\ v_y = -\left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t + v_{y0} \cos \omega_0 t. \end{cases}$$

Координаты

$$\begin{cases} x = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t - \frac{v_{y0}}{\omega_0} \cos \omega_0 t + \\ + \frac{E_{\perp}}{B} t + C_1; \\ y = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \cos \omega_0 t + \frac{v_{y0}}{\omega_0} \sin \omega_0 t + \\ + D_1. \end{cases}$$

Учтём значения координат положения частицы в начальный момент времени: $x(0) = 0$, $y(0) = 0$:

$$x(0) = -\frac{v_{y0}}{\omega_0} + C_1 = 0,$$

$$y(0) = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) + D_1 = 0.$$

Коэффициенты

$$C_1 = \frac{v_{y0}}{\omega_0}, D_1 = -\frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right).$$

Координаты

$$\begin{cases} x = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t - \frac{v_{y0}}{\omega_0} \cos \omega_0 t + \\ + \frac{E_{\perp}}{B} t + \frac{v_{y0}}{\omega_0}; \\ y = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \cos \omega_0 t + \frac{v_{y0}}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \\ - \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right). \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t - \frac{v_{y0}}{\omega_0} (\cos \omega_0 t - 1) + \\ + \frac{E_{\perp}}{B} t; \\ y = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) (\cos \omega_0 t - 1) + \frac{v_{y0}}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \end{cases}$$

Обозначим $\begin{cases} x(t) = x_0(t) + x_E(t); \\ y(t) = y_0(t), \end{cases}$

где $x_E(t) = \frac{E_{\perp}}{B} t$.

В координатах x_0, y_0 траектория $x_0(t), y_0(t)$ описывается уравнениями:

$$\begin{cases} x_0(t) = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t - \\ - \frac{v_{y0}}{\omega_0} (\cos \omega_0 t - 1); \\ y_0(t) = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) (\cos \omega_0 t - 1) + \\ + \frac{v_{y0}}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \end{cases}$$

Компоненты вектора скорости \vec{u} заряженной частицы в координатах x_0, y_0 :

$$\begin{cases} u_{x_0}(t) = \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \cos \omega_0 t + v_{y0} \sin \omega_0 t; \\ u_{y_0}(t) = - \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \sin \omega_0 t + v_{y0} \cos \omega_0 t. \end{cases}$$

Модуль скорости заряженной частицы в координатах x_0, y_0 является постоянной величиной:

$$\begin{aligned} |\vec{u}(t)| &= \sqrt{u_{x_0}^2(t) + u_{y_0}^2(t)} = \\ &= \sqrt{\left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right)^2 + v_{y0}^2}. \end{aligned}$$

Полученная траектория движения в плоскости $x_0 y_0$ – окружность (рис. 3). Величина $\omega_0 = \frac{qB}{m}$ является круговой частотой вращения заряженной частицы. Период вращения $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi m}{qB}$.

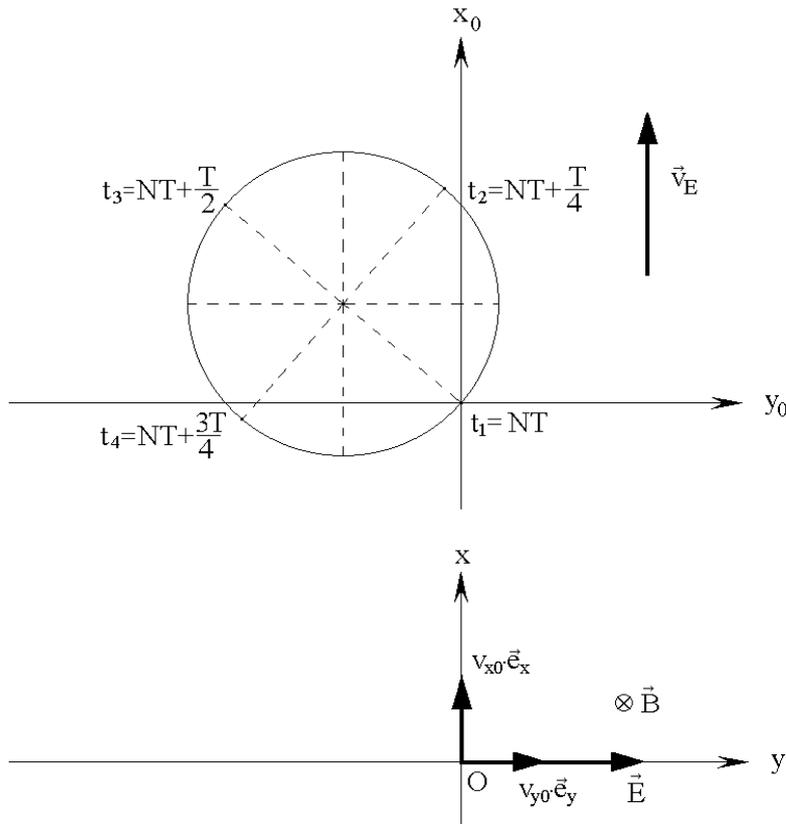


Рис. 3 – Движение заряженной частицы в скрещённых постоянных магнитном и электрическом полях

В момент $t_1 = NT : x_{01} = 0, y_{01} = 0$.

В момент $t_2 = NT + \frac{T}{4} = NT + \frac{\pi}{2\omega_0} :$

$$x_{02} = \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) + \frac{v_{y0}}{\omega_0},$$

$$y_{02} = -\frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) + \frac{v_{y0}}{\omega_0}.$$

$$\text{В момент } t_3 = NT + \frac{T}{2} = NT + \frac{\pi}{\omega_0}:$$

$$x_{03} = \frac{2v_{y0}}{\omega_0}, y_{03} = -\frac{2}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right).$$

$$\text{В момент } t_4 = NT + \frac{3T}{4} = NT + \frac{3\pi}{2\omega_0}:$$

$$x_{04} = -\frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) + \frac{v_{y0}}{\omega_0},$$

$$y_{04} = -\frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) - \frac{v_{y0}}{\omega_0}.$$

Координаты x'_0, y'_0 центра окружности:

$$x'_0 = \frac{1}{2}(x_{01} + x_{03}) = \frac{1}{2} \left(0 + \frac{2v_{y0}}{\omega_0} \right) = \frac{v_{y0}}{\omega_0},$$

$$y'_0 = \frac{1}{2}(y_{01} + y_{03}) = \frac{1}{2} \left(0 - \frac{2}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \right) = -\frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right).$$

Радиус окружности можно вычислить по формуле: $R_0 = \sqrt{(x_{0i} - x'_0)^2 + (y_{0i} - y'_0)^2}$ ($i = 1, 2, 3, 4$). При $i = 1$ получаем:

$$\begin{aligned} R_0 &= \sqrt{(x_{01} - x'_0)^2 + (y_{01} - y'_0)^2} = \\ &= \sqrt{\left(0 - \frac{v_{y0}}{\omega_0} \right)^2 + \left(0 + \frac{1}{\omega_0} \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right) \right)^2} = \\ &= \frac{1}{\omega_0} \sqrt{v_{y0}^2 + \left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right)^2}. \end{aligned}$$

Радиус окружности (называемой ларморовской окружностью) $R_0 = \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\left(v_{x0} - \frac{E_{\perp}}{B} \right)^2 + v_{y0}^2}$.

Таким образом, заряженная частица движется в плоскости, перпендикулярной магнитной индукции \vec{B} , по окружности вокруг линий магнитного поля; причём эта окружность движется вдоль оси Oх со скоростью $v_E = \frac{E_{\perp}}{B}$.

Шаг спиральной траектории $h = v_{\parallel} T = v_{\parallel} \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi v_{\parallel}}{\omega_0} = \frac{2\pi m v_{\parallel}}{qB}$. Сама спиральная траектория дрейфует в направлении, перпендикулярном векторам \vec{B} и \vec{E} . Круговую частоту ω_0 называют циклотронной частотой, а радиус окружности R – циклотронным радиусом (или ларморовским радиусом).

Скорость дрейфа $v_E = \frac{E_{\perp}}{B} = \frac{E_{\perp} \cdot B}{B^2}$. Скорость

дрейфа перпендикулярна векторам \vec{E}_{\perp} и \vec{B} . Так как векторы $\vec{v}_E, \vec{E}_{\perp}$ и \vec{B} образуют правую тройку, то вектор скорости электрического дрейфа можно записать в виде векторного произведения:

$$\vec{v}_E = \frac{\vec{E}_{\perp} \times \vec{B}}{B^2}.$$

Так как $\vec{E} = \vec{E}_{\perp} + \vec{E}_{\parallel}$, где вектор \vec{E}_{\parallel} параллелен вектору \vec{B} , то $\vec{v}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$.

Замагниченность ионосферной плазмы. В ионосферной плазме частица движется по рассмотренной выше траектории до столкновения с другой частицей. Если частица за время столкновения τ успевает совершить достаточно много оборотов по

циклотронной орбите, то $T = \frac{2\pi}{\omega_0} \ll \tau$, т.е.

$\omega_0 \tau \gg 2\pi$. В этом случае движение частицы зависит от параметров магнитного поля, а плазму называют замагниченной. Понятно, что условие $\omega_0 \tau \gg 2\pi$ эквивалентно $\omega_0 \tau \gg 1$, которое фигурирует обычно в литературе по физике плазмы в качестве критерия замагниченности. Величину $H = \omega_0 \tau$ называют параметром Холла. Говорят, что электроны (ионы) замагничены, если $H_e = \omega_{0e} \tau_e \gg 1$ ($H_i = \omega_{0i} \tau_i \gg 1$). Замагниченность является необходимым условием существования дрейфовых движений.

Приведенные выше выкладки справедливы не только для постоянных, но и слабо изменяющихся полей. Для их применимости необходимо, чтобы поля слабо изменялись в пространствах порядка R_0 , а во

времени – в масштабах порядка $\frac{1}{\omega_0}$.

Метод дрейфового приближения. Движение и дрейф заряженной частицы. В одночастичном приближении плазму рассматривают как систему независимых заряженных частиц, движущихся по своим траекториям в заданных внешних полях. Общий вид уравнения движения частицы: $m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$. Это векторное уравнение, несмотря на кажущуюся его простоту, при изменяющихся магнитном и электрическом полях в общем виде не поддается аналитическому решению. Поэтому важнейшее значение в физике плазмы имеет приближенный метод решения уравнения, носящий название метода дрейфового приближения.

В развёрнутом виде приведенное векторное уравнение представляет собой систему трёх линейных дифференциальных уравнений относительно неизвестных переменных v_x, v_y, v_z . Общее решение $v_x(t), v_y(t), v_z(t)$ состоит из общего решения соответствующего однородного уравнения и частного

решения исходного уравнения. В случае постоянных магнитного и электрического полей частное решение, представляющееся в виде постоянной величины, определяет скорость электрического дрейфа заряженной частицы. Поэтому скорость электрического дрейфа определяется уравнением: $0 = q\vec{E} + q(\vec{v} \times \vec{B})$, т.е. $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$.

Получим из этого векторного уравнения скорость \vec{v}_E электрического дрейфа методом дрейфового приближения, учитывая, что вектор электрического дрейфа \vec{v}_E перпендикулярен вектору магнитного поля \vec{B} . Векторно умножим обе части уравнения $\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} = 0$ справа на \vec{B} : $\vec{E} \times \vec{B} + (\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B} = 0$.

Произведение $(\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B} =$

$$= \vec{B}(\vec{v} \cdot \vec{B}) - \vec{v}(\vec{B} \cdot \vec{B}) = \vec{B}(\vec{v} \cdot \vec{B}) - \vec{v}B^2.$$

Тогда $\vec{E} \times \vec{B} + \vec{B}(\vec{v} \cdot \vec{B}) - \vec{v}B^2 = 0$. Так как $\vec{v} \perp \vec{B}$, то $\vec{v} \cdot \vec{B} = 0$. Уравнение электрического дрейфа

принимает вид: $\vec{E} \times \vec{B} - \vec{v}B^2 = 0$. Отсюда $\vec{v}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$.

Движение заряженной частицы в постоянных электрическом и магнитном полях можно разложить на три составляющие: 1) циклотронное вращение вокруг силовых линий магнитного поля; 2) дрейфовое движение центра циклотронной окружности поперек магнитного поля; 3) движение вдоль силовой линии, на которое магнитное поле не действует.

Электрический дрейф заряженных частиц ионосферной плазмы области F2. При теоретическом расчёте высотных профилей ионосферных параметров области F2 магнитное поле и электрическое поле можно считать однородными. Поэтому применительно к рассматриваемому пространству ионосферной плазмы применимы полученные выше законы физики плазмы.

В прямоугольной системе координат x, y, z , связанной с Землёй (ось x направлена на географический север, ось y – на восток, ось z – перпендикулярна плоскости xOy в направлении к центру Земли) вектор напряжённости электрического поля в ионосфере $\vec{E} = (E_x, E_y, 0)$, а индукция магнитного поля Земли $\vec{B} = (B_x, B_y, B_z) = B \cdot (\cos I \cdot \cos D, \cos I \cdot \sin D, \sin I)$. Углы I, D – наклонение и склонение магнитного поля Земли.

Тогда вектор скорости электрического дрейфа (т.е. дрейфа ларморовской траектории заряженных частиц в магнитном и электрическом полях) равен:

$$\begin{aligned} \vec{v}_E &= \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} = \\ &= \frac{1}{B} \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ E_x & E_y & 0 \\ \cos I \cdot \cos D & \cos I \cdot \sin D & \sin I \end{vmatrix} = \\ &= \frac{\vec{e}_x}{B} E_y \sin I - \frac{\vec{e}_y}{B} E_x \sin I + \end{aligned}$$

$$+ \frac{\vec{e}_z}{B} (E_x \cos I \cdot \sin D - E_y \cos I \cdot \cos D).$$

Проекция вектора \vec{v}_E на ось Oz , направленную к центру Земли, равна:

$$\begin{aligned} (\vec{v}_E)_z &= \frac{E_x}{B} \cos I \cdot \sin D - \frac{E_y}{B} \cos I \cdot \cos D = \\ &= \frac{1}{B} (E_x \cos I \cdot \sin D - E_y \cos I \cdot \cos D). \end{aligned}$$

Тогда радиальная проекция (ось \vec{r} направлена от центра Земли)

$$\begin{aligned} (\vec{v}_E)_r &= -(\vec{v}_E)_z = \\ &= \frac{1}{B} (-E_x \cos I \sin D + E_y \cos I \cos D). \end{aligned}$$

Выводы. Дано математическое обоснование метода дрейфового приближения для нахождения скорости электрического дрейфа. Приведенное общее решение системы неоднородных дифференциальных уравнений движения заряженной частицы в постоянных электрическом и магнитном полях показывает, что скорость электрического дрейфа является частным решением этой системы. Также получена формула для вычисления радиальной проекции вектора скорости электрического дрейфа ионосферной плазмы на высотах F2-области.

Список литературы

1. *Balescu R. Transport Processes in Plasmas. 1. Classical transport theory / R. Balescu. – Amstredam: Elsevier Science Publishers B.V., 1988. – 336 p.*
2. *Sturrock P. A. Plasma Physics. An introduction to the theory of astrophysical, geophysical, and laboratory plasmas / P. A. Sturrock. – New York: Cambridge University Press, 1994. – 335 p.*
3. *Goldston R. J. Introduction to Plasma Physics / R. J. Goldston, P. H. Rutherford. – London: Institute of Physics Publishing, 1995. – 486 p.*
4. *Baumjohann W. Basic Space Plasma Physics / W. Baumjohann, R. A. Treumann. – London: Imperial College Press, 1997. – 329 p.*
5. *Diver D. A. A Plasma Formulary for Physics, Technology and Astrophysics / D. A. Diver. – Berlin: Wiley WCH, 2001. – 204 p.*
6. *Boyd T. J. M. The Physics of Plasmas / T. J. M. Boyd, J. J. Sanderson. – New York: Cambridge University Press, 2003. – 532 p.*
7. *Chen F. F. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing / F. F. Chen, J. P. Chang. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2003. – 248 p.*

References (transliterated)

1. *Balescu R. Transport Processes in Plasmas. 1. Classical transport theory. Amstredam: Elsevier Science Publishers B.V., 1988, 336 p.*
2. *Sturrock P. A. Plasma Physics. An introduction to the theory of astrophysical, geophysical, and laboratory plasmas. New York: Cambridge University Press, 1994, 335 p.*
3. *Goldston R. J., Rutherford P. H. Introduction to Plasma Physics. London: Institute of Physics Publishing, 1995, 486 p.*
4. *Baumjohann W., Treumann R. A. Basic Space Plasma Physics. London: Imperial College Press, 1997, 329 p.*
5. *Diver D. A. A Plasma Formulary for Physics, Technology and Astrophysics. Berlin: Wiley WCH, 2001, 204 p.*
6. *Boyd T. J. M., Sanderson J. J. The Physics of Plasmas. New York: Cambridge University Press, 2003, 532 p.*
7. *Chen F. F., Chang J. P. Lecture Notes on Principles of Plasma Processing. New York: Kluwer Academic Publishers, 2003, 248 p.*

Поступила (received) 01.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Загальне рішення рівняння руху зарядженої частинки в схрещених магнітному та електричному полях / С. В. Грінченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 27–33. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Общее решение уравнения движения заряженной частицы в скрещённых магнитном и электрическом полях / С. В. Гринченко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 27–33. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

General solution of motion equation of a charged particle in crossed magnetic and electric fields / S. V. Grinchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 27–33. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Грінченко Сергій Володимирович – Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків, науковий співробітник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Гринченко Сергей Владимирович – Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков, научный сотрудник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Grinchenko Sergii Volodymyrovych – Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv, researcher; tel.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

УДК 004.432

С. В. ГРИНЧЕНКО

НАСТРОЙКА ВВОДА-ВЫВОДА РУССКОГО ТЕКСТА В КОНСОЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЯХ VISUAL C++ 2010

Зроблено зіставлення символів кодівих таблиць cp1251 і cp866, що дозволяє аналізувати помилки некоректного введення-виведення символів рядків. Наведено способи русифікації введення та виведення в консольних додатках Visual C++ в середовищі програмування Microsoft Visual Studio 2010 із використанням: 1) функції `setlocale`; 2) функцій перекодування `CharToOemA` та `OemToCharA`; 3) функцій `SetConsoleCP` та `SetConsoleOutputCP`; 4) функцій `wcout.imbue()` та `wcin.imbue()` в програмах введення та виведення широкосимвольних літералів. Виклад матеріалу супроводжується прикладами вихідних кодів.

Ключові слова: Visual C++, консольний додаток, кодова сторінка.

Произведено сопоставление символов кодировочных таблиц cp1251 и cp866, позволяющее анализировать ошибки некорректного ввода-вывода символов строк. Приведены способы русификации ввода-вывода в консольных приложениях Visual C++ в среде программирования Microsoft Visual Studio 2010 с использованием: 1) функции `setlocale`; 2) функций перекодировки `CharToOemA` и `OemToCharA`; 3) функций `SetConsoleCP` и `SetConsoleOutputCP`; 4) функций `wcout.imbue()` и `wcin.imbue()` в программах ввода-вывода широкосимвольных литералов. Изложение материала сопровождается примерами исходных кодов.

Ключевые слова: Visual C++, консольное приложение, кодовая страница.

Comparison of characters by cp1251 and cp866 code pages for the purpose to analyze the errors of incorrect input/output of them is made. There are presented the different methods of input/output Russian localization in Visual C++ console applications in environment Microsoft Visual Studio 2010 with the use: 1) function `setlocale`; 2) conversion functions `CharToOemA` and `OemToCharA`; 3) functions `SetConsoleCP` and `SetConsoleOutputCP`; 4) functions `wcout.imbue()` and `wcin.imbue()` for input/output of wide character strings. The paper is accompanied by the examples of source codes.

Keywords: Visual C++, console application, code page.

Постановка проблеми. Хотя количество книг на русском языке, связанных с тематикой C++, исчисляется тысячами наименований, число источников, где в какой-то мере освещалось решение национальных особенностей C++ (в частности, ввода-вывода русского текста), очень ограничено. Методы решения этих проблем не стандартизированы, поэтому решение одной и той же задачи в различных компиляторах требует разного подхода.

Целью статьи является анализ и классификация средств русификации текста консольных приложений Visual C++ 2010.

Необходимость русификации также обусловлена тем, что на языках C, C++ написаны многие модели нейтральной атмосферы, магнитного поля Земли, ионосферных электрических полей, использующиеся в теоретических расчётах ионосферных параметров. Этими программами пользуются научные работники бывших стран СНГ, где русскоязычная часть является значительной.

Общие сведения о кодировках символов.

Соответствие между символами и кодирующими их байтами называется кодировкой символов. Понятно, что, во-первых, что каждая кодировка разрабатывается для конкретного национального языка (точнее, для конкретной письменности), и, во-вторых, что для любого языка таких кодировок можно придумать сколько угодно.

Кодировка ASCII – однобайтная кодировка, используемая для представления в компьютере текстовых данных. Семи- или восьмибитная таблица ASCII позволяет закодировать 128 или 256 разных знаков. Стандартная кодировка ASCII (ASCII-7) использует 7 битов для представления всех прописных и строчных букв, чисел от 0 до 9, знаков препинания и специальных управляющих символов,

применяемых в английской раскладке для США. Расширенная кодировка ASCII (ASCII-8) использует восьмой бит каждого кода для представления 128 дополнительных специальных символов, букв различных алфавитов и графических знаков.

Стандартная кодировка ASCII – это семибитная кодовая таблица (коды символов $00-7F_{16}$ или $0-127_{10}$). В ней байты с шестнадцатеричными кодами $00-1F_{16}$ ($0-31_{10}$) и $7F_{16}$ (127_{10}) используются для кодирования управляющих (неотображаемых) символов, а остальные кодируют различные другие символы.

128 символов с кодами от $128_{10} = 10000000_2 = 80_{16}$ до $255_{10} = 11111111_2 = FF_{16}$ – альтернативная часть таблицы ASCII. Альтернативная часть таблицы расширенной кодировки ASCII называется кодовой страницей (128 кодов, начиная с $128_{10} = 10000000_2$ и кончая $255_{10} = 11111111_2$). Кодовая страница может иметь различные варианты, каждый вариант имеет свой номер.

Кодовые страницы в первую очередь используются для размещения национальных алфавитов, отличных от латинского. В русских национальных кодировках в этой части таблицы размещаются символы русского алфавита.

Среди наиболее распространённых кодировок Microsoft Windows можно назвать следующие: Windows-1250 (ASCII-7 и cp1250) – для языков Центральной Европы, которые используют латинское написание букв (польский, чешский, словацкий, венгерский, словенский, хорватский, румынский и албанский); Windows-1251 (ASCII-7 и cp1251) – для кириллических алфавитов; Windows-1252 (ASCII-7 и cp1252) – для западноевропейских языков;

© С. В. Гринченко, 2016

Windows-1253 (ASCII-7 и cp1253) – для греческого языка; Windows-1254 (ASCII-7 и cp1254) – для турецкого языка; Windows-1255 (ASCII-7 и cp1255) – для иврита.

Стандартные кодировки русских версий Microsoft Windows и её консоли. Кодировка Windows-1251, состоящая из стандартной кодировки ASCII-7 и альтернативной части – кодовой страницы cp1251, является стандартной (т.е. используемой по умолчанию) кодировкой для всех русских версий Microsoft Windows. Однако в консоли русифицированных систем семейства Windows используется кодовая страница cp866. В таблице 1 приведено сравнение символов кодовых таблиц cp1251 и cp866.

Таблица 1 – Символы кодовых таблиц cp1251 и cp866

10-тичное значение байта	16-ричное значение байта	Символ cp866	Символ cp1251
128	80	А	Ъ
129	81	Б	Ѓ
130	82	В	҃
131	83	Г	ђ
132	84	Д	“
133	85	Е	…
134	86	Ж	†
135	87	З	‡
136	88	И	€
137	89	Й	‰
138	8a	К	Љ
139	8b	Л	<
140	8c	М	Њ
141	8d	Н	Ќ
142	8e	О	Ѡ
143	8f	П	Ѣ
144	90	Р	ђ
145	91	С	҃
146	92	Т	҃
147	93	У	“
148	94	Ф	”
149	95	Х	•
150	96	Ц	–
151	97	Ч	–
152	98	Ш	б
153	99	Щ	™
154	9a	Ъ	љ
155	9b	Ы	>
156	9c	Ь	њ
157	9d	Э	ќ
158	9e	Ю	ѡ
159	9f	Я	ѣ

Продолжение таблицы 1

160	a0	а	NBSP
161	a1	б	Ў
162	a2	в	ў
163	a3	г	Ј
164	a4	д	Ѡ
165	a5	е	Ґ
166	a6	ж	ı
167	a7	з	§
168	a8	и	Ё
169	a9	й	©
170	aa	к	Є
171	ab	л	«
172	ac	м	¬
173	ad	н	–
174	ae	о	®
175	af	п	İ
176	b0	▒	°
177	b1	▒	±
178	b2	▒	І
179	b3		і
180	b4	┆	г
181	b5	┆	μ
182	b6	┆	ϕ
183	b7	π	•
184	b8	т	ё
185	b9	ђ	№
186	ba		e
187	bb	π	»
188	bc	┆	j
189	bd	┆	S
190	be	┆	s
191	bf	т	і
192	c0	т	А
193	c1	┆	Б
194	c2	т	В
195	c3	┆	Г
196	c4	–	Д
197	c5	┆	Е
198	c6	┆	Ж
199	c7	┆	З
200	c8	┆	И
201	c9	ђ	Й
202	ca	┆	К
203	cb	т	Л
204	cc	┆	М
205	cd	=	Н
206	ce	┆	О
207	cf	┆	П

Завершение таблицы 1

208	d0	Щ	Р
209	d1	Т	С
210	d2	т	Т
211	d3	ц	У
212	d4	Ц	Ф
213	d5	Ѡ	Х
214	d6	Г	Ц
215	d7	г	Ч
216	d8	ѡ	Ш
217	d9	Ј	Щ
218	da	Г	Ъ
219	db	■	Ы
220	dc	■	Ь
221	dd	І	Э
222	de	і	Ю
223	df	■	Я
224	e0	р	а
225	e1	с	б
226	e2	т	в
227	e3	у	г
228	e4	ф	д
229	e5	х	е
230	e6	ц	ж
231	e7	ч	з
232	e8	ш	и
233	e9	щ	й
234	ea	ъ	к
235	eb	ы	л
236	ec	ь	м
237	ed	э	н
238	ee	ю	о
239	ef	я	п
240	f0	ё	р
241	f1	ё	с
242	f2	Є	т
243	f3	е	у
244	f4	İ	ф
245	f5	ı	х
246	f6	Ÿ	ц
247	f7	ÿ	ч
248	f8	°	ш
249	f9	·	щ
250	fa	·	ъ
251	fb	√	ы
252	fc	№	ь
253	fd	¤	э
254	fe	■	ю
255	ff		я

Ошибки вывода русского текста без использования средств русификации. При попытке вывода русского текста в C++ без использования специальных средств русификации происходят ошибки вывода. Демонстрацией возникающих проблем вывода являются следующий пример программы:

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;
int main()
{
string name;
cout<<"Input your English name: ";
cin>>name;
cout<<"Hello, "<<name<<"!"<<endl;
cout<<"Введите ваше русское имя: ";
cin>>name;
cout<<"Привет, "<<name<<"!"<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
Input your English name: John
Hello, John!
ТтхфШЄх тр°х Ёёёёьюх шь : Женя
=ЁштхЄ, Женя!
```

Значения строк "Введите ваше имя: " и "Привет, " закодированы в Windows-1251 (ASCII-7 & cp1251). Вывод этих строк осуществился с помощью кодовой страницы cp866. Поэтому из-за несоответствия кодировок (т.е. некорректной интерпретации кодов символов в их графические представления) вывод строк оказался некорректным.

Так, вместо Привет появилась абракадабра =ЁштхЄ. Символ П кодовой страницы cp1251 соответствует символ = кодовой страницы cp866: П₁₂₅₁ → =₈₆₆. Аналогично, р₁₂₅₁ → Ё₈₆₆, и₁₂₅₁ → ш₈₆₆, в₁₂₅₁ → т₈₆₆, е₁₂₅₁ → х₈₆₆, т₁₂₅₁ → є₈₆₆.

Для корректного вывода упомянутых строк необходимо было задать кодировку строки Windows-1251.

Использование функции setlocale для задания русской локальности. Для управления представлением и обработкой данных используется заголовочный файл clocale. Информацию, описывающую представление и правила обработки данных для определённого географического региона, называют локальным контекстом (или локальностью). Процесс преобразования данных в локальное представление называют локализацией.

Таким образом, локальный контекст представляет собой набор параметров и функций, обеспечивающих поддержку национальных или культурных стандартов. В зависимости от локального контекста выбираются разные форматы вещественных чисел, дат, денежных сумм и т.п.

Обычно локальный контекст определяется строкой в формате: язык_зона.код. Здесь язык – обозначение языка (например, английский или немецкий), а зона – страна, географический регион или культура, в которой используется этот язык. В частности, квалификатор зона позволяет поддерживать национальные стандарты даже в том случае, если на одном языке говорят в разных странах. Квалификатор код определяет кодировку символов.

В табл. 2 приведены примеры типичных определений локальных контекстов [1, 2].

Следующий пример показывает пример использования локальности для указания использования требуемой таблицы кодировки при выводе текста. Для установки локальности используется функция `setlocale` [1, 2, 3, 4].

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <locale>
//необязательная строка в MVS
using namespace std;
int main()
{
setlocale(LC_CTYPE, "rus");
cout<<"АВВаБв"<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

АВВаБв

Возможны несколько вариантов вызова `setlocale`, например:

```
setlocale(LC_CTYPE, "rus");
setlocale(LC_CTYPE, "Rus");
setlocale(LC_CTYPE, "russian");
setlocale(LC_CTYPE, "Russian");
setlocale(LC_CTYPE, ".1251");
```

Во всех случаях происходит настройка функций обработки символов на кодовую страницу 1251.

Таблица 2 – Примеры определений локальных контекстов

язык_зона	Описание
de_De	немецкий язык (Германия)
de_AT	немецкий язык (Австрия)
de_CH	немецкий язык (Швейцария)
en_US	английский язык (США)
en_GB	английский язык (Великобритания)
en_AU	английский язык (Австралия)
en_CA	английский язык (Канада)
fr_FR	французский язык (Франция)
fr_CA	французский язык (Канада)

Приведём ещё несколько примеров использования функции `setlocale`. В нижеследующем примере вместо параметра `LC_CTYPE` поставлен `LC_ALL`.

Код программы:

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main()
```

```
{
setlocale(LC_ALL, "rus");
cout<<"АВВаБв"<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

АВВаБв

В следующей программе используется библиотека функций `cstring` стандартной библиотеки C++, наследующей библиотеку `string.h` из стандартной библиотеки C.

Код программы:

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main()
{
setlocale(LC_CTYPE, "Russian");
char str[]="Текст русскими буквами";
cout<<str<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

Текст русскими буквами

В случае переопределения значения строки библиотеки `cstring` можно воспользоваться указателем.

Код программы:

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main()
{
char *str;
setlocale(LC_CTYPE, "");
str="Текст русскими буквами";
cout<<str<<endl;
str="АВВаБв";
cout<<str<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

Текст русскими буквами

АВВаБв

В случае переопределения значения строки, обозначенной одним и тем же идентификатором, можно строку описать типом `string`.

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;
int main()
{
string str;
setlocale(LC_CTYPE, "");
str="Текст русскими буквами";
cout<<str<<endl;
str="АВВаБв";
cout<<str<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

Текст русскими буквами

АВВабв

Средства языка C++ для работы с локальными контекстами объявлены в заголовке `locale`. Настройку программы на конкретный локальный контекст выполняет функция, прототип которой имеет вид: `char *setlocale(int category, const char *locale);`.

Аргумент `category` определяет раздел локальности, содержащий информацию, связанную по смыслу или назначению. Другими словами, аргумент `category` определяет категорию функций, на которые установка локальности с помощью функции `setlocale` оказывает влияние. Разделы локальности нумеруются. Номер раздела локальности называется локальной категорией.

В заголовочном файле `locale` (ранее `locale.h`) определены макросы локальных категорий (табл. 3), имена которых используются в качестве аргументов функции `setlocale` [1, 2].

Аргумент `locale` является указателем на строку, задающую имя локального контекста.

Если `locale` указывает на пустую строку, то используется локальный контекст с кодовой таблицей, получаемой из операционной системы. Локальность "" обозначает местную локальность (native locale).

Локальность "C" используется по умолчанию.

При указании аргумента `NULL` действующий локальный контекст не изменяется. Если в параметре `locale` установить значение `NULL`, то функция вернёт указатель на строку, описывающую локальную категорию, заданную параметром `category` для текущей локальности.

В конкретной реализации могут быть также определены и другие локальности.

Перед передачей управления программе среда исполнения устанавливает локальность "C".

Таблица 3 – Макросы локальных категорий

Имя макроса локальной категории	Описание макроса
<code>LC_ALL</code>	действие на все локальные категории
<code>LC_COLLATE</code>	локальная категория, связанная с работой функций сравнения и преобразования строк
<code>LC_CTYPE</code>	локальная категория, связанная с работой функций классификации и обработки символов
<code>LC_MONETARY</code>	форматирование денежных значений
<code>LC_NUMERIC</code>	форматированием чисел с плавающей точкой
<code>LC_TIME</code>	форматирование времени

В случае успешного завершения функция возвращает указатель на строку, описывающую установленную локальность, а в случае неудачи – `NULL`.

Пример организации ввода и вывода русского текста в MVS с использованием функции `setlocale`. Следующая программа иллюстрирует организацию ввода и вывода русского текста в MVS с использованием функции `setlocale`.

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;
int main()
{
    string name;
    cout<<"Input your English name: ";
    cin>>name;
    cout<<"Hello, "<<name<<"!"<<endl;
    setlocale(LC_STYPE,"rus");
    cout<<"Введите ваше русское имя: ";
    cin>>name;
    cout<<"Привет, ";
    setlocale(LC_STYPE,"C");
    cout<<name<<"!"<<endl;
    return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
Input your English name: John
Hello, John!
Введите ваше русское имя: Женя
Привет, Женя!
```

Текст программы, в том числе и строки с кириллицей "Введите ваше русское имя: " и "Привет, "; набраны с кодовой страницей `cp1251`. Для правильного вывода этих строк в консоли задаётся кодировка строк `ASCII-7 & cp1251`. Переменная `name` вводится с кодировкой `ASCII-7 & cp866`. Поэтому для её вывода нужно возвратиться к кодовой странице `cp866`.

Вывод текста с использованием функций перекодировок `CharToOemA` и `OemToCharA`.

Функция `CharToOemA` позволяет перевести строки из ANSI-кодировки (`ASCII-7 & cp1251`) в OEM-кодировку (`ASCII-7 & cp866`). Функция `OemToCharA` выполняет обратную перекодировку. Обе функции имеют по два параметра типа `char`. Первый параметр является входным и содержит исходную строку. Второй является выходным и содержит перекодированный вариант исходной строки. При использовании функций `CharToOemA` и `OemToCharA` необходимо подключать библиотеку `Windows.h`.

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <Windows.h>
using namespace std;
int main()
{
    char str[]="АВВабв";
    cout<<str<<endl;
    CharToOemA(str,str);
    cout<<str<<endl;
    return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
ЦТрст
АВВабв
```

Текст программы, в том числе и строка с кириллицей "АВВабв" набран с кодовой страницей cp1251. Для правильного вывода строки с кириллицей она перекодируется в символы с кодовой страницей cp866.

Использование функции перекодировки можно осуществить с применением указателей.

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <Windows.h>
using namespace std;
int main()
{
char *str;
str="АВВабв";
cout<<str<<endl;
char *str1=new char[10];
CharToOemA(str,str1);
cout<<str1<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
ЦТрст
АВВабв
```

Организации ввода и вывода русского текста с помощью функций консоли. Функция `SetConsoleOutputCP()` устанавливает кодовую страницу вывода данных, используемую консолью. Синтаксис функции `SetConsoleOutputCP`: `bool SetConsoleOutput(uint кодовая страница);`. Параметр кодовая страница – идентификатор кодовой страницы, которая будет установлена. Функция `SetConsoleCP()` устанавливает кодовую страницу ввода, используемую консолью. Синтаксис функции `SetConsoleCP`: `bool SetConsoleCP(uint кодовая страница);`. Здесь кодовая страница – идентификатор кодовой страницы, которая будет установлена.

Заголовочные файлы функций включены в библиотеку `Windows.h`.

Указанные функции работают только при установленном в окне командной строки шрифте `Lucida Console` (либо каким-либо другим `TrueType` моноширинным (непропорциональным) шрифтом). Поэтому следует предварительно изменить текущий шрифт окна командной строки.

Чтобы выяснить текущую кодовую страницу ввода консоли, используют функцию `GetConsoleCP`. Для получения кодовой страницы вывода данных консоли используют функцию `GetConsoleOutputCP`. Упомянутые функции относятся к группе так называемых функций консоли. Список функций консоли намного шире перечисленных четырёх функций.

Примером программы, работающей с использованием функций `SetConsoleOutputCP` и `SetConsoleOutputCP` в `Visual Studio` с

компилятором `Visual C++2010` являются следующая программа:

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <string>
#include <Windows.h>
using namespace std;
int main()
{
string name;
cout<<"Input your English name: ";
cin >> name;
cout<<"Hello, ";
cout<<name<<"!"<<endl;
SetConsoleOutputCP(1251);
cout<<"Введите ваше русское имя: ";
SetConsoleCP(1251);
cin >> name;
cout<<"Привет, ";
cout<<name<<"!"<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
Input your English name: John
Hello, John!
Введите ваше русское имя: Женя
Привет, Женя!
```

Примеры использования функций `wcout.imbue()` и `wcin.imbue()` в программах ввода-вывода русского текста. Следующая программа является примером ввода-вывода широкосимвольных литералов [5, 6], содержащих текст, как латиницей, так и кириллицей.

Код программы:

```
#include <iostream>
#include <sstream>
using namespace std;
int main()
{
wstring name;
wcout<<L"Input your English name: ";
wcin>>name;
wcout<<L"Hello, "<<name<<L"!"<<endl;
wcout.imbue(locale("rus_rus.866"));
wcout<<L"Введите ваше русское имя: ";
wcin.imbue(locale("rus_rus.866"));
wcin>>name;
wcout<<L"Привет, "<<name<<L"!"<<endl;
return 0;
}
```

Выполнение программы:

```
Input your English name: John
Hello, John!
Введите ваше русское имя: Женя
Привет, Женя!
```

Текст программы, в том числе и строки с кириллицей "Введите ваше имя: " и "Привет, "; набраны с кодовой страницей cp1251. Для перекодировки «короткого» значения строк в cp866 с целью корректного вывода русского текста используется оператор

```
wcout.imbue(locale("rus_rus.866"));
```

Для отмены его используется оператор

```
wcin.imbue(locale("rus_rus.866"));
```

После этого значение переменной name вводится с кодировкой cp866 и выводится с этой кодировкой.

Выводы. Приведены различные средства настройки ввода-вывода русского текста в консольных приложениях Visual C++ 2010 в среде MVS 2010:

- с использованием функции `setlocale`;

- с использованием функций перекодировок `CharToOemA` и `OemToCharA`;

- с помощью функций `SetConsoleCP` и `SetConsoleOutputCP`;

- с помощью функций `wcout.imbue()` и `wcin.imbue()` в программах ввода-вывода широкосимвольных литералов.

Использование функции `CharToOemA` представляется наименее удобным, так как эту функцию следует вызывать при каждом выводе строки с русскими буквами.

Список литературы

1. Josuttis N. M. C++ Standard Library: A Tutorial and Reference / N. M. Josuttis. Reading: Addison Wesley Longman, Inc., 1999. – 640 p.

2. Josuttis N. M. C++ Standard Library: A Tutorial and Reference. Second Edition / N. M. Josuttis. Ann Arbor: Edwards Brothers Malloy, 2012. – 1161 p.
3. Schildt H. C++: Complete Reference. Third Edition / H. Schildt. Berkeley, New York, St. Louis, etc.: McGraw-Hill, 1998. – 1008 p.
4. Stroustrup B. The C++ Programming Language. Fourth Edition / B. Stroustrup. Ann Arbor: Edwards Brothers Malloy, 2013 – 1346 p.
5. Solter N. A. Professional C++ / N. A. Solter, S. J. Kleper. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2005. – 838 p.
6. Gregoire M. Professional C++. Second Edition / M. Gregoire, N. A. Solter, S. J. Kleper. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 1072 p.

Bibliography (transliterated):

1. Josuttis N. M. C++ Standard Library: A Tutorial and Reference. Reading: Addison Wesley Longman, Inc., 1999, 640 p.
2. Josuttis N. M. C++ Standard Library: A Tutorial and Reference. Second Edition. Ann Arbor: Edwards Brothers Malloy, 2012, 1161 p.
3. Schildt H. C++: Complete Reference. Third Edition. Berkeley, New York, St. Louis, etc.: McGraw-Hill, 1998, 1008 p.
4. Stroustrup B. The C++ Programming Language. Fourth Edition. Ann Arbor: Edwards Brothers Malloy, 2013, 1346 p.
5. Solter N. A., Kleper S. J. Professional C++. Indianapolis: Wiley Publishing, Inc., 2005, 838 p.
6. Gregoire M., Solter N. A., Kleper S. J. Professional C++. Second Edition. Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2011, 1072 p.

Поступила (received) 05.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Налаштування введення та виведення російського тексту в консольних додатках Visual C++ 2010 / С. В. Грінченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 34–40. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Настройка ввода-вывода русского текста в консольных приложениях Visual C++ 2010 / С. В. Гринченко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радиофизика и ионосфера. – Х. : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 34–40. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Input and output adjustment of Russian text in Visual C++ 2010 console applications / S. V. Grinchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 34–40. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

Грінченко Сергій Володимирович – Інститут іоносфери НАН та МОН України, м. Харків, науковий співробітник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Гринченко Сергей Владимирович – Інститут іоносфери НАН і МОН України, г. Харків, научний співробітник; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Grinchenko Sergii Volodymyrovych – Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv, researcher; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

УДК 550.388.2

С. В. ГРИНЧЕНКО, Д. А. ДЗЮБАНОВ

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПЛАЗМЫ, ИНДУЦИРОВАННОГО ВЕТРОМ НЕЙТРАЛЬНОЙ СРЕДЫ

Подается глобальный розподіл нахилення та схилення магнітного поля Землі в північній півкулі. Виводяться формули для обчислення швидкості руху плазми, що індукуються вітровим рухом нейтрального середовища, для випадків урахування або за відсутності урахування величини схилення магнітного поля Землі.

Ключові слова: магнітне поле Землі, модель IGRF, швидкість руху іоносферної плазми.

Представлено глобальное распределение углов наклона и склонения магнитного поля Земли в северном полушарии. Выводятся формулы для вычисления скорости движения плазмы, индуцированного ветровым движением нейтральной среды, для случаев учёта или неучёта величины угла склонения магнитного поля Земли.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, модель IGRF, скорость движения ионосферной плазмы.

Global distribution of Earth's magnetic field inclination and declination in the northern hemisphere is presented. Formulas for calculating the plasma velocity, induced by wind motion of neutral environment, in cases of taking into account, or no taking into consideration the declination of the Earth's magnetic field are deduced.

Keywords: Earth's magnetic field, IGRF model, ionospheric plasma velocity.

Постановка задачі. Движение ионизированной составляющей верхней атмосферы играет существенную роль в формировании высотного распределения ионосферной плазмы. Поэтому актуальным является исследование влияния структуры магнитного поля Земли на точность вычисления скорости движения плазмы, индуцированного нейтральными ветрами.

Элементы магнитного поля Земли. В северном полушарии находится южный магнитный полюс и, соответственно, в южном полушарии – северный магнитный полюс. Южный магнитный полюс часто называют «условно северным» полюсом, и, соответственно, северный магнитный полюс – «условно южным» полюсом.

Для разложения вектора напряжённости \vec{H} можно использовать различные системы координат. Географические координаты (широту и долготу) обычно обозначают буквами φ , λ . Прямоугольную систему координат (x, y, z) обычно ориентируют следующим образом. Ось x ориентируют вдоль географического меридиана по направлению к северному полюсу. Ось y ориентируют по географической параллели, направляя к востоку. Чтобы орты прямоугольной системы координат составляли правую тройку, ось z направляют сверху вниз [1, 2, 3].

Вдоль географического меридиана отсчитывается географическая широта φ ($-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$). Проекция H_x вектора напряжённости \vec{H} на ось x совпадает с проекцией H_φ на ось широты: $H_x = H_\varphi$. Вдоль географической параллели отсчитывается географическая долгота λ ($0 \leq \lambda < 2\pi$). Проекция H_y вектора напряжённости \vec{H} на ось y совпадает с проекцией H_λ на ось долготы: $H_y = H_\lambda$.

Если Землю считать шаром, то ось z будет направлена к центру планеты. Если рассматривать ось r как расстояние от центра Земли, то на поверхности

Земли $r = R_3$, где R_3 – радиус Земли. Понятно, что в центре земного шара $r = 0$.

Проекция $H_x = H_\varphi$ носит название северной составляющей, проекция $H_y = H_\lambda$ – восточной составляющей и проекция $H_z = -H_r$ – вертикальной составляющей. Перечисленные проекции вектора напряжённости магнитного поля Земли обозначаются через X, Y, Z соответственно. Вектор $\vec{H}_{hor} = (X, Y, 0)$ (составляющая вектора \vec{H} в горизонтальной плоскости) называют вектором горизонтальной составляющей.

Вертикальная плоскость, в которой лежит вектор \vec{H}_{hor} , называется плоскостью местного магнитного меридиана, а угол между географическим и магнитным меридианами – магнитным склонением, которое обозначается через D . Угол I между горизонтальной плоскостью и направлением вектора \vec{H} носит название магнитного наклона.

Положительным склонением D называют восточное, т. е. когда вектор \vec{H}_{hor} отклонен от севера к востоку, а отрицательным – западное. Таким образом, если вектор горизонтальной составляющей \vec{H}_{hor} находится «слева» от направления на географический север, то склонение $D < 0$, и, если вектор \vec{H}_{hor} находится «справа» от направления на географический север, то склонение $D > 0$. Понятия «слева», «справа» нетрудно математически формализовать. Если направления вектора \vec{H}_{hor} , оси x и оси r образуют правую тройку векторов, то говорят, что вектор \vec{H}_{hor} находится справа от географического севера (и в этом случае $D > 0$). Если перечисленные направления образуют левую тройку векторов, то говорят, что вектор \vec{H}_{hor} находится слева от географического севера (и в этом случае $D < 0$).

© С. В. Гринченко, Д. А. Дзюбанов, 2016

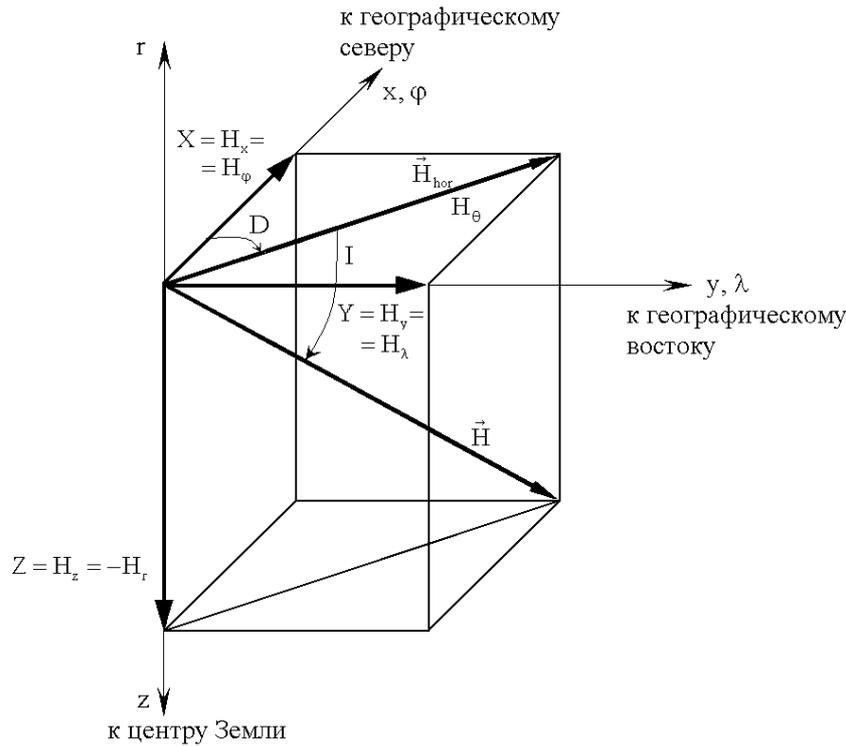


Рис. 1 – Элементы магнитного поля

Наклонение I положительно, когда вектор \vec{H} направлен вниз от горизонтали, что имеет место в северном полушарии, и отрицательно, когда \vec{H} направлен вверх, т. е. в южном полушарии. Иными словами, если вектор \vec{H} имеет уклон к Земле, то наклонение $I > 0$, в противном случае – наклонение $I < 0$.

Склонение D , наклонение I , горизонтальная составляющая \vec{H}_{hor} , вертикальная проекция $Z = H_z = -H_r$, северная $X = H_x = H_\phi$ и восточная $Y = H_y = H_\lambda$ носят название элементов земного магнетизма.

Существующие модели магнитного поля обычно дают на выходе компоненты X, Y, Z . Углы D и I , изменяющиеся в пределах $-\frac{\pi}{2} \leq D \leq \frac{\pi}{2}$, $-\frac{\pi}{2} \leq I \leq \frac{\pi}{2}$, удобно вычислять по формулам:

$$\operatorname{tg} D = \frac{H_y}{H_z}, \quad D = \operatorname{arctg} \frac{H_y}{H_z};$$

$$\sin I = \frac{H_z}{H}, \quad I = \operatorname{arcsin} \frac{H_z}{H}.$$

Элементы магнитного поля являются координатами вектора \vec{H} в различных системах координат. Так, например, $X = H_x$, $Y = H_y$, $Z = H_z$ – не что иное, как координаты конца вектора \vec{H} в

прямоугольной системе координат; H_{hor} , D , и Z – координаты в цилиндрической системе и H_{hor} , D и I – координаты в сферической системе. В каждой из этих трёх систем координаты независимы друг от друга. Для перехода от одной системы координат к другой и определения величины вектора \vec{H} справедливы, как можно видеть из рис. 1, следующие соотношения:

$$H_x = H_\phi = H_{hor} \cdot \cos D = H \cdot \cos I \cdot \cos D,$$

$$H_y = H_\lambda = H_{hor} \cdot \sin D = H \cdot \cos I \cdot \sin D,$$

$$H_z = -H_r = H \cdot \sin I, \quad H_{hor}^2 = H_x^2 + H_y^2 = H_\phi^2 + H_\lambda^2,$$

$$H_{hor} = H \cdot \cos I,$$

$$\vec{H} = (H_x, H_y, H_z) = H_{hor} \cdot (\cos D, \sin D, \operatorname{tg} I) =$$

$$= H \cos I \cdot (\cos D, \sin D, \operatorname{tg} I) =$$

$$= H \cdot (\cos I \cdot \cos D, \cos I \cdot \sin D, \sin I).$$

При малом угле склонения D (см. рис. 2) перечисленные формулы принимают вид:

$$H_x = H_\phi = H_{hor} = H \cdot \cos I,$$

$$H_y = H_\lambda = H_{hor} = 0,$$

$$H_z = -H_r = H \cdot \sin I,$$

$$H_{hor} = H \cdot \cos I,$$

$$\vec{H} = (H_x, 0, H_z) = H_{hor} \cdot (1, 0, \operatorname{tg} I) =$$

$$= H \cos I \cdot (1, \sin D, \operatorname{tg} I) = H \cdot (\cos I, 0, \sin I).$$

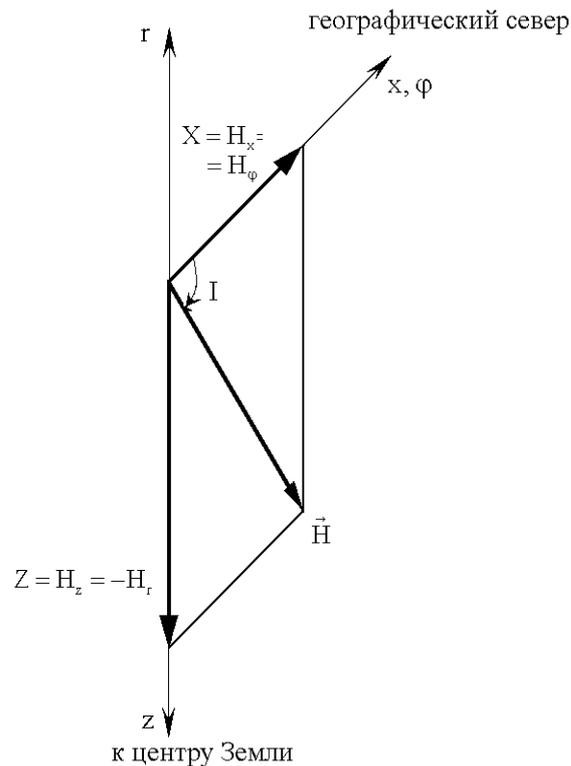


Рис. 2 – Элементы магнитного поля при малом угле склонения

Смещения магнитных полюсов. Магнитные полюса Земли не являются неподвижными. Примерно с начала XVII века южный магнитный полюс располагался под паковыми льдами в границах нынешней канадской Арктики. В настоящее время он движется мимо северного географического полюса в направлении к североазиатскому побережью Северного Ледовитого океана. Такое смещение южного магнитного полюса может вызвать целый ряд физических последствий в атмосфере и ионосфере Земли [3].

Противоположностью южного магнитного полюса, находящегося в северном полушарии, является северный магнитный полюс, который расположен в южном полушарии в районе Антарктиды.

Вариации геомагнитного поля. Ни один из элементов земного магнетизма не остаётся постоянным во времени, а непрерывно меняет свою величину от часа к часу и от года к году. Такие изменения получили название вариаций элементов земного магнетизма. Вариации в течение короткого промежутка времени (порядка суток) имеют периодический характер, однако периоды, амплитуды и фазы их чрезвычайно разнообразны. Среднегодовые значения также меняются, но характер изменения уже монотонный, и их периодичность выявляется лишь при очень большой длительности наблюдений (порядка многих десятков и сотен лет). Медленные вариации элементов земного магнетизма получили название вековых. Вековые вариации элементов

связаны с источниками, лежащими внутри земного шара, и вызываются теми же причинами, что и магнитное поле Земли. Быстротечные вариации периодического характера, весьма различные по амплитуде, имеют своим источником электрические токи в высоких слоях атмосферы [4].

Геомагнитное поле принято разделять на три основные части: 1) главное магнитное поле и его вековые вариации, имеющие внутренний источник в ядре Земли; 2) аномальное магнитное поле, обусловленное совокупностью источников в тонком верхнем слое, называемом магнитоактивной оболочкой Земли; 3) внешнее магнитное поле, связанное с внешними источниками – токовыми системами в околоземном пространстве.

Поле внешнего происхождения называют переменным электромагнитным полем Земли, поскольку оно является не только магнитным, но и электрическим. Главное и аномальное поля часто объединяют общим условным термином – постоянным геомагнитным полем.

Дипольная модель магнитного поля Земли. Магнитное поле Земли в дипольном приближении описывается полем некоторого геоцентрического диполя с определённым наклоном оси по отношению к оси вращения Земли. Так как полюса диполя обычно не находятся в диаметрально противоположных точках земного шара, центр диполя смещен от центра Земли на некоторое расстояние.

Ось диполя пересекает поверхность Земли в точках, называемых северным полюсом диполя и

южным полюсом диполя. Дипольные полюса принято называть геомагнитными полюсами.

Из-за несовпадения центра диполя и центра Земли вектор напряжённости магнитного поля, вычисляемый по дипольной модели в геомагнитных полюсах, не является перпендикулярным к поверхности Земли.

Таким образом, полюса диполя (геомагнитные полюса) не совпадают с истинными магнитными полюсами Земли (т.е. магнитными полюсами реального магнитного поля Земли), а дипольная ось не совпадает с осью вращения Земли.

Плоскость, проходящая через центр диполя перпендикулярно оси магнитных полюсов, называется дипольной экваториальной плоскостью. Пересечение дипольной экваториальной плоскости с земной поверхностью образует дипольный экватор. Магнитная широта в дипольной модели магнитного поля отсчитывается от дипольного экватора.

Полуокружности, соединяющие магнитные полюса, образуют магнитные меридианы диполя. Один из них принимается за нулевую магнитную долготу.

Введённые определения дипольного экватора (магнитного экватора) и магнитных меридианов диполя позволяют ввести геомагнитные координаты – геомагнитную широту и геомагнитную долготу.

Если географические координаты принято обозначать буквами φ, λ , то для геомагнитных координаты устоявшихся обозначений нет, поэтому геомагнитную широту будем обозначать символом θ , а геомагнитную долготу – μ .

В дипольной модели магнитного поля вектора магнитного поля находятся в плоскости соответствующего магнитного меридиана. В общем случае «недипольной» модели вектора магнитного поля лежат в плоскостях местных магнитных меридианов.

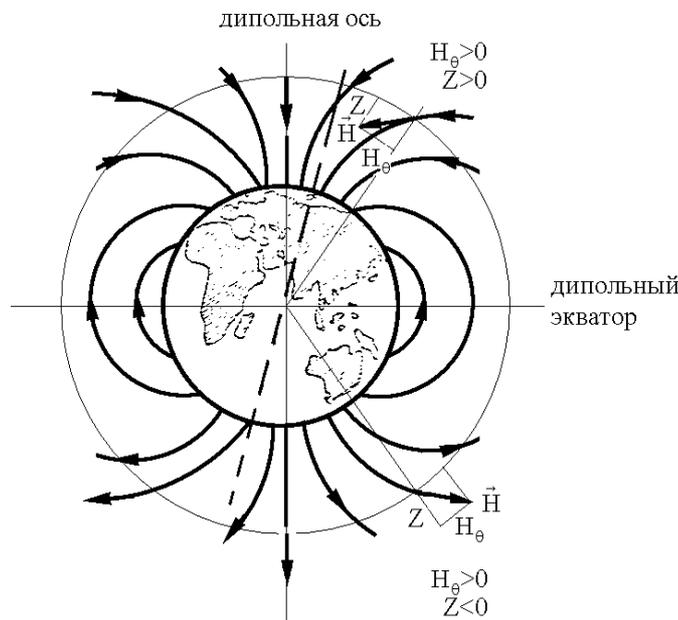


Рис. 3 – Дипольное приближение магнитного поля Земли

Магнитный потенциал φ_m диполя с магнитным моментом \vec{p}_m в точке, определяемой радиус-вектором \vec{r} , равен [5, 6]:

$$\varphi_m = \frac{(\vec{p}_m \cdot \vec{r})}{r^3} = -\frac{M \cdot \sin \theta}{r^2}.$$

Напряжённость магнитного поля $\vec{H} = \text{grad } \varphi_m$.

Радиальная составляющая вектора

$$\text{напряжённости } H_r = -\frac{\partial \varphi_m}{\partial r} = -\frac{2p_m \sin \theta}{r^3}.$$

Тангенциальная составляющая

$$H_\theta = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \varphi_m}{\partial \theta} = \frac{p_m \cos \theta}{r^3}.$$

Полная напряжённость магнитного поля

$$H = |\vec{H}| = \sqrt{H_r^2 + H_\theta^2} = \frac{p_m}{r^3} \sqrt{4 \sin^2 \theta + \cos^2 \theta} =$$

$$= \frac{p_m}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta}.$$

При любой магнитной широте из интервала

$(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ тангенциальная составляющая $H_\theta > 0$. На

магнитных полюсах ($\theta = \pm \frac{\pi}{2}$) тангенциальная

составляющая $H_\theta = 0$.

В «условно северном» магнитном полушарии радиальная составляющая $H_r < 0$

($Z = H_z = -H_r > 0$). В «условно южном» магнитном

полушарии радиальная составляющая $H_r > 0$ ($Z < 0$). Только на магнитном экваторе $H_r = 0$ (см. рис. 3).

На «условно северном» магнитном полюсе: $\theta = \frac{\pi}{2}$, $H_r = -\frac{2P_m}{r^3} < 0$, $H_\theta = 0$.

На «условно южном» магнитном полюсе: $\theta = -\frac{\pi}{2}$, $H_r = \frac{2P_m}{r^3} > 0$, $H_\theta = 0$.

На магнитном экваторе: $\theta = 0$, $H_r = 0$, $H_\theta = \frac{P_m}{r^3} > 0$.

Таким образом, согласно дипольной модели магнитного поля, напряжённость магнитного поля на магнитных полюсах превышает напряжённость магнитного поля на экваторе в 2 раза.

Обозначим через H_0 экваториальную величину напряжённости ($r = R_3$): $H_0 = \frac{P_m}{R_3^3}$.

Тогда радиальная составляющая

$$H_r = -\frac{2H_0 R_3^3 \sin \theta}{r^3} = -2H_0 \left(\frac{R_3}{r}\right)^3 \sin \theta,$$

тангенциальная составляющая

$$H_\theta = \frac{H_0 R_3^3 \cos \theta}{r^3} = H_0 \left(\frac{R_3}{r}\right)^3 \cos \theta,$$

полная напряжённость

$$H = \frac{H_0 R_3^3}{r^3} \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta} = H_0 \left(\frac{R_3}{r}\right)^3 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \theta}.$$

Таким образом, согласно дипольной модели, напряжённость магнитного поля Земли с увеличением радиуса-вектора убывает по закону $\frac{1}{r^3}$.

В дипольной модели $\operatorname{tg} I = \frac{H_z}{H_{hor}} = \frac{-H_r}{H_\theta} = \frac{2 \sin \theta}{\cos \theta} = 2 \operatorname{tg} \theta$. Вычислим наклонение

магнитного поля по дипольной модели при изменении θ от $-\frac{\pi}{2}$ до $\frac{\pi}{2}$ с шагом $\frac{\pi}{4}$:

$$\theta = -\frac{\pi}{2}: \operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \theta = -\infty, I = -\frac{\pi}{2};$$

$$\theta = -\frac{\pi}{4}: \operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \theta = -2, I \approx -0.3524 \cdot \pi;$$

$$\theta = 0: \operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \theta = 0, I = 0;$$

$$\theta = \frac{\pi}{4}: \operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \theta = 2, I \approx 0.3524 \cdot \pi;$$

$$\theta = \frac{\pi}{2}: \operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \theta = +\infty, I = \frac{\pi}{2}.$$

Глобальные распределения наклонения и склонения основного магнитного поля у поверхности Земли. Понятно, что векторы основного

магнитного поля Земли вовсе не направлены всегда строго к магнитному полюсу. А в точках магнитного экватора наклонение основного магнитного поля значения наклонения отличаются от нулевых. Этот факт отражён во всех современных эмпирических моделях основного магнитного поля Земли [7, 8].

Модель International Geomagnetic Reference Field (IGRF) предназначена для эмпирического представления магнитного поля Земли и рекомендована к использованию специальной рабочей группой International Association of Geomagnetism and Aeronomy (IAGA). Модель IGRF представляет основное магнитное поле (сумму главного и аномального магнитных полей), генерируемое самим земным шаром, т.е. без учёта внешнего магнитного поля. Модель IGRF вычисляет также ежегодные вариации основного магнитного поля. Коэффициенты IGRF базируются на всевозможных источниках, включая геомагнитные измерения, проведённые обсерваториями, ракетами, летательными аппаратами и спутниками.

На рисунках 4, 5 представлены результаты расчётов глобального распределения углов наклонения и склонения по модели IGRF. Отдельными точками отмечены северный географический полюс, южный магнитный полюс и местоположение Харьковского радара некогерентного рассеяния.

На рисунке 4 кривой белого цвета отмечена изолиния наклонения, соответствующая его нулевому значению.

На рисунке 5 кривыми белого цвета отмечены изолинии склонения, соответствующие нулевому значению.

Линии равного склонения (изолинии склонения) называют изогонами, линии равного наклонения (изолинии наклонения) – изоклинами, линии равных величин магнитного поля (изолинии величины магнитного поля) – изодинамическими линиями, или изодинами.

Поэтому изоклины, характеризующиеся некоторым постоянным значением склонения D , не являются прямыми линиями в плоскостных изображениях земной поверхности. Изогоны, являясь изолиниями величины угла склонения, могут даже образовывать замкнутые кривые линии.

Рисунки, иллюстрирующие глобальные распределения угла склонения магнитного поля, имеют достаточно сложный вид. В точках нулевых изоклин (изоклин со значениями склонения $D=0$) вектор \vec{H} направлен к географическому северу.

Картина распределения склонения магнитного поля особенно чётко подчёркивает тот факт, что конфигурация силовых линий существенно отличается от той, что даёт дипольная модель. Это выражается в сложной картине распределения величины магнитного склонения на поверхности Земли.

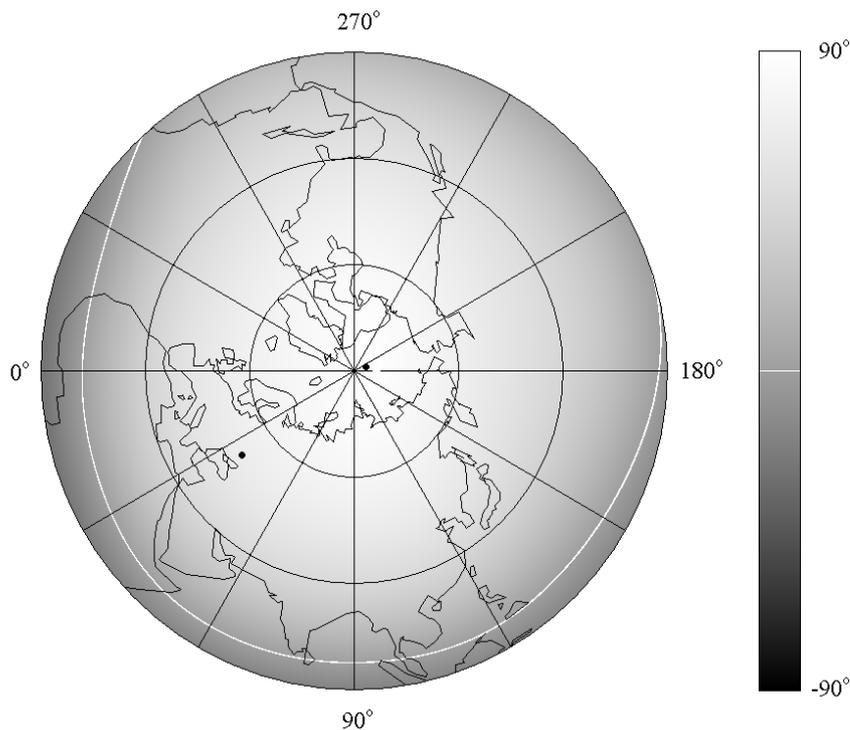


Рис. 4 – Глобальное распределение магнитного наклонения вблизи поверхности Земли в северном полушарии в 2015 году

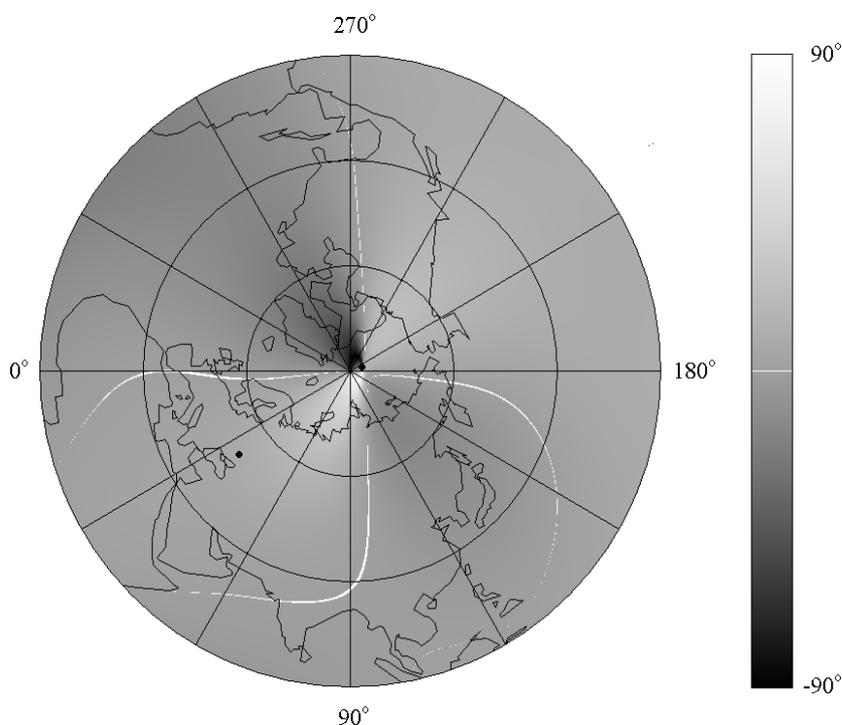


Рис. 5 – Глобальное распределение магнитного склонения вблизи поверхности Земли в северном полушарии в 2015 году

Вычисление скорости движения плазмы вдоль линий магнитного поля Земли, обусловленного ветром нейтральной среды. Вектор скорости нейтрального ветра $\vec{v}_n = (v_{nx}, v_{ny}, v_{nz}) = (v_{n\phi}, v_{n\lambda}, -v_{nr})$. Одной из составляющих скорости движения ионов (в

частности, ионов O^+) ионосферной плазмы является скорость $\vec{\omega}$ в нейтральной среде вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Абсолютное значение проекция вектора $\vec{\omega}$ на направление вектора напряжённости \vec{H} совпадает с модулем $\omega = |\vec{\omega}|$

вектора скорости. Проекция вектора $\vec{\omega}$ на направление вектора \vec{H} равно проекции вектора \vec{v}_n на то же направлении: $\text{Пр}_{\vec{H}} \vec{\omega} = \text{Пр}_{\vec{H}} \vec{v}_n = \frac{(\vec{v}_n \cdot \vec{H})}{|\vec{H}|}$.

Учитывая, что вектор $\vec{H} = (H_x, H_y, H_z) = H \cdot (\cos I \cdot \cos D, \cos I \cdot \sin D, \sin I)$, получаем, что

$$\begin{aligned} \text{Пр}_{\vec{H}} \vec{\omega} &= \frac{(\vec{v}_n \cdot \vec{H})}{|\vec{H}|} = \\ &= \frac{v_{nx}H_x + v_{ny}H_y + v_{nz}H_z}{H\sqrt{\cos^2 I \cdot \cos^2 D + \cos^2 I \cdot \sin^2 D + \sin^2 I}} = \\ &= \frac{v_{nx}H_x + v_{ny}H_y + v_{nz}H_z}{H\sqrt{\cos^2 I \cdot (\cos^2 D + \sin^2 D) + \sin^2 I}} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{v_{nx}H_x + v_{ny}H_y + v_{nz}H_z}{H\sqrt{\cos^2 I + \sin^2 I}} = \\ &= \frac{v_{nx}H_x + v_{ny}H_y + v_{nz}H_z}{H} = \\ &= v_{nx} \cos I \cdot \cos D + v_{ny} \cos I \sin D + v_{nz} \sin I = \\ &= (v_{nx} \cos D + v_{ny} \sin D) \cdot \cos I + v_{nz} \sin I. \end{aligned}$$

Проекция вектора скорости $\vec{\omega}$ на ось z равна $\omega_z = \text{Пр}_{\vec{H}} \vec{\omega} \cdot \sin I$.

Радиальная проекция вектора скорости движения ионов вдоль магнитной силовой линии

$$\begin{aligned} \omega_r &= -\omega_z = -\text{Пр}_{\vec{H}} \vec{\omega} \cdot \sin I = \\ &= -(v_{nx} \cos D + v_{ny} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I - v_{nz} \sin^2 I = \\ &= -(v_{n\varphi} \cos D + v_{n\lambda} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I + v_{nr} \sin^2 I. \end{aligned}$$

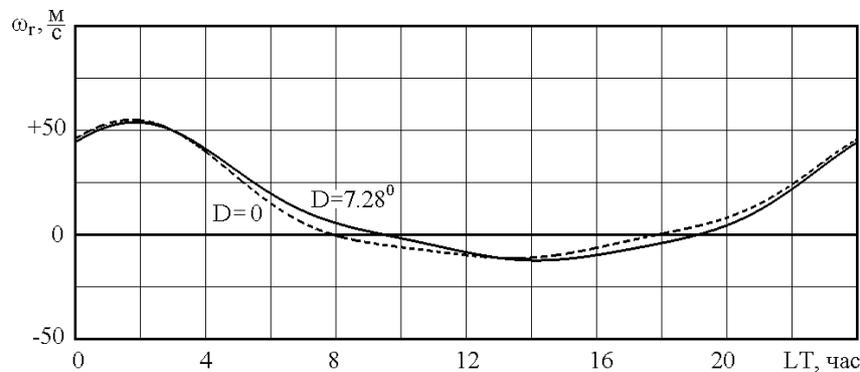


Рис. 6 – Результаты вычисления радиальной проекции вектора скорости движения ионов вдоль магнитной силовой линии в день осеннего равноденствия на высоте 300 км над Харьковом при магнитоспокойных условиях ($A_p=2$) и умеренной солнечной активности ($F_{10.7}=100$) при учёте склонения магнитного поля Земли (сплошная линия), а также при пренебрежении им (пунктир)

Величину ω_r можно назвать радиальной составляющей скорости движения ионов в нейтральной среде вдоль магнитных линий. В полученной формуле для вычисления скорости плазмы ω_r помимо горизонтальных составляющих нейтральной скорости (а именно, зональной и меридиональной) присутствует вертикальная составляющая скорости нейтрального ветра. Однако считается, что на высотах области F2 ею можно пренебречь. Для случая горизонтальных нейтральных ветров, когда $v_{nr} = 0$, скорость $\omega_r = -(v_{n\varphi} \cos D + v_{n\lambda} \sin D) \cdot \cos I \cdot \sin I$.

Если дополнительно пренебречь склонением ($D \approx 0$), скорость $\omega_r = -v_{n\varphi} \cdot \cos I \cdot \sin I$.

Конечно, чем проще формула, тем она прозрачнее для анализа. В формуле $\omega_r = -v_{n\varphi} \cdot \cos I \cdot \sin I$ знак скорости плазмы напрямую связан со знаком меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра. Однако эта формула вносит погрешности, иллюстрируемые рисунком 6.

Пренебрежение углом склонения приводит к некоторым погрешностям вычисления скорости движения плазмы, что влечёт погрешности в теоретических расчётах электронной концентрации. Очевидно, что для расчётов вблизи полюсов данная погрешность будет недопустимо значительной.

Выводы. Магнитное поле у поверхности Земли имеет сложный характер, значительно отличающийся от того, что даёт дипольная модель. При теоретических расчётах скорости движения плазмы, вызванной нейтральными ветрами, для средних и полярных широт необходимо учитывать угол склонения, величина которого определяется степенью несовпадения географического и магнитного полюсов.

Список литературы

1. Campbell W. H. Introduction to Geomagnetic Fields / W. H. Campbell. – New York: Cambridge University Press, 2007. – 337 p.
2. Merrill R. T. The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle / R. T. Merrill, M. W. McElhinny, P. L. McFadden. – London: Academic Press Limited, 1996. – 526 p.
3. Jacobs J. A. Reversals of the Earth's Magnetic Field / J. A. Jacobs. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 346 p.

4. *Glaßmeier K.-H. Geomagnetic Field Variations / K.-H. Glaßmeier, H. Soffel, J. F. W. Negendank.* – Potsdam: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – 213 p.
5. *Davies K. Ionospheric Radio Propagation / K. Davies.* – Washington: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1965. – 470 p.
6. *Hayhurst J. Earth Magnetism: A Guided Tour Through Magnetic Fields / J. Hayhurst.* – San Diego: Academic Press. A Harcourt Science and Technology Company, 2001. – 155 pp.
7. *Lanza R. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists / R. Lanza, A. Meloni.* – Berlin: Springer Science + Business Media, 2006. – 278 p.
8. *Mandea M. Geomagnetic Observations and Models / M. Mandea, M. Korte.* – Potsdam: Springer Science + Business Media, 2011. – 343 p.
2. *Merrill R. T., McElhinny M. W., McFadden P. L. The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle.* London: Academic Press Limited, 1996, 526 p.
3. *Jacobs J. A. Reversals of the Earth's Magnetic Field.* New York: Cambridge University Press, 2005, 346 p.
4. *Glaßmeier K.-H., Soffel H., Negendank J. F. W. Geomagnetic Field Variations.* Potsdam: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, 213 p.
5. *Davies K. Ionospheric Radio Propagation.* Washington: U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards, 1965, 470 p.
6. *Hayhurst J. Earth Magnetism: A Guided Tour Through Magnetic Fields.* San Diego: Academic Press. A Harcourt Science and Technology Company, 2001, 155 p.
7. *Lanza R., Meloni A. The Earth's Magnetism: An Introduction for Geologists.* Berlin: Springer Science + Business Media, 2006, 278 p.
8. *Mandea M., Korte M. Geomagnetic Observations and Models.* Potsdam: Springer Science + Business Media, 2011, 343 p.

References (transliterated)

1. Campbell W. H. *Introduction to Geomagnetic Fields.* New York: Cambridge University Press, 2007, 337 p.

Поступила (received) 20.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Вплив структури магнітного поля Землі на теоретичний розрахунок швидкості руху плазми, що індукується вітром нейтрального середовища / С. В. Грінченко, Д. А. Дзюбанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 41–48. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9998.

Влияние структуры магнитного поля Земли на теоретический расчёт скорости движения плазмы, индуцированного ветром нейтральной среды / С. В. Гринченко, Д. А. Дзюбанов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X. : НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 41–48. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9998.

Influence of Earth's magnetic field structure on a theoretical calculation of the plasma velocity induced by neutral environment wind / S. V. Grinchenko, D. A. Dziubanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 41–48. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Грінченко Сергій Володимирович – науковий співробітник Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Гринченко Сергей Владимирович – научный сотрудник Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Grinchenko Sergii Volodymyrovych – Researcher of Institute of ionosphere, NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (066) 963-18-85; e-mail: svgrinchenko@gmail.com.

Дзюбанов Дмитро Анатолійович – професор Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків, тел.: (050) 698-53-23; e-mail: dzyubanov@gmail.com.

Дзюбанов Дмитрий Анатольевич – профессор Национального технического университета «ХПИ», г. Харьков; тел.: (050) 698-53-23; e-mail: dzyubanov@gmail.com.

Dziubanov Dmytro Anatoliyovych – professor of National Technical University “KPI”, Kharkiv; phone: (050) 698-53-23; e-mail: dzyubanov@gmail.com.

УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, Н. С. ЛЯШЕНКО**ЭФФЕКТЫ СЕЗОННОЙ И ПОЛУГОДОВОЙ АНОМАЛИЙ В ВАРИАЦИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ ОБЛАСТИ F2 ИОНОСФЕРЫ НА РАЗНЫХ ФАЗАХ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Представлено результати експериментальних досліджень варіацій концентрації електронів в максимумі області F2 іоносфери за даними іонозонда "Базис". Проведено аналіз і фізична інтерпретація ефектів сезонної та піврічної аномалій в варіаціях концентрації електронів N_m на різних фазах циклу сонячної активності. Приведено результати порівняльного аналізу розрахунків N_m за глобальною моделлю іоносфери IRI-2012, регіональною моделлю іоносфери CERIM ION та експериментальними даними іонозонда "Базис".

Ключові слова: концентрація електронів, сезонна аномалія, піврічна аномалія, модель іоносфери, фази циклу сонячної активності

Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы по данным ионозонда "Базис". Выполнен анализ и физическая интерпретация эффектов сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов N_m на разных фазах цикла солнечной активности. Приведены результаты сравнительного анализа расчетов N_m по глобальной модели ионосферы IRI-2012, региональной модели ионосферы CERIM ION и экспериментальными данными ионозонда "Базис".

Ключевые слова: концентрация электронов, сезонная аномалия, полугодовая аномалия, модель ионосферы, фазы цикла солнечной активности

Results of experimental investigations of variation of electron concentration in the maximum of F2 region of ionosphere on ionosonde "Basis" data are presented. Analysis and physical interpretation of seasonal and semi-annual anomaly effects in the N_m electron concentration variations on different phases of the solar activity cycle were carried out. Results of the comparative analysis of the N_m calculations from IRI-2012 global ionospheric model and CERIM ION regional model of ionosphere and the ionosonde "Basis" experimental data are presented.

Keywords: electron concentration, seasonal anomaly, semi-annual anomaly, model of ionosphere, phases of solar activity cycle

Введение. Исследование вариаций основных параметров околоземного космоса является одной из важных фундаментальных задач современной геофизики.

В настоящее время исследованиям, анализу и моделированию параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях посвящено довольно большое количество публикаций [см., например, 1 – 12 и ссылки в них]. Следует отметить, что особое внимание уделяется исследованию эффектов редких и уникальных событий в геокосмосе – сильнейших геокосмических бурь, затмений Солнца и др. [см., например, 13 – 18]. Однако изучение и физическая интерпретация поведения параметров геокосмической плазмы в магнитоспокойных условиях не менее актуально, поскольку все возмущения разворачиваются на этом фоне. Полученные результаты также находят своё практическое применение, например, в развитии современных моделей ионосферы и построении новых эмпирических и полуэмпирических моделей геокосмоса.

Целью данной работы является наблюдение, анализ и физическая интерпретация эффектов сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах 23-го и 24-го циклов солнечной активности для характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

Средства и методы. В работе использованы экспериментальные данные о критической частоте слоя F2 ионосферы f_oF_2 , полученные с помощью ионозонда "Базис", расположенного в Ионосферной обсерватории Института ионосферы. Характеристики

ионозонда следующие: диапазон частот 1 – 40 МГц, эффективная мощность 1 – 10 кВт, длительность импульса 50 – 100 мкс, диапазон исследуемых высот 100 – 400 км. Погрешность получения f_oF_2 составляет 0.05 МГц (или 0.5 – 1 % для $f_oF_2 = 10 – 5$ МГц соответственно). Для расчёта значений концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы использовано следующее соотношение (f_oF_2 в МГц):

$$N_m = 1.24 \cdot 10^{10} \cdot (f_oF_2)^2.$$

Гелиогеофизическая обстановка. В табл. 1 приведены сведения о геомагнитной и солнечной активности для рассматриваемых периодов. В таблице представлены значения индекса солнечной активности – потока декаметрового излучения Солнца на длине волны 10.7 см – $F_{10.7}$; индекса $\langle F_{10.7} \rangle$, усредненного за три оборота Солнца; индекса геомагнитной активности A_p . В целом, для рассмотренных периодов имела место спокойная гелиогеофизическая обстановка.

Результаты эксперимента. Фаза спада солнечной активности. На рис. 1 представлены суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе спада 23-го цикла солнечной активности в периоды весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

Как видно из рисунка, в суточных вариациях концентрации электронов в период, близкий к зимнему солнцестоянию, имеет место хорошо выраженный максимум в околополуденные часы со значениями $N_m \approx 0,77 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночных условиях концентрация электронов в максимуме слоя F2 ионосферы не превышает $0,14 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

© М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко, 2016

В период летнего солнцестояния суточные изменения N_m имели следующий вид. Рост концентрации электронов наблюдался примерно с 0400 EEST. Далее в интервале 0800 – 2400 EEST концентрация N_m достигала своих максимальных значений $(0,55 - 0,6) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, с последующим уменьшением до фоновых ночных значений $N_m \approx 0,24 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из рисунка, в сезонных вариациях концентрации электронов хорошо проявились эффекты сезонной аномалии. Так, в околополуденные часы зимой значения N_m превышали летние примерно в 1,4 раза.

Таблица 1 – Индексы геомагнитной и солнечной активностей для рассматриваемых периодов

Дата	$F_{10,7}$	$\langle F_{10,7} \rangle$	A_p
<i>Спад сонечної активності</i>			
30.03.2004 г.	126	104	14
16.06.2004 г.	115	110	7
14.09.2004 г.	116	106	32
17.12.2003 г.	113	119	7
<i>Мінімум сонечної активності</i>			
24.03.2010 г.	84	80	3
23.06.2010 г.	77	78	3
21.09.2010 г.	85	81	4
22.12.2010 г.	75	81	1
<i>Ріст сонечної активності</i>			
28.03.2012 г.	107	113	15
20.06.2012 г.	107	131	3
26.09.2012 г.	140	119	6
19.12.2012 г.	110	118	5
<i>Максимум сонечної активності</i>			
20.03.2013 г.	107	113	9
25.06.2014 г.	100	132	5
24.09.2014 г.	146	145	21
18.12.2014 г.	206	159	5

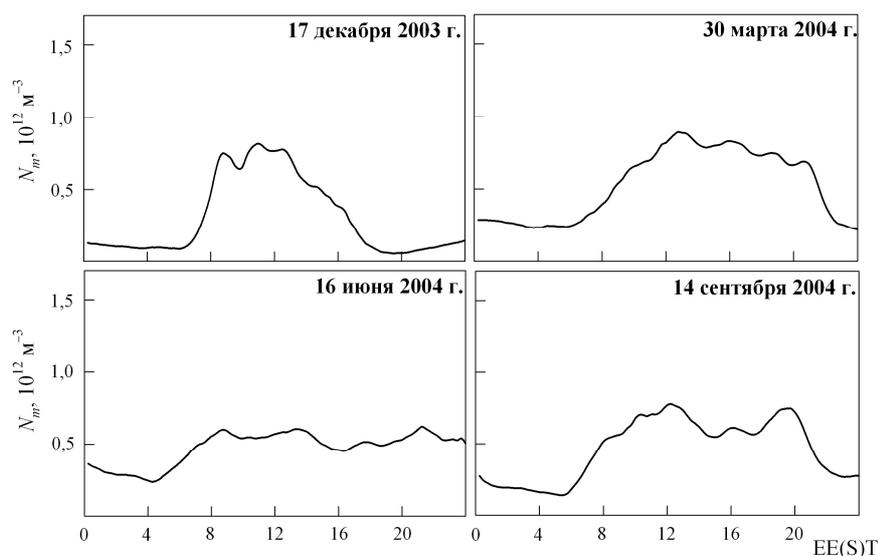


Рис. 1 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе спада солнечной активности

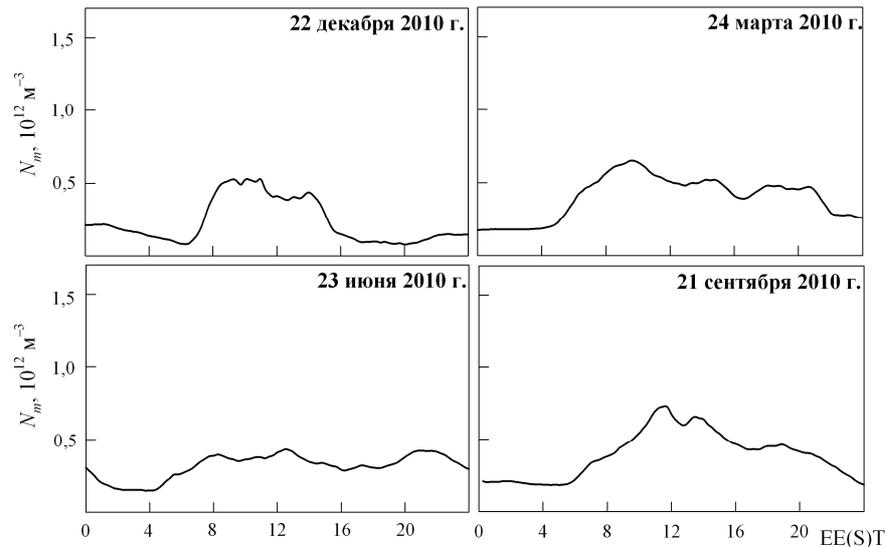


Рис. 2 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе минимума солнечной активности

Наряду с эффектами сезонной аномалии для периода спада солнечной активности наблюдались также эффекты и полугодовой аномалии. Так, околополуденные значения N_m в периоды равноденствий примерно в 1,1 – 1,4 раза больше значений концентрации электронов в периоды летнего и зимнего солнцестояний. Следует также отметить, что эффекты сезонной и полугодовой аномалий в ночных условиях не наблюдались.

Фаза минимума солнечной активности. На рис. 2 представлены временные вариации концентрации электронов N_m в период минимума солнечной активности для зимнего и летнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий.

Как видно из рисунка, в зимних условиях в суточных вариациях концентрации N_m наблюдался один максимум в околополуденные часы с максимальными значениями $N_m \approx 0,39 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы концентрация электронов не превышала $0,21 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует также отметить, что в околополуночные часы наблюдалось незначительное увеличение концентрации электронов, связанное с потоками частиц из плазмосферы.

В период летнего солнцестояния суточный ход N_m имел форму “плато” с максимальными значениями концентрации примерно в 1200 и 2100 EEST. В околополуденные часы $N_m \approx 0,43 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночных условиях концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы не превышала значений $0,34 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как показал анализ сезонных вариаций концентрации N_m в минимуме солнечной активности, эффект сезонной аномалии не наблюдался. Однако, эффекты полугодовой аномалии в вариациях концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы имели место. Так, концентрация частиц в период осеннего равноденствия в околополуденные

часы примерно в 1,6 – 1,8 раза больше значений N_m летом и зимой. Для периода весеннего равноденствия наблюдалось превышение околополуденных значений концентрации примерно в 1,3 раза над значениями N_m в летний и зимний сезоны.

Фаза роста солнечной активности. На рис. 3 приведены суточные и сезонные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе роста солнечной активности.

Вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния на фазе роста солнечной активности подобны вариациям N_m на фазах спада и минимума солнечной активности. В суточном ходе N_m имеет место хорошо выраженный максимум в околополуденные часы. Максимальное значение концентрации электронов в дневные часы достигает $0,71 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы N_m не превышает $0,17 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Суточные вариации N_m в период летнего солнцестояния имеют довольно сложный характер. Следует также отметить, что форма суточной зависимости концентрации электронов, наблюдаемой в данном случае, является типичной для летнего сезона. В вариациях N_m имели место несколько максимумов, приходящихся на 0800, 1400 и 2200 EEST. Максимальные значения N_m в дневные часы не превышали $0,63 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что в ночных условиях регистрировались значения концентрации электронов сравнимые с дневными значениями N_m . Минимальные значения концентрации электронов имели место примерно в 0400 EEST и составляли $0,22 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Вариации N_m в период весеннего равноденствия на фазе роста солнечной активности качественно подобны вариациям концентрации электронов, наблюдаемых на фазах спада и минимума солнечной активности. В рассматриваемом случае, в суточном ходе N_m наблюдался один максимум примерно в

1500 EET. В дневные часы $N_m \approx 0,66 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы $N_m \approx 0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Форма суточных вариаций концентрации электронов N_m в период осеннего равноденствия качественно подобна форме суточных вариаций N_m на фазе максимума солнечной активности. Так, в суточном ходе концентрации электронов имеет место хорошо выраженный максимум примерно в 1100 – 1200 EEST. Максимальные значения N_m в дневные часы примерно $1,26 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночных условиях концентрация электронов уменьшалась до значений $0,27 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Сезонные вариации концентрации электронов на фазе роста солнечной активности заключались в следующем. Как видно из рисунка, в сезонных вариациях N_m имели место эффекты, как сезонной, так и полугодовой аномалий. Зарегистрировано превышение зимних дневных значений концентрации

электронов над дневными летними примерно в 1,3 раза. В ночных условиях, эффекты сезонной аномалии не зафиксированы. Эффекты полугодовой аномалии имели следующие особенности. Для периода осеннего равноденствия наблюдалось превышение дневных значений N_m значений концентрации электронов как для периода летнего, так и зимнего солнцестояния (примерно в 2,5 и 1,9 раза). Для периода весеннего равноденствия имела место следующая ситуация. Значения N_m весной примерно в 1,2 раза больше значений концентрации электронов летом. Однако для зимних и весенних условий значения N_m мало различимы (не более 8 %).

Фаза максимума солнечной активности. На рис. 4 представлены сезонно-суточные вариации концентрации электронов N_m в период максимума солнечной активности.

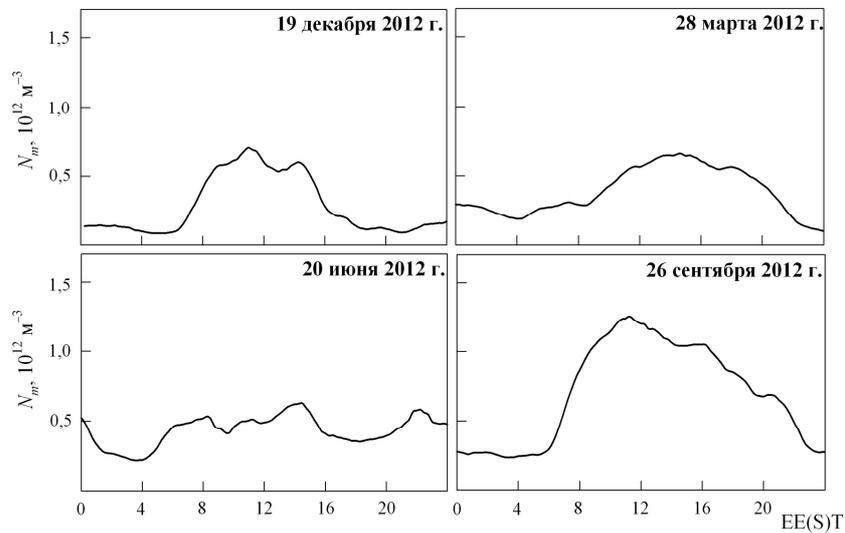


Рис. 3 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе роста солнечной активности

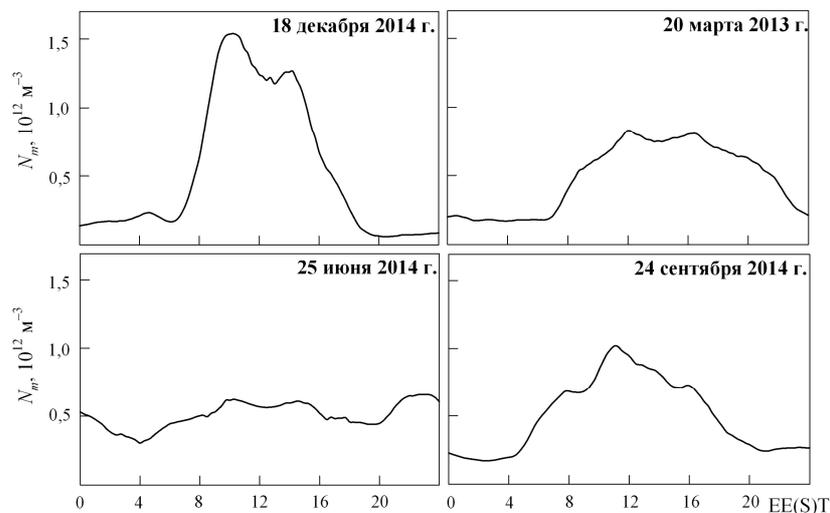


Рис. 4 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе максимума солнечной активности

Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы в период максимума солнечной активности заключались в следующем. В период зимнего солнцестояния форма суточного хода концентрации электронов качественно подобна суточным зависимостям N_m в зимний период на фазах минимума, спада и роста солнечной активности. Так, в суточном ходе N_m имеет место хорошо выраженный максимум около 1000 ЕЕТ. Значения концентрации электронов достигали величины примерно $1,54 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Также в суточной зависимости концентрации электронов наблюдался локальный “всплеск”, приходящийся примерно на 1400 ЕЕТ. В ночные часы N_m уменьшалась примерно до значений $0,14 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Для периода летнего солнцестояния суточный ход N_m имеет форму “плато” в интервале времени с 1000 до 1400 ЕЕТ. В дневные часы $N_m \approx 0,57 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Также в суточных вариациях концентрации электронов имеет место хорошо выраженный максимум в 2200 ЕЕТ со значениями $N_m \approx 0,66 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Минимальное значение концентрация электронов принимала примерно в 0400 ЕЕТ. В данный момент времени концентрация N_m не превышала $0,3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

В период весеннего равноденствия в суточной зависимости концентрации электронов N_m наблюдался максимум в околополуденные часы. Причем концентрация частиц достигала величины $N_m \approx 0,76 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы N_m не превышала значений $0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Суточный ход N_m во время осеннего равноденствия качественно подобен суточной зависимости концентрации электронов в весенний период. Максимальные дневные значения $N_m \approx 1,02 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы $N_m \approx 0,32 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из рисунка, эффекты сезонной аномалии в максимуме солнечной активности хорошо заметны. Сравнительный анализ вариаций концентрации электронов в околополуденные часы в периоды зимнего и летнего солнцестояния показал следующее. Зимние дневные значения N_m превышают летние примерно в 2 раза. В ночные часы, как и для ранее рассмотренных фаз цикла солнечной активности, сезонная аномалия не проявляется.

Эффекты полугодовой аномалии в вариациях концентрации электронов N_m для периода максимума солнечной активности также экспериментально зарегистрированы. Однако, имели место некоторые особенности. Так, значения концентрации электронов в околополуденные часы в равноденственные периоды превышали значения N_m в период летнего солнцестояния примерно в 1,3 – 1,7 раза. Тогда, как для периода зимнего солнцестояния значения N_m примерно в 1,2 – 1,5 раза больше значений концентрации электронов в периоды равноденствий.

Результаты моделирования. Для рассмотренных характерных геофизических периодов и основных фаз цикла солнечной активности выполнен расчет концентрации электронов в

максимуме области F2 ионосферы в околополуденные и околополуденные часы, используя современные модели ионосферы – глобальную модель ионосферы IRI-2012 и региональную модель CERIM ION.

Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere) – IRI-2012 [19, 20] построена на основе данных прямых наблюдений. Основными источниками экспериментальных данных, которые использовались для построения модели, служили данные мировой сети ионосферных станций (ионозондов); данные радаров некогерентного рассеяния в Хикамарке, Аресибо, Миллстоун Хилле, Малверне и Сент-Сантине, а также результаты измерений с помощью спутников и геофизических ракет.

По модели IRI можно рассчитать концентрацию электронов N , температуру электронов T_e и ионов T_i , относительный ионный состав (O^+ , H^+ , He^+ , O_2^+ , NO^+) в высотном диапазоне 50 – 2000 км, а также значения полного электронного содержания для заданного местоположения, времени и даты.

Региональная полуэмпирическая модель ионосферы CERIM ION построена на основе экспериментальных данных, полученных с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния и ионозонда “Базис” в период с 1986 по 2013 гг. [21 – 23] Зависимость параметров ионосферы от солнечной активности определяется фазами цикла солнечной активности. К выходным параметрам региональной модели относятся: концентрация электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i , скорость переноса плазмы; частоты соударений заряженных и нейтральных частиц, продольные составляющие тензоров амбиполярной диффузии и теплопроводности, плазменная приведенная высота; скорость переноса частиц за счёт амбиполярной диффузии, плотность полного потока частиц, плотность потока за счёт амбиполярной диффузии, скорости нейтральных ветров, подвод энергии к электронам и плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу.

В таблицах 2 – 5 представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных данных концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы с данными, рассчитанными с помощью ионосферных моделей IRI-2012 и CERIM ION.

Обсуждение полученных результатов. Анализ рассмотренных временных зависимостей концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы показал существование эффектов сезонной аномалии в вариациях N_m . Эффекты сезонной аномалии заключаются в превышении зимних околополуденных значений концентрации электронов над летними на высотах вблизи максимума области F2 ионосферы. Так, для периода максимума солнечной активности, получено, что зимние значения N_m превышали летние примерно в 2 раза. На фазах спада и роста солнечной активности зимние околополуденные значения N_m превышали летние

примерно в 1,3 – 1,4 раза. В минимуме солнечной активности в вариациях N_m эффекты сезонной аномалии не проявились.

В настоящее время предложен ряд механизмов, объясняющих явление сезонной аномалии. Доминирующую роль в появлении сезонной аномалии играют сезонные вариации нейтрального состава на высотах области F2 ионосферы [8 – 10].

Вариации нейтрального состава на высоте максимума области F2 ионосферы, в свою очередь, обусловлены сезонными вариациями параметров термосферной циркуляции между северным и южным полушариями. Как известно, газ из разогретой области перемещается вверх и в горизонтальных направлениях к более холодным областям. Под действием градиентов давления легкие компоненты нейтрального газа переносятся в более холодные области [1]. Основным результатом этого процесса является увеличение в более холодном зимнем полушарии относительного содержания легких компонент O и He, а летнее полушарие обогащается молекулярными компонентами N_2 и O_2 .

Хорошо известно, что в области максимума ионизации концентрация электронов пропорциональна концентрации атомарного кислорода: $N \sim N(O)$ [1]. В период летнего солнцестояния рост концентрации атомарного кислорода и, следовательно, концентрации электронов ограничивается появлением молекулярных компонент N_2 и O_2 и увеличением скорости потерь ионов O^+ при

взаимодействии с молекулярным азотом и кислородом [1].

Отсутствие эффектов сезонной аномалии в ночные часы обусловлено следующим. В период зимнего солнцестояния на высотах, близких высоте максимума области F2 ионосферы, рекомбинация плазмы после захода Солнца происходит при направленном к полюсу нейтральном ветре, увлекающего заряженные частицы вниз на значительно меньшие высоты, чем в летний период. В результате чего, вечерняя рекомбинация в максимуме области F2 идет быстрее зимой, чем летом [1].

Анализ полученных сезонно-суточных зависимостей концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы показал существование эффектов полугодовой аномалии в вариациях N_m . Так, было зафиксировано превышение дневных значений N_m в равноденственные периоды значений концентрации электронов в периоды зимнего и летнего солнцестояний примерно в 1,1 – 2,5 раза в зависимости от уровня солнечной активности.

Эффекты полугодовой аномалии в сезонных изменениях N_m могут быть обусловлены появлением равноденственных максимумов в вариациях концентраций частиц в нейтральной атмосфере, полугодовыми вариациями параметров геомагнитного поля, полугодовыми вариациями параметров волновых возмущений в нижней и средней атмосфере, полугодовыми вариациями высоты максимума области F2 [8, 10].

Таблица 2 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе спада цикла солнечной активности

Спад солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ION	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.	12 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	0,77	0,11	0,79	0,15	0,89
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,51	0,57	0,37	0,54	0,50	0,64
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,22	0,82	0,19	0,73	0,32	1,01
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,27	0,77	0,16	0,56	0,25	0,80

Таблица 3 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе минимума цикла солнечной активности

Минимум солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ION	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,21	0,39	0,10	0,51	0,13	0,38
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,34	0,43	0,27	0,40	0,30	0,36
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,17	0,51	0,10	0,41	0,17	0,47
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,21	0,70	0,13	0,45	0,19	0,54

Таблица 4 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе роста цикла солнечной активности

Рост солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ИОН	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	0,61	0,11	0,99	0,15	0,85
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,57	0,46	0,43	0,64	0,46	0,58
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,29	0,56	0,24	0,91	0,25	0,74
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,30	1,17	0,21	0,87	0,29	1,04

Таблица 5 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе максимума цикла солнечной активности

Максимум солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ИОН	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	1,14	0,12	1,20	0,18	2,06
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,52	0,57	0,50	0,73	0,42	0,53
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,15	0,76	0,20	0,93	0,25	0,75
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,32	0,97	0,25	1,02	0,30	1,09

Сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетов по глобальной (IRI-2012) и региональной (CERIM ИОН) моделям показал, что рассмотренные модели в большинстве случаев корректно рассчитывают околополуденные и околополуночные значения концентрации электронов в области F2 ионосферы. Существенные различия в значениях N_m для модели IRI-2012 и экспериментальными данными имели место в период роста (дневные условия, зимнее солнцестояние и весеннее равноденствие) и минимума (ночные условия, зимнее солнцестояние) солнечной активности. Для региональной модели ионосферы CERIM ИОН получено, что значительные различия между модельными данными и экспериментом наблюдались в максимуме солнечной активности (день, зимнее солнцестояние) и минимуме солнечной активности (ночь, весеннее равноденствие). В целом, рассматриваемые модели хорошо отслеживают сезонные вариации N_m . Эффекты сезонной аномалии воспроизводят обе модели. Тогда, как эффекты полугодовой аномалии модель CERIM ИОН отражает в большом числе случаев, по сравнению с моделью IRI-2012.

Выводы. В работе получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ сезонно-суточных вариаций концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах цикла солнечной

активности в периоды равноденствий и солнцестояний.

2. Подтверждено существование сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы.

3. Получено, что в максимуме солнечной активности зимние значения N_m превышали летние примерно в 2 раза. На фазах спада и роста солнечной активности зимние околополуденные значения N_m превышали летние примерно в 1,3 – 1,4 раза. В минимуме солнечной активности в вариациях N_m эффекты сезонной аномалии не проявились.

4. Эффекты полугодовой аномалии заключались в превышении дневных значений N_m в равноденственные периоды значений концентрации электронов в периоды зимнего и летнего солнцестояний примерно в 1,1 – 2,5 раза в зависимости от уровня солнечной активности.

5. Выполнен сравнительный анализ расчетов по моделям IRI-2012 и CERIM ИОН с экспериментальными данными. Получено, что рассматриваемые модели в большинстве случаев корректно рассчитывают значения концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы и воспроизводят сезонные особенности в вариациях N_m на разных фазах цикла солнечной активности.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

2. Zang S. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987 / S. Zang, J. M. Holt, A. M. Zalucha // *J. Geophys. Res.* – 2004. – vol. 109, no. A11. – doi: 10.1029/2004JA010709
3. Bhuyan P. K. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of electron temperature measured by the SROSS C2 satellite at 500 km altitude and comparison with the IRI / P. K. Bhuyan, M. Chamua, P. Subrahmanyam, S. C. Garg // *Annales Geophysicae.* – 2002. – vol. 20. – P. 807–815.
4. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere / K. S. W. Champion // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – vol. 37, no. 6/7. – P. 915–926.
5. Schunk R. W. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* / R. W. Schunk, A. F. Nagy.–Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
6. Chernogor L. F. Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 / L. F. Chernogor, I. F. Dominin, L. Ya. Emelyanov, S. V. Katsko, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, S. V. Panasenko // *Space research in Ukraine. 2012–2014* / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2014. – P. 20–27.
7. Chernogor L. Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 / L. Chernogor, I. Dominin, L. Emelyanov, S. Katsko, D. Kotov, M. Lyashenko, S. Panasenko // *Space research in Ukraine. 2014 – 2016* / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2016. – 136 p.
8. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1998. – vol. 60. – P. 1385–1402.
9. Rishbeth H. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer / H. Rishbeth, I. C. F. Müller-Wodarg // *Ann. Geophysicae.* – 2006. – vol. 24. – P. 3293–3311.
10. Rishbeth H. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion / H. Rishbeth, K. J. F. Sedgemore-Schulthess, T. Ulich // *Ann. Geophysicae.* – 2000. – vol. 18. – P. 945–956.
11. Mikhailov A. V. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere / A. V. Mikhailov, K. Schlegel // *Annales Geophysicae.* – 2001. – vol. 19. – P. 783–796.
12. Farelo A. F. Global morphology of night-time N_mF_2 enhancements / A. F. Farelo, M. Herraiz, A. V. Mikhailov // *Annales Geophysicae.* – 2002. – vol. 20. – P. 1795–1806.
13. Burmaka V. Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine / V. Burmaka, L. Chernogor, I. Dominin, E. Grigorenko, M. Lyashenko // *Space Research in Ukraine 2008 – 2010* / The Report to the COSPAR. Kiyv, 2011. – P. 22 – 30.
14. Dominin I.F. Variations of the electric field zonal component, the vertical component of the plasma drift and neutral wind velocities in ionosphere over Kharkov (Ukraine) during August 5 – 6, 2011 and November 13 – 15, 2012 magnetic storms / I. F. Dominin, C. La Hoz, M. V. Lyashenko // *Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”*. Серия: “Радиофизика и ионосфера”. – 2014. – № 47 (1089). – С. 15–21.
15. Immel T. J. The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results / T. J. Immel, G. Liu, S. L. England, L. P. Goncharenko, P. J. Erickson, M. V. Lyashenko, M. Milla, J. Chau, H. U. Frey, S. B. Mende, Q. Zhou, A. Stromme, L. J. Paxton // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* – 2015. – vol. 134. – P. 47–55. – doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
16. Chernogor L.F. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko // *International Journal of Remote Sensing.*–2011.–vol. 32, № 11.–P. 3219–3229.
17. Dominin I.F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations / I. F. Dominin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2013. – vol. 53, No. 1. – P. 113–123. – doi: 10.1134/S0016793213010076.
18. Dominin I.F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results / I. F. Dominin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2014. – vol. 54, № 5. – P. 583 – 592. – doi: 10.1134/S0016793214040112.
19. Bilitza D. *International Reference Ionosphere 2000* / D. Bilitza // *Radio Science.* – 2001. – vol. 36, no. 2. – P. 261–275.
20. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). *International Reference Ionosphere – IRI-2012*. Режим доступа: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. Дата обращения: 10.09.2016.
21. Chernogor L. F. Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database / L. F. Chernogor, L. Ya. Emel'yanov, M. V. Lyashenko // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
22. Chernogor L. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting / L. Chernogor, I. Dominin, M. Lyashenko // *EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010)*. *Geophysical Research Abstract.*–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
23. Дзюбанов Д. А. Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния / Д. А. Дзюбанов, И. Г. Захаров, М. В. Ляшенко // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – Т. 10, № 2/3. – С. 28–35.

References (transliterated)

1. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
2. Zang S., Holt J. M., Zalucha A. M. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.*– 2004, vol. 109, no. A11, doi: 10.1029/2004JA010709.
3. Bhuyan P. K., Chamua M., Subrahmanyam P., Garg S. C. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of electron temperature measured by the SROSS C2 satellite at 500 km altitude and comparison with the IRI. *Annales Geophysicae.* 2002, vol. 20, pp. 807–815.
4. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.*–1975.– vol. 37, No. 6/7.–P. 915–926.
5. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
6. Chernogor L. F., Dominin I. F., Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Panasenko S. V. Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 // *Space research in Ukraine. 2012–2014* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2014, pp. 20 – 27.
7. Chernogor L., Dominin I., Emelyanov L., Katsko S., Kotov D., Lyashenko M., Panasenko S. Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 // *Space research in Ukraine. 2014 – 2016* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2016, 136 p.
8. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, vol. 60, pp. 1385–1402.
9. Rishbeth H., Müller-Wodarg I. C. F. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer. *Ann. Geophysicae.* 2006, vol. 24, pp. 3293–3311.
10. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae.* 2000, vol. 18, pp. 945–956.
11. Mikhailov A. V., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere. *Annales Geophysicae.* 2001, vol. 19, pp. 783–796.
12. Farelo A. F., Herraiz M., Mikhailov A. V. Global morphology of night-time N_mF_2 enhancements. *Annales Geophysicae.* 2002, vol. 20, pp. 1795–1806.
13. Burmaka V., Chernogor L., Dominin I., Grigorenko E., Lyashenko M. Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine // *Space Research in Ukraine 2008 – 2010* / The Report to the COSPAR. Kiyv, 2011, pp. 22 – 30.
14. Dominin I. F., La Hoz C., Lyashenko M. V. Variations of the electric field zonal component, the vertical component of the plasma drift and neutral wind velocities in ionosphere over Kharkov (Ukraine) during August 5 – 6, 2011 and November 13 – 15, 2012 magnetic storms // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta “Har'kovskij politehničeskij institut”*. Serija: “Radiofizika i ionosfera” [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv

- Polytechnic Institute". Series: "Radio Physics and the ionosphere.]. 2014, no. 47 (1089), pp. 15–21.
15. Immel T. J., Liu G., England S. L., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Lyashenko M. V., Milla M., Chau J., Frey H. U., Mende S. B., Zhou Q., Stromme A., Paxton L. J. The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results. *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 134, pp. 47–55, doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
 16. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing.* 2011, vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229.
 17. Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 113–123, doi: 10.1134/S00167932131010076.
 18. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 5, pp. 583–592, doi: 10.1134/S0016793214040112.
 19. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
 20. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). International Reference Ionosphere – IRI-2012. Available at: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. (accessed 10.09.2016).
 21. Chernogor L. F., Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V. Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
 22. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
 23. Dzubanov D. A., Zaharov I. G., Lyashenko M. V. Modelirovanie poludennykh znachenij jelektronnoj koncentracii v maksimume oblasti F2 ionosfery po dannym Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejaniya [Modeling midday values of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere according to the Kharkov incoherent scatter radar]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2004, vol. 10, no. 2/3, pp. 28–35.

Поступила (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ефекти сезонної та піврічної аномалій в варіаціях концентрації електронів в максимумі області F2 іоносфери на різних фазах циклу сонячної активності / М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 49–57. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2078-9998.

Эффекты сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах цикла солнечной активности / М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 49–57. – Библиогр.: 23 назв. – ISSN 2078-9998.

The effects of seasonal and semi-annual anomalies in the variation of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere at different phases of the solar activity cycle / M. V. Lyashenko, N. S. Lyashenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 49–57. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ляшенко Михайло Володимирович – учений секретар Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Ляшенко Михаил Владимирович – учений секретарь Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – scientific secretary of Institute of ionosphere, NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Ляшенко Ніна Сергіївна – вчитель фізики ХЗОШ № 41, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.

Ляшенко Нина Сергеевна – учитель физики ХООШ № 41, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.

Lyashenko Nina Sergiivna – teacher of Physics, Kharkov School № 41, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

М. А. ШУЛЬГА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ИОНОВ ВОДОРОДА ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ В ПЕРИОД МАКСИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МЕТОДА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Представлены результаты исследования высотно-временных вариаций относительной концентрации ионов водорода в верхней ионосфере над Украиной в период максимумов 23-го и 24-го циклов солнечной активности с использованием данных радара некогерентного рассеяния Института ионосферы. Данное исследование позволило выявить, как изменяется поведение ионов водорода после длительного солнечного минимума и провести сравнительный анализ результатов наблюдений между 23-м и 24-м максимумами солнечной активности. Проведено сопоставление данных наблюдений с прогнозами эмпирической (IRI) и физической (SAMI3) моделей.

Ключевые слова: ионный состав, верхняя ионосфера, относительная концентрация ионов водорода, метод некогерентного рассеяния, максимум солнечной активности, эмпирическая модель, физическая модель.

Представлені результати дослідження висотно-часових варіацій відносної концентрації іонів водню у верхній іоносфері над Україною в період максимумів 23-го та 24-го циклу сонячної активності з використанням даних радара некогерентного розсіювання Інституту іоносфери. Дане дослідження дозволило виявити як змінюється поведінка іонів водню після довготривалого сонячного мінімуму і провести порівняльний аналіз результатів спостережень між 23-м і 24-м максимумами сонячної активності. Проведено співставлення даних спостережень з прогнозами емпіричної (IRI) та фізичної (SAMI3) моделей.

Ключові слова: іонний склад, верхня іоносфера, відносна концентрація іонів водню, метод некогерентного розсіювання, максимум сонячної активності, емпірична модель, фізична модель.

We presented the results of investigation altitude and diurnal variations of the relative concentrations of hydrogen ions in the topside ionosphere over Ukraine during the 23-th and 24-th solar maximums using incoherent scatter (IS) radar data of Institute of the ionosphere. This investigation made it possible to reveal how changes the behavior of hydrogen ions after extended solar minimum and make comparative analysis of the results of observations between the 23-th and 24-th solar maximums. The observed variations are compared with predictions of empirical (IRI) and physical (SAMI3) models.

Keywords: ion composition, upper ionosphere, relative concentration of hydrogen ions, incoherent scatter method, maximum of solar activity, empirical model, physical model.

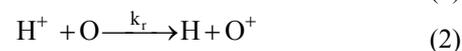
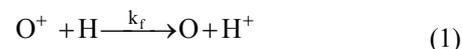
Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн является одним из самых эффективных методов в радиофизике и позволяет получать информацию об основных ионосферных параметрах и их вариациях для длительного периода времени и в широком диапазоне высот. К основным параметрам ионосферы относятся концентрация электронов (N_e), температуры ионов (T_i) и электронов (T_e), скорость движения плазмы (V_d) и ионный состав [1–2].

Исследование высотно-временных вариаций ионного состава внешней ионосферы (над максимумом ионизации) имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Результаты таких исследований приводят к лучшему пониманию взаимодействия ионосферы и плазмосферы [3].

Ионы водорода H^+ являются основной ионной составляющей в наиболее удаленной части земной атмосферы, которая оказывает заметное влияние на ионосферу (вторичная роль принадлежит не менее важным и интересным по своему поведению ионам гелия He^+) [4]. Это наиболее лёгкие ионы (их масса в 16 раз и в 4 раза меньше массы ионов атомарного кислорода и ионов гелия соответственно). Вследствие этого, высотно-временные вариации абсолютной и относительной концентраций ионов H^+ в значительной мере подвержены влиянию химических и динамических процессов (таких как амбиполярная диффузия или нейтральные ветры), которые ответственны за ионосферно-плазмосферное взаимодействие [2, 5].

В дополнение к вышеописанным процессам, значительное влияние на поведение ионов водорода имеет процесс резонансного обмена зарядом между

ионами (атомами) водорода и атомами (ионами) кислорода, который может существенно модифицировать их распределение в верхней ионосфере [6].



где k_f и k_r – прямая и обратная скорости реакций ($cm^3 \cdot s^{-1}$); T_n , T_i – температура нейтральной атмосферы и ионов соответственно.

Вертикальное распределение электронной концентрации N_e также подвергается всем процессам, которые значительно влияют на ионный состав около высоты максимума электронной концентрации и выше. Вследствие этого, любые заметные изменения в ионном составе могут значительно изменить высотное распределение электронной концентрации. Таким образом, надёжные результаты экспериментальных наблюдений лёгких ионов в верхней ионосфере важны. Полученные результаты позволяют получить более качественную оценку эффективности влияния динамических и химических процессов в верхней ионосфере на наблюдаемые вариации относительной концентрации ионов водорода $N(H^+)/N_e$ при различных состояниях космической погоды.

Последний солнечный максимум (2012–2014) следует за длительным и глубоким солнечным минимумом (2007–2009) [7,8]. В течение этого периода, верхняя атмосфера была значительно охлаждена. Кроме того, текущий солнечный максимум значительно слабее предыдущего

© М. О. Шульга, 2016

солнечного максимума (см. рис. 1). Поэтому интересно сравнить наблюдаемые высотные и суточные вариации относительных концентраций водорода в течение 23-го и 24-го солнечных максимумов. Это позволит понять, как поведение ионов водорода после продолжительного солнечного минимума отличается от вариаций в предшествующие периоды максимальной солнечной активности.

Цель данной работы – представить высотно-временные вариации относительного содержания ионов водорода в верхней ионосфере, используя данные радара некогерентного рассеяния Института ионосферы для 23-го и 24-го цикла солнечной активности, сопоставить полученные вариации $N(H^+)/N_e$ с результатами, предоставляемыми эмпирической (IRI) и физической (SAM3) моделями и предложить возможные объяснения отличий между данными наблюдений и прогнозами моделей.

Результаты наблюдений. Наблюдения высотно-временных вариаций относительной концентрации ионов водорода были проведены для дат близких к летнему солнцестоянию с относительно спокойным состоянием космической погоды для 2000, 2004 и 2012 – 2015 (см. рис. 1).

Для обработки данных был использован специализированный программный пакет UPRISE (Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments), разработанный в Институте ионосферы [9].

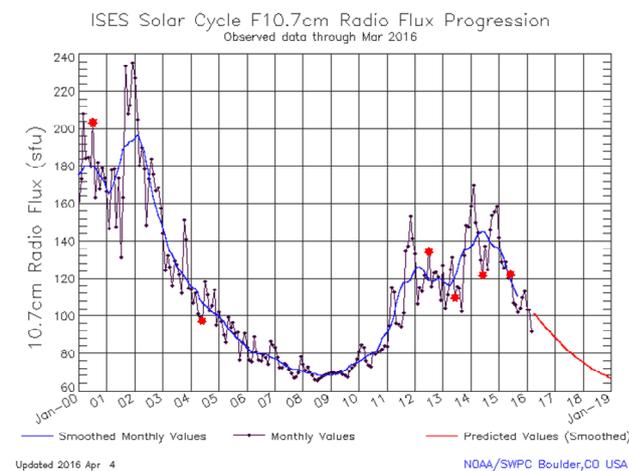


Рис. 1. – Вариации индекса солнечной активности (красными звёздочками выделены даты для которых проведены исследования)

На рисунках 2 и 3 представлены вариации экспериментальных и модельных оценок параметра $N(H^+)/N_e$. Рассмотрим их основные особенности.

Для всех исследуемых дат относительная концентрация ионов водорода увеличивается с ростом высоты. Для дневного времени оценка параметра $N(H^+)/N_e$ низкая (не превышает 7 %) так как основным источником образования ионов водорода является не ионизирующее излучение Солнца, а реакция обмена зарядами между O^+ и атомами водорода, которые в дневное время на нижних высотах присутствуют в небольших количествах [2, 10]. Ночью, когда верхняя

атмосфера охлаждена, $N(H^+)/N_e$ достигает максимальных значений. Наибольшее количество ионов водорода наблюдается близко к полуночи, за счёт переработки кислородной плазмы в ионосфере в водородную в результате реакции (1). Среднее максимальное значение на протяжении 24-го максимума солнечной активности варьируется около 15 – 20 %, для 23-го – не больше 15 %.

Такое поведение ионов водорода в ночное время суток может быть отчасти вызвано поступающим из плазмосферы в ионосферу потоком ионов H^+ . Образовавшиеся в дневное время ионы водорода (реакция (2)), диффундируют вверх и заполняют магнитные силовые трубки. Ночью, когда ионизационные процессы в ионосфере ослабевают, электронная концентрация и температуры заряженных частиц уменьшаются, что приводит к уменьшению давления плазмы у основания трубки. Это, в свою очередь, приводит к появлению потока ионов водорода из плазмосферы и увеличению их относительной концентрации на высотах верхней ионосферы [2, 6, 11]. Другой, возможно, наиболее важной причиной увеличения параметра $N(H^+)/N_e$ может быть ночное увеличение концентрации нейтрального водорода в термосфере [2, 10].

Сравнение полученных результатов для максимумов 23-го и 24-го цикла солнечной активности. Сравнение высотно-временных вариаций $N(H^+)/N_e$, наблюдавшихся с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния в периоды максимумов солнечной активности, подтверждает известный факт, что относительная концентрация ионов водорода уменьшается с увеличением солнечной активности [12] (см. рис. 2).

1 – 2 июля 2000 г. ($F_{10.7} = 16$, $K_p = 2$, $A_p = 9$) максимальное значение параметра $N(H^+)/N_e$ составляло 6%. Для тех же высоты и времени 25 – 26 июня 2014 г. $N(H^+)/N_e$ достигало 20%, 19 – 20 июня 2012 г. – примерно 12%. Вариации $N(H^+)/N_e$ 15 – 16 июня 2004 г. имеют сходный характер с результатами, полученными для 24-го цикла (максимальное значение $N(H^+)/N_e$ достигало 12 %). Это связано с тем, что в этот период наблюдался спад солнечной активности (см. рис. 1).

Сравнение экспериментальных данных с оценками моделей IRI-2012 и SAM3. Сравнение, представленное на рисунках 2 и 3, показывает, что модель IRI некорректно описывает вариации относительной концентрации ионов H^+ .

Видно, что в дневные часы модель IRI, в целом, достаточно достоверно отображает реальные значения $N(H^+)/N_e$, тогда как в ночное время суток модельные значения параметра $N(H^+)/N_e$ имеют максимальные расхождения с экспериментальными данными (модель заметно занижает содержание ионов водорода). Такие отличия, среди прочего, могут быть вызваны тем, что модель не отображает региональную специфику физических процессов в среднеширотной ионосфере (например, влияние на ионы водорода процесса обмена плазмой между ионосферой и лежащей выше плазмосферой), тем самым не позволяя делать

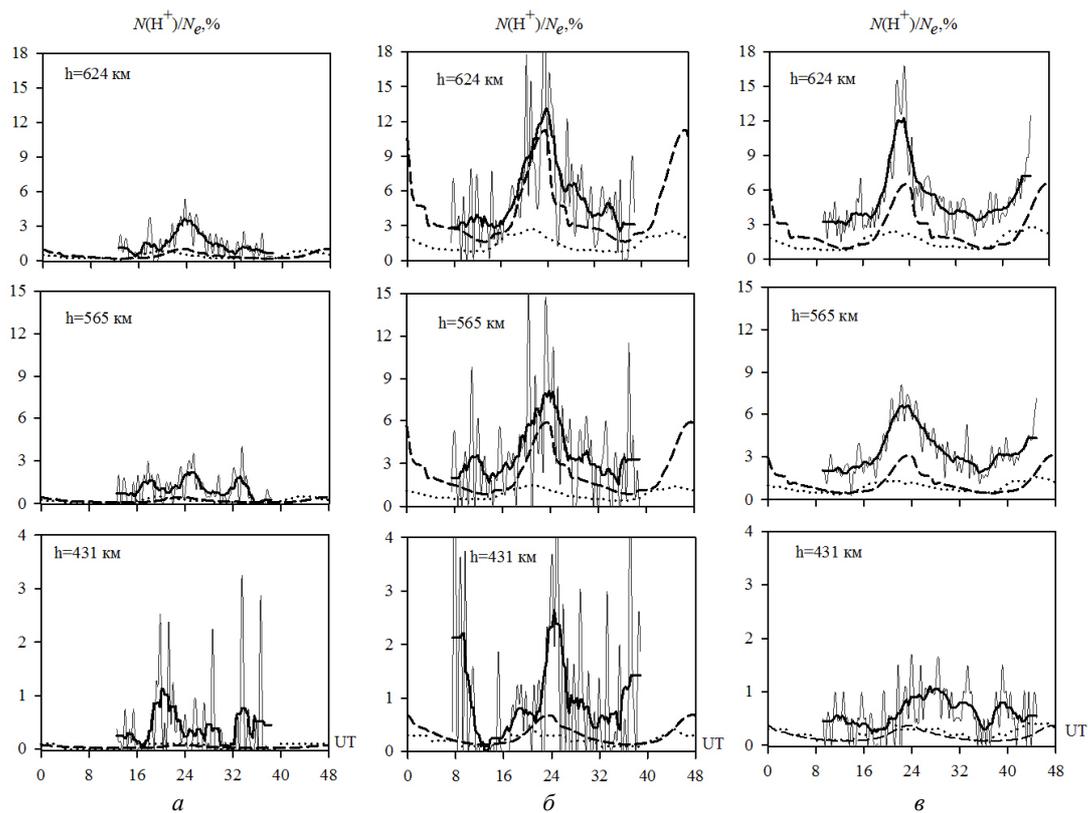


Рис. 2. – Высотно-временные вариации параметра $N(H^+)/N_e, \%$: *a* – 1 – 2 июля 2000 г., *б* – 15 – 16 июня 2004 г., *в* – 19 – 20 июня 2012 г. Здесь и далее тонкая сплошная линия показывает экспериментальные данные, точечная и пунктирная – данные моделей IRI-2012 и SAMI3 соответственно. Жирная сплошная линия показывает усреднённые экспериментальные данные.

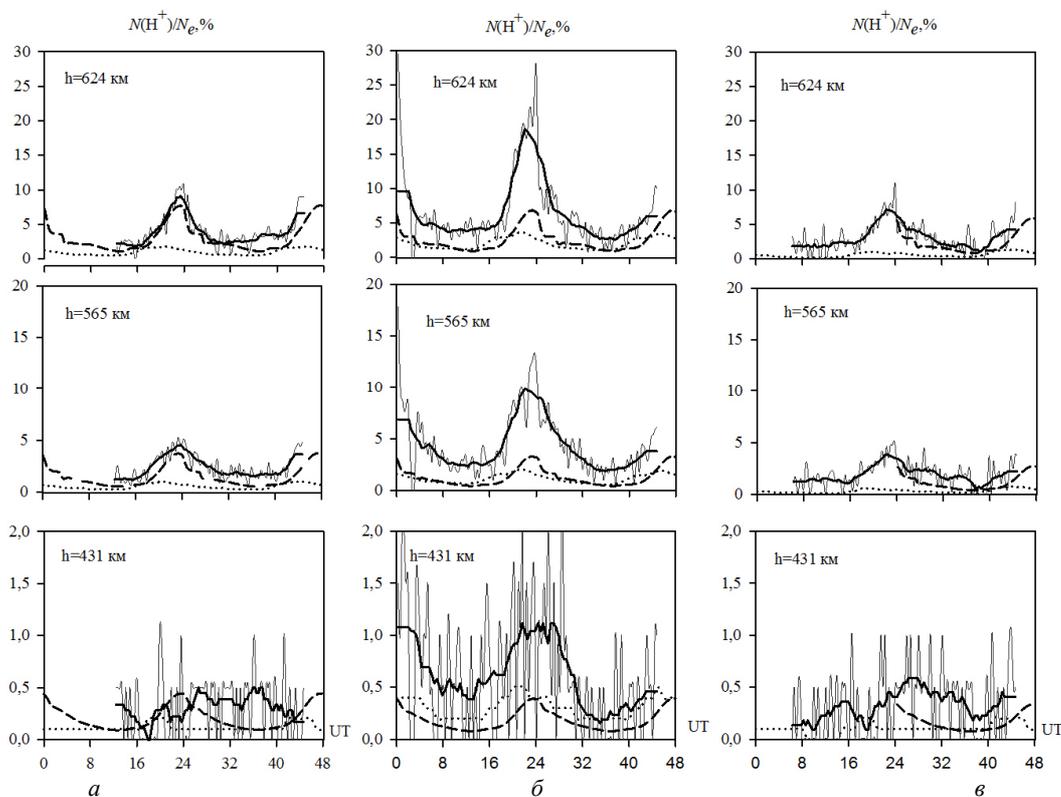


Рис. 3. – Высотно-временные вариации параметра $N(H^+)/N_e, \%$: *a* – 18 – 19 июня 2013 г., *б* – 25 – 26 июня 2014 г., *в* – 18 – 19 июня 2015 г.

надёжные выводы об их поведении в верхней ионосфере. Такая ситуация может быть связана с недопустимо сильным пространственным и временным усреднением большого количества данных наблюдений. В свою очередь, ионосфера постоянно подвергается сильным пространственным и временным изменениям, которые зависят от солнечной активности, электрических и магнитных полей, термосферных циркуляций и метеорологических процессов в нижней и верхней атмосфере. Вследствие этого, механизмы формирования ионосферы различны на разных высотах и вариации $N(H^+)/N_e$ также могут отличаться в разных регионах ионосферы.

Кроме упомянутых факторов, важной причиной заметного занижения параметра $N(H^+)/N_e$ моделью может быть занижение этой величины непосредственно в спутниковых измерителях ионного состава, данные которых использованы для построения модели [13].

Физическая модель SAMI3 даёт значительно лучшее согласие с экспериментальными данными. Особенно это видно в дневное время суток почти для всех исследуемых дат. В ночные же часы модельные значения в несколько раз ниже экспериментальных (почти в 3 раза для 2000 г. и в 4 раза для 2014 г.), тогда как в периоды спада и подъёма солнечной активности наблюдается лучшее согласование результатов (см. рис 2 б и 3 а).

Выводы. 1. Установлено, что в исследуемом диапазоне высот концентрация ионов H^+ увеличивается с высотой, достигая максимальных значений в ночное время суток. Предположительно основными причинами являются увеличение концентрации термосферного водорода в ночные часы, а также, отчасти, усиление нисходящих потоков ионов H^+ из плазмосферы. **2.** Сравнение результатов, полученных с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния для 23-го и 24-го максимумов солнечной активности, подтвердило известный факт, что величина $N(H^+)/N_e$ уменьшается с увеличением солнечной активности. **3.** Представленные результаты сравнения наблюдаемых вариаций $N(H^+)/N_e$ и прогнозов моделей IRI и SAMI3 позволили выявить, что модели значительно занижают содержание ионов водорода в ночные часы. Наибольшие расхождения (до ~4 раз) наблюдались между данными радара HP и эмпирической модели IRI-2012.

Список литературы

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // Proc. IEEE. – 1969. – V. 57, № 4. – P. 496–530. doi: 10.1109/PROC.1969.7005
2. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгалдзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
3. Кринберг И. А. Ионосфера и плазмосфера / И. А. Кринберг, А. В. Тацлин. – М.: Наука, 1984. – 356 с.
4. Bauer S. J. Hydrogen and helium ions. Theoretical considerations and observations obtained by ion mass spectrometry on spacecraft, ground-based backscatter, and VLF observations on satellites / S. J. Bauer // IAGA Aeronomy Symposium (August 16 – 20, 1965, Cambridge, Massachusetts). – United States: NASA Goddard Space Flight Center, 1965.

5. King J. W. Upper atmospheric winds and ionospheric drifts caused by neutral air pressure gradients / J. W. King, H. Kohl // Nature. – 1965. – V. 206, № 4985. – P. 699 – 701. doi: 10.1038/206699a0
6. Schunk R. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. Schunk, A. Nagy. – New York: University Press, 2009. – 628 p.
7. Heelis R. A. Behavior of the O^+/H^+ transition height during the extreme solar minimum of 2008 / R. A. Heelis, W. R. Coley, A. G. Burrell, M. R. Hairston, G. D. Earle, M. D. Perdue, R. A. Power, L. L. Harmon, B. J. Holt, C. R. Lippincott // Geophysical Research Letters. – 2009. – V. 36, L00C03. doi: 10.1029/2009GL038652
8. Apponte N. Measurements of the O^+ to H^+ transition height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008–2009 extreme solar minimum / N. Apponte, C. G. M. Brum, M. P. Sulzer, S. A. Gonzalez // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2013. – V. 36, № 7. – P. 4465 – 4470. doi: 10.1002/jgra.50416
9. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Радіофізика та іоносфера. – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37.
10. Котов Д. В. Сезонные вариации относительной концентрации ионов водорода над Украиной по данным метода некогерентного рассеяния и их сопоставление с данными модели IRI-2012. 2. Максимум солнечной активности / Д. В. Котов // Радиофізика і астрономія. – 2013. – Т. 18, № 1. – С. 43–48.
11. Акасофу С. И. Солнечно-земная физика. Ч. 1 / С. И. Акасофу, С. Чепмен. – М.: Мир, 1974. – 384 с.
12. Truhlik V. Manifestation of solar activity in the global topside ion composition – a study based on satellite data / V. Truhlik, L. Triskova, J. Smilauer // Annales Geophysicae. – 2005. – V. 23, № 7. – P. 2511 – 2517. doi: 10.5194/angeo-23-2511-2005
13. Котов Д. В. Сезонные вариации относительной концентрации ионов водорода над Украиной по данным метода некогерентного рассеяния и их сопоставление с данными модели IRI-2012. 1. Минимум солнечной активности / И. Ф. Домнин, Д. В. Котов, Л. Ф. Черногор // Радиофізика і астрономія. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 233–239.

References (transliterated)

1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar. Proc. IEEE. 1969, vol. 57, no. 4, pp. 496–530. doi: 10.1109/PROC.1969.7005
2. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. Fizika ionosfery [Physics of the ionosphere]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 528 p.
3. Krinberg I. A., Tashhilin A. V. Ionosfera i plazmosfera [Ionosphere and plasmasphere]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 356 p.
4. Bauer S. J. Hydrogen and helium ions – Theoretical considerations and observations obtained by ion mass spectrometry on spacecraft, ground-based backscatter, and VLF observations on satellite. IAGA Aeronomy Symposium (August 16 – 20, 1965, Cambridge, Massachusetts). United States, NASA Goddard Space Flight Center Publ., 1965.
5. King J. W., Kohl H. Upper atmospheric winds and ionospheric drifts caused by neutral air pressure gradients. Nature, 1965, vol. 206, issue 4985, pp. 699 – 701. doi: 10.1038/206699a0
6. Schunk R., Nagy A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. New York, University Press, 2009. 628 p.
7. Heelis R. A., Coley W. R., Burrell A. G., Hairston M. R., Earle G. D., Perdue M. D., Power R. A., Harmon L. L., Holt B. J., Lippincott C. R. Behavior of the O^+/H^+ transition height during the extreme solar minimum of 2008. Geophysical Research Letters, 2009, vol. 36, L00C03. doi: 10.1029/2009GL038652
8. Apponte N., Brum C. G. M., Sulzer M. P., Gonzalez S. A. Measurements of the O^+ to H^+ transition height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008–2009 extreme solar minimum. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2013, vol. 36, no. 7, pp. 4465 – 4470. doi: 10.1002/jgra.50416
9. Bogomaz A. V., Kotov D. V. Paket programm novogo pokolenija dlja obrabotki dannyh radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of incoherent Scatter Experiments (UPRISE) [New generation program for data processing Incoherent Scatter Radar (UPRISE)]. Visnyk NTU «KhPI». Ser.: Radiofizyka ta

- ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2013, no. 28, pp. 29–37.
10. Kotov D. V. Sezonnnye variacii odnositel'noj koncentracii ionov vodoroda nad Ukrainoj po dannym metoda nekogerentnogo rassejanija i ih sopostavlenie s dannymi modeli IRI-2012. 2. Maksimum solnechnoj aktivnosti [Seasonal variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere over Ukraine according to the method of incoherent scattering and their comparison with estimates of model IRI-2012. 1. Maximum of solar activity]. *Radiofizika i astronomija*. 2013, vol. 18, no.1, pp. 43–48.
 11. Akasofu S. I. *Solnechno-zemnaia fizika*. Ch.1 [Solar-terrestrial physics]. Moscow, Mir Publ., 1974. 384 p.
 12. Truhlik V., Triskova L., Smilauer J. Manifestation of solar activity in the global topside ion composition – a study based on satellite data. *Annales Geophysicae*, 2005, vol. 23, no. 7, pp. 2511 – 2517. doi: 10.5194/angeo-23-2511-2005
 13. Kotov D. V. Sezonnnye variacii odnositel'noj koncentracii ionov vodoroda nad Ukrainoj po dannym metoda nekogerentnogo rassejanija i ih sopostavlenie s dannymi modeli IRI-2012. 1. Minimum solnechnoj aktivnosti [Seasonal variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere over Ukraine according to the method of incoherent scattering and their comparison with estimates of model IRI-2012. 1. Minimum of solar activity]. *Radiofizika i astronomija*. 2012, vol. 17, no. 3, pp. 233–239.

Поступила (received) 12.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Дослідження варіацій відносної концентрації іонів водню у зовнішній іоносфері в період максимуму сонячної активності за даними методу некогерентного розсіювання / М. О. Шульга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 58–62. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2078-9998.

Исследование вариаций относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере в период максимума солнечной активности по данным метода некогерентного рассеяния / М. А. Шульга // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 58–62. – Библиогр.: 13 назв. – ISSN 2078-9998.

Investigation variations of the relative concentration of hydrogen ions in the upper ionosphere during the period of maximum solar activity using incoherent scatter technique / М. О. Shulga // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – С. 58–62. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шульга Марина Олексіївна – інженер-електронік 1 категорії, Інститут іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Шульга Марина Алексеевна – инженер-электроник 1 категории, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

Shulga Maryna Oleksiivna – engineer-electronic 1-st category, Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 707-65-88; e-mail: marina.shulga23@gmail.com.

УДК 520.86:550.388

И. Ф. ДОМНИН, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, М. В. ЛЯШЕНКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР**РЕАКЦИЯ ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 20 МАРТА 2015 г. НАД ХАРЬКОВОМ**

Наведено результати експериментальних і модельних досліджень варіацій параметрів іоносферної плазми, динамічних і теплових процесів в іоносфері під час часткового (0.54) сонячного затемнення 20 березня 2015 р. над Харківом. Сонячне затемнення проходило на тлі фази відновлення сильної магнітної бурі, яка мала місце 17–18 березня 2015 р. ($K_{pmax}=8$). Для спостереження використовувалися радар некогерентного розсіяння та цифровий іонозонд. Виявлено реакцію іоносфери на затемнення в варіаціях висоти максимуму іонізації, концентрації та температури електронів, швидкості руху іоносферної плазми, параметрах динамічних і теплових процесів.

Ключові слова: сонячне затемнення, іоносфера, метод некогерентного розсіяння, варіації параметрів іоносфери, динамічні та теплові процеси.

Представлены результаты экспериментальных и модельных исследований вариаций параметров ионосферной плазмы, динамических и тепловых процессов в ионосфере во время частного (0.54) солнечного затмения 20 марта 2015 г. над Харьковом. Затмение протекало на фоне фазы восстановления сильной магнитной бури, которая имела место 17–18 марта. Использовались радар некогерентного рассеяния и цифровой ионозонд. Выявлено реакцию ионосферы на затмение в вариациях высоты максимума ионизации, концентрации и температуры электронов, скорости движения ионосферной плазмы, параметрах динамических и тепловых процессов.

Ключевые слова: солнечное затмение, ионосфера, метод некогерентного рассеяния, вариации параметров ионосферы, динамические и тепловые процессы.

The results of experimental and modeling studies of ionospheric plasma parameters variations, dynamic and thermal processes in the ionosphere during the partial solar eclipse on March 20, 2015 over Kharkiv are presented. The solar disk diameter maximum coverage was about 0.54. The solar eclipse proceeded against the background of the recovery phase of strong magnetic storm which took place on 17–18 March 2015 ($K_{pmax}=8$). The incoherent scatter radar and digital ionosonde were used for observation. We found that at the time of maximum Sun obscuration (10:15 UT), the F2-layer peak height increased by 40 km (from 240 to 280 km), a decrease in the electron density was approximately 18.5 and 16.5 % at altitudes of 190 and 210 km, respectively. The maximum decrease in electron temperature at the same time amounted to 19.5 % at altitude of 340 km. Velocity of the downward plasma movement V_z increased by 0–60 m/s with height increase within the altitude range of 310–650 km. The altitude profiles of V_z velocity near the main phase of the solar eclipse became similar to the nighttime ones. The ionosphere response on the solar eclipse was also revealed in variations of the dynamic and thermal processes.

Key words: solar eclipse, ionosphere, incoherent scatter method, variations of ionospheric parameters, dynamic and thermal processes.

Введение. Солнечное затмение (СЗ) представляет исследователю уникальную возможность проследить за динамикой системы Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера на интервале времени в несколько часов [1]. Возмущения в этой системе, вызванные различными СЗ, существенно отличаются. Параметры этих возмущений зависят от времени наступления СЗ, состояния космической погоды, сезона и положения в цикле солнечной активности, географических координат и величины покрытия диска Солнца [1].

Самым распространенным методом наблюдения СЗ сначала был метод вертикального зондирования, использующий ионосферные станции (ионозонды) (см., например, [2–4]). Арсенал используемых методов значительно расширился в 1960-х гг. Стали широко использоваться спутниковые и ракетные методы (см., например, [5–9]), метод некогерентного рассеяния (НР) (см., например, [10, 11]), метод доплеровского зондирования (см., например, [12–16]), а также целый ряд других методов (см., например, [8, 17–20]).

Начиная с 1999 г. регулярные исследования ионосферных эффектов в ионосфере во время СЗ проводились с помощью радара НР Института ионосферы, расположенного вблизи г. Харькова (см., например, [21–31]).

Наблюдения показали, что СЗ сопровождаются рядом устойчивых эффектов в ионосфере: уменьшением концентрации N_e и температуры T_e электронов, увеличением действующей высоты отражения, запаздыванием уменьшений N_e по отношению к моменту наступления максимальной

фазы затмения, значительными вариациями вертикальной скорости движения плазмы, потоков плазмы и тепла, а также генерацией квазипериодических (волновых) возмущений в ионосфере. В то же время следует иметь в виду, что каждому затмению присущи свои, индивидуальные, особенности. Спецификой СЗ 20 марта было то, что оно имело место на фоне релаксирующей геокосмической бури, начавшейся 17 марта 2015 г.

Цель настоящей работы – анализ результатов наблюдений возмущений в ионосфере сопровождавших СЗ 20 марта 2015 г. над Харьковом.

Средства радиозондирования. Радар некогерентного рассеяния. Радар НР Института ионосферы [32] расположен вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.). Радар предназначен для исследования ионосферы в диапазоне высот 100–1500 км. Рабочая частота около 158 МГц. В качестве приемно-передающей антенны используется одна из наиболее крупных в мире двухзеркальная параболическая антенна зенитного излучения диаметром 100 м, выполненная по схеме Кассегрена. Эффективная площадь антенны – около 3700 м². Поляризация излучаемого и принимаемого сигнала – круговая. Импульсная мощность передатчика до 3.6 МВт. В описываемых измерениях она составляла около 2 МВт. Работа радара НР проводилась в режиме составного двухчастотного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс)

© И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор, 2016

радиоимпульсами, обеспечивающими высотное разрешение 20 и 100 км в диапазонах высот 100–550 км и 200–1000 км соответственно. Частота повторения 24.4 Гц. Параметры ионосферы определяются одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции НР сигнала [27, 31].

Цифровой ионозонд. Совместно с радаром НР использовался цифровой ионозонд, расположенный в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Его основные параметры: диапазон частот 1–16 МГц, импульсная мощность до 1.5 кВт, длительность зондирующих радиоимпульсов 100 мкс, частота следования 125 Гц.

Погрешности определения параметров ионосферы: критической частоты f_oF2 – 0.05 МГц, концентрации электронов N_e и температур ионов T_i и электронов T_e – 1–10 %, скорости движения плазмы V_z – 1–30 м/с для высот 200–600 км в зависимости от высоты, времени суток и состояния ионосферы.

Состояние космической погоды. СЗ началось в 09:09 UT, закончилось в 11:21 UT. Максимальное покрытие диска Солнца по площади составило 44%, по диаметру – 54%. СЗ протекало на фоне фазы восстановления сильной магнитной бури, которая имела место 17–18 марта 2015 г. (Максимальное значение индекса геомагнитной активности $K_{pmax}=8$). Геофизическая обстановка в день затмения была возмущенной (D_{st} индекс достигал значений –50 нТл, $K_p=5$, $A_p=24$). Индекс солнечной активности $F10.7=113$.

Влияние бури не позволило использовать данные наблюдения 19 марта для сравнения с вариациями в день СЗ. В качестве контрольных суток были выбраны даты 20 марта 2013 г. и 29 марта 2012 г. Индексы солнечной ($F_{10.7}$) и геомагнитной (A_p и k_p) активности в рассматриваемые дни приведены в таблице 1.

Из таблицы видно, что контрольные сутки характеризовались спокойной геомагнитной обстановкой, в отличие от 19–21 марта 2015 г.

Солнечная активность в рассматриваемые периоды измерений была умеренной.

Таблица 1 – Индексы солнечной и геомагнитной активности

Дата	$F_{10.7}$	A_p	k_p
29.03.2012	112	3	10001112
20.03.2013	108	9	22212233
19.03.2015	109	28	44455334
20.03.2015	113	24	53533335
21.03.2015	114	14	43432222

Результаты наблюдений. Несмотря на возмущенное состояние геокосмической плазмы, эффекты СЗ были заметны в вариациях параметров ионосферы.

Вариации критической частоты и высоты максимума ионизации. Вариации критической частоты f_oF2 и высоты максимума слоя F2 ионосферы h_mF2 приведены на рис. 1.

В момент максимального покрытия Солнца (10:15 UT) высота максимума h_mF2 увеличилась примерно на 40 км (от 240 до 280 км (рис. 1, б)).

В вариациях критической частоты (рис. 1, а) и, соответственно, концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы эффекты СЗ заметно маскировались ионосферной бурей. Скорее всего, изменения критической частоты были малозначительными (не более 12%).

Вариации концентрации электронов. На высотах 190 и 210 км уменьшение концентрации электронов N_e в максимальную фазу затмения составляло примерно 18.5 и 16.5% соответственно (рис. 2, а). На высотах 240 км и выше реакции N_e на СЗ не наблюдалось.

Вариации температур электронов и ионов. Уменьшение температуры электронов T_e во время максимального покрытия Солнца составило 12.1, 12, 17.7, 17, 19.5, 19, 15.5 и 13.4% на высотах 190, 210, 240, 290, 340, 410, 490 и 580 км соответственно (рис. 2, б). В вариациях температуры ионов T_i эффекты СЗ проявились слабо (рис. 2, в).

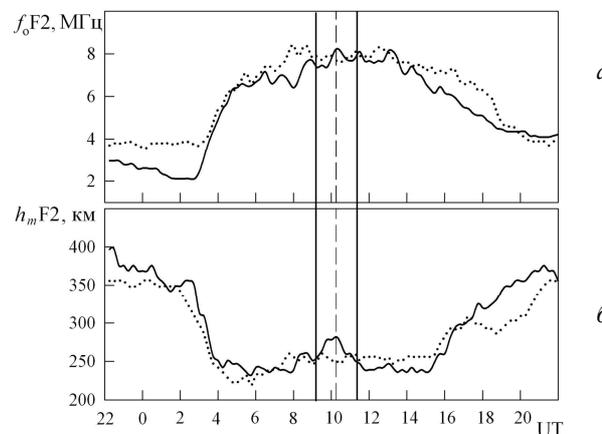


Рис. 1 – Временные вариации: а – критической частоты, б – высоты максимума слоя F2 в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошные линии) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки). Здесь и далее вертикальными линиями обозначены моменты начала, максимальной фазы и окончания СЗ.

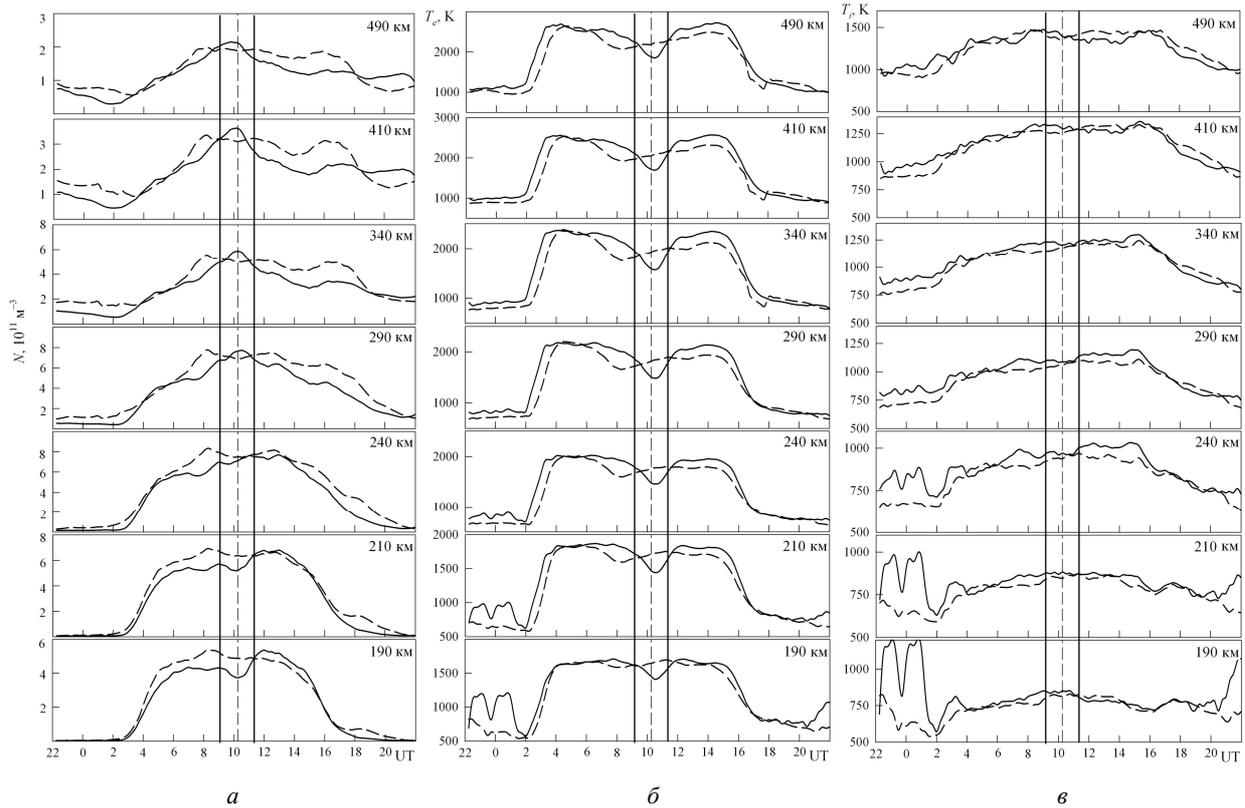


Рис. 2 – Высотно-временные вариации: *а* – концентрации электронов, *б* – температуры электронов, *в* – температуры ионов в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошные линии) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (штриховые линии)

Рис. 3, *а* показывает постепенное увеличение модуля скорости по мере закрытия диска Солнца. Скорость нисходящего движения плазмы изменилась с высотой на 0–60 м/с в высотном диапазоне 310–650 км. Вблизи главной фазы СЗ высотные профили V_z стали похожи на ночные. По мере открытия диска

Солнца значения модуля скорости уменьшались (рис. 3, *б*). При этом характер профиля $V_z(h)$ в 11:45 стал идентичным характеру $V_z(h)$ до начала СЗ в 9:00. Следует отметить, что высотные вариации до и после СЗ были типичными для дневной ионосферы.

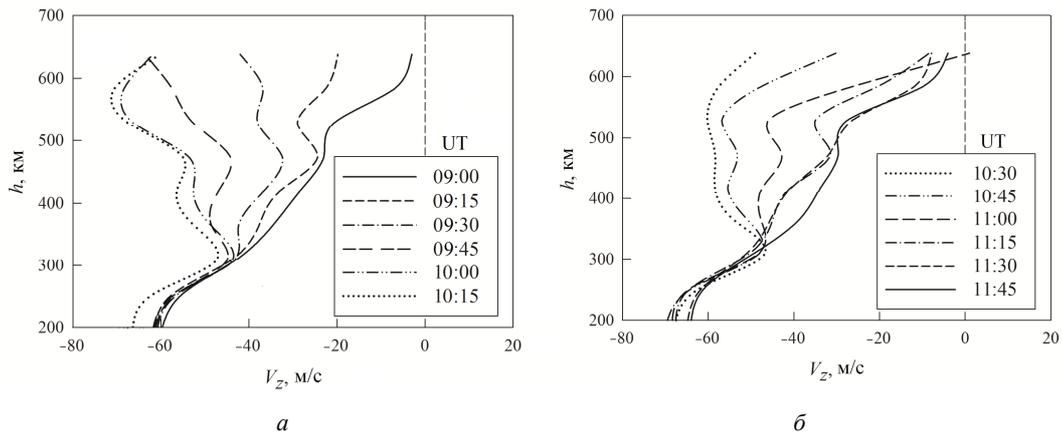


Рис. 3 – Высотные зависимости вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы до, во время и после солнечного затмения

Рис. 4, где представлены высотно-временные вариации V_z в день СЗ и контрольные дни, показывает хорошее согласие в вариациях V_z 20 марта 2015 г. с данными контрольных суток 20 марта 2013 г. и 29 марта 2012 г. в периоды непосредственно до СЗ

(07:00–09:09) и после СЗ (11:21–13:00 UT). Особенно это легко увидеть из вариаций V_z на высотах 300–600 км, где отличия значений скорости плазмы находились в пределах статистического разброса.

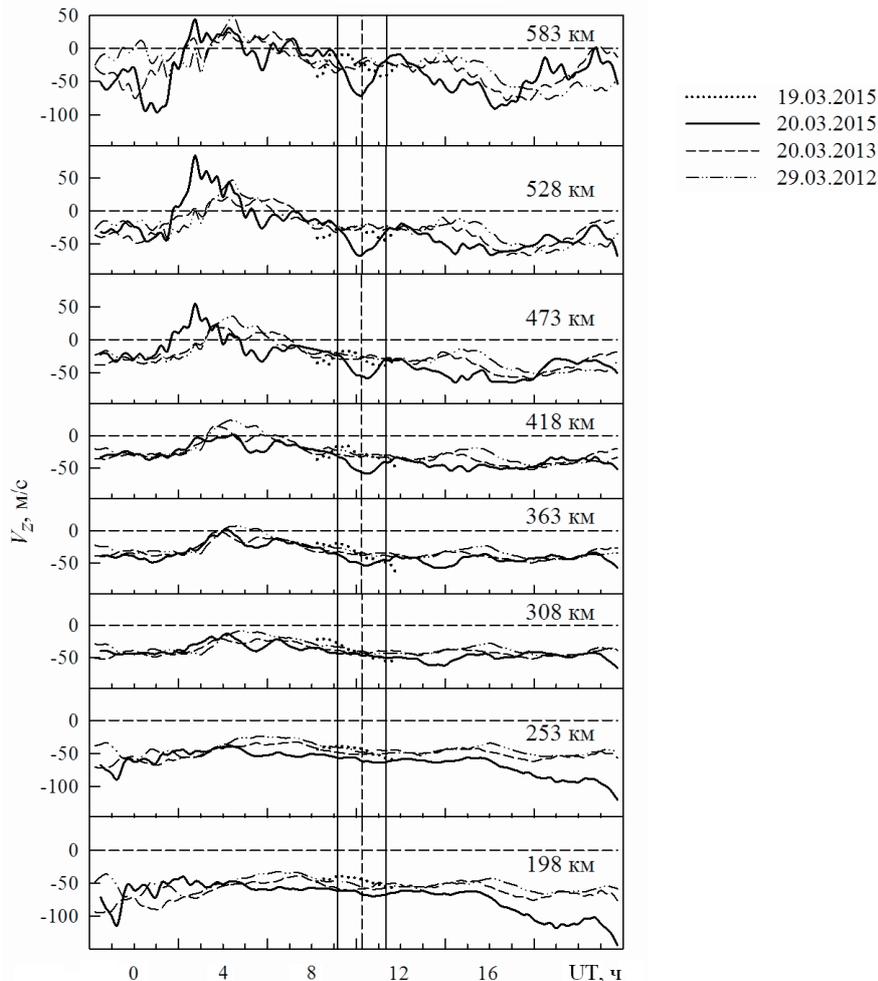


Рис. 4 – Высотно-временные вариации вертикальной составляющей скорости движения ионосферной плазмы V_z в день С3 20 марта 2015 г. и контрольные дни 29 марта 2012 г., 20 марта 2013 г. и 19 марта 2015 г.

Во время С3 наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего ($V_z < 0$) движения ионосферной плазмы на высотах, больших 308 км. Наибольшее изменение V_z пришлось на момент вблизи максимальной фазы С3. Затем началось восстановление первоначальных значений V_z . После окончания С3 величина V_z близка к первоначальной на всех высотах. Величина изменения V_z увеличивалась с ростом высоты, а наибольшие изменения (относительно данных контрольных суток и среднего значения накануне и после С3) составили 19, 28, 30, 43, 55 м/с на высотах 363, 418, 473, 528, 583 км соответственно. Следует отметить, что временные вариации V_z симметричны относительно момента максимальной фазы С3.

Аналогичная реакция скорости V_z на воздействие С3 была в предшествующих наблюдениях параметров ионосферы с помощью харьковского НР радара в 1999–2011 [21–22, 25–26, 28–29]. Некоторые отличия объясняются различием гелиогеокосмической обстановки. Индекс солнечной активности $F_{10.7}$ в дни С3 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. был равен 131, 113, 82, 66, 91 соответственно. Затмения в 1999, 2006,

2008, 2011 произошли в дневное время в спокойных условиях (индекс $A_p=8, 6, 3, 4$ соответственно), тогда как С3 в 2003 г. произошло после восхода Солнца во время фазы восстановления геомагнитной бури ($A_p=17$). В отличие от С3 20 марта 2015 г., временные вариации скорости V_z во время С3 4 января 2011 г. имели слабую асимметрию по отношению к моменту главной фазы С3. Это объясняется тем, что С3 происходило на фоне утреннего восхода Солнца [28].

Результаты моделирования. Моделирование процессов в ионосфере в день С3 и контрольный день осуществлялось с помощью известных выражений, приведенных в [23].

Вариации параметров динамических процессов в ионосфере. Изменения вертикальной составляющей скорости плазмы, вызванной диффузией, V_d были незначительными (рис. 5, а) и качественно подобными изменениям V_z . Вариации меридиональной составляющей скорости нейтрального (термосферного) ветра V_{nx} и эквивалентного нейтрального ветра w в течение С3 и после него достигали 10–30 м/с (рис. 5, б). Эффекты С3 в вариациях меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра и эквивалентного нейтрального ветра на высотах

$z < 350$ км практично не наблюдались. В діапазоні висот 400–600 км имело место незначительное

усиление нейтрального ветра, направленного от экватора к полюсу.

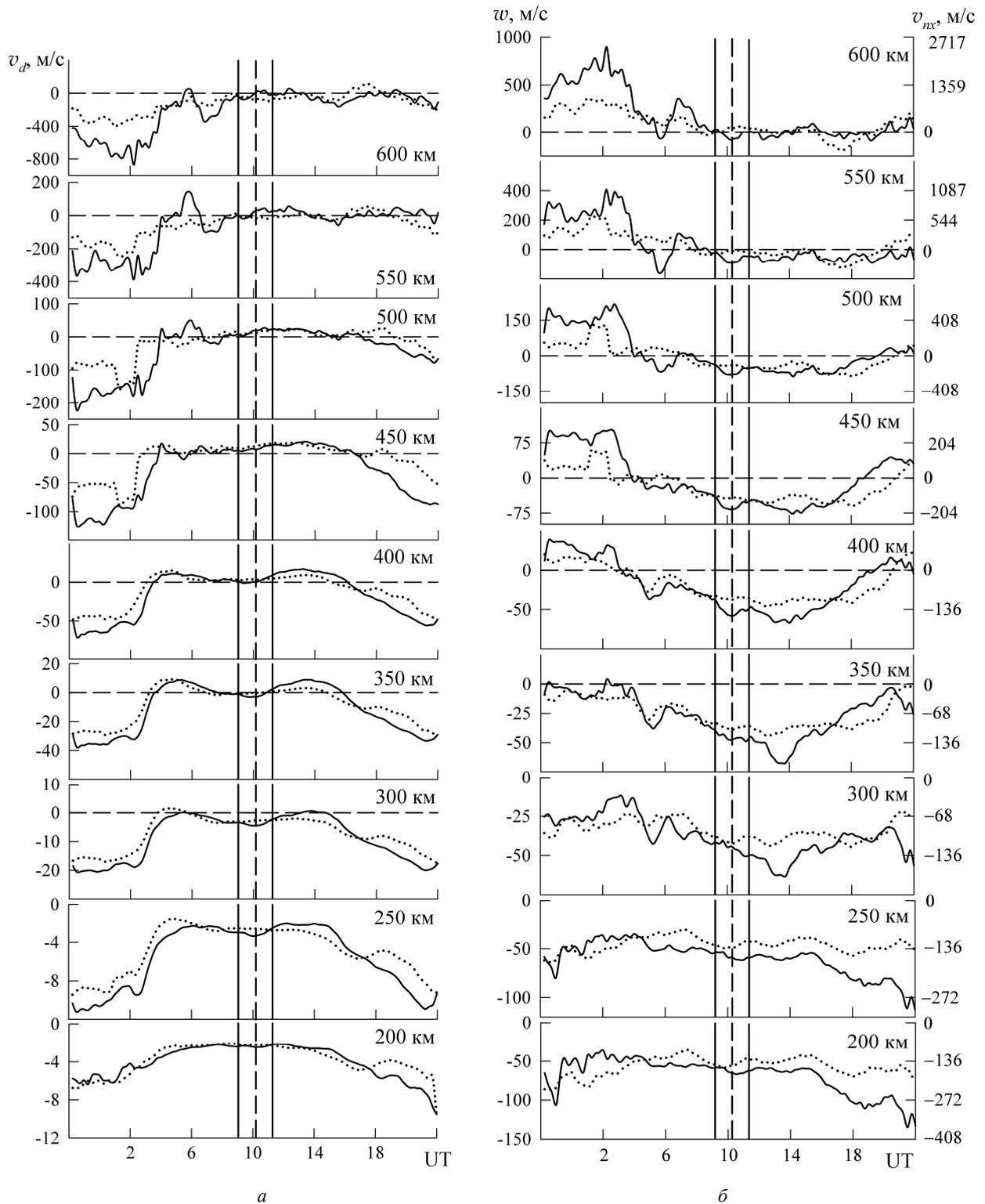


Рис. 5 – Вариации параметров динамических процессов в ионосфере: *а* – скорости переноса плазмы за счет амбиполярной диффузии, *б* – скорости эквивалентного нейтрального ветра и меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки)

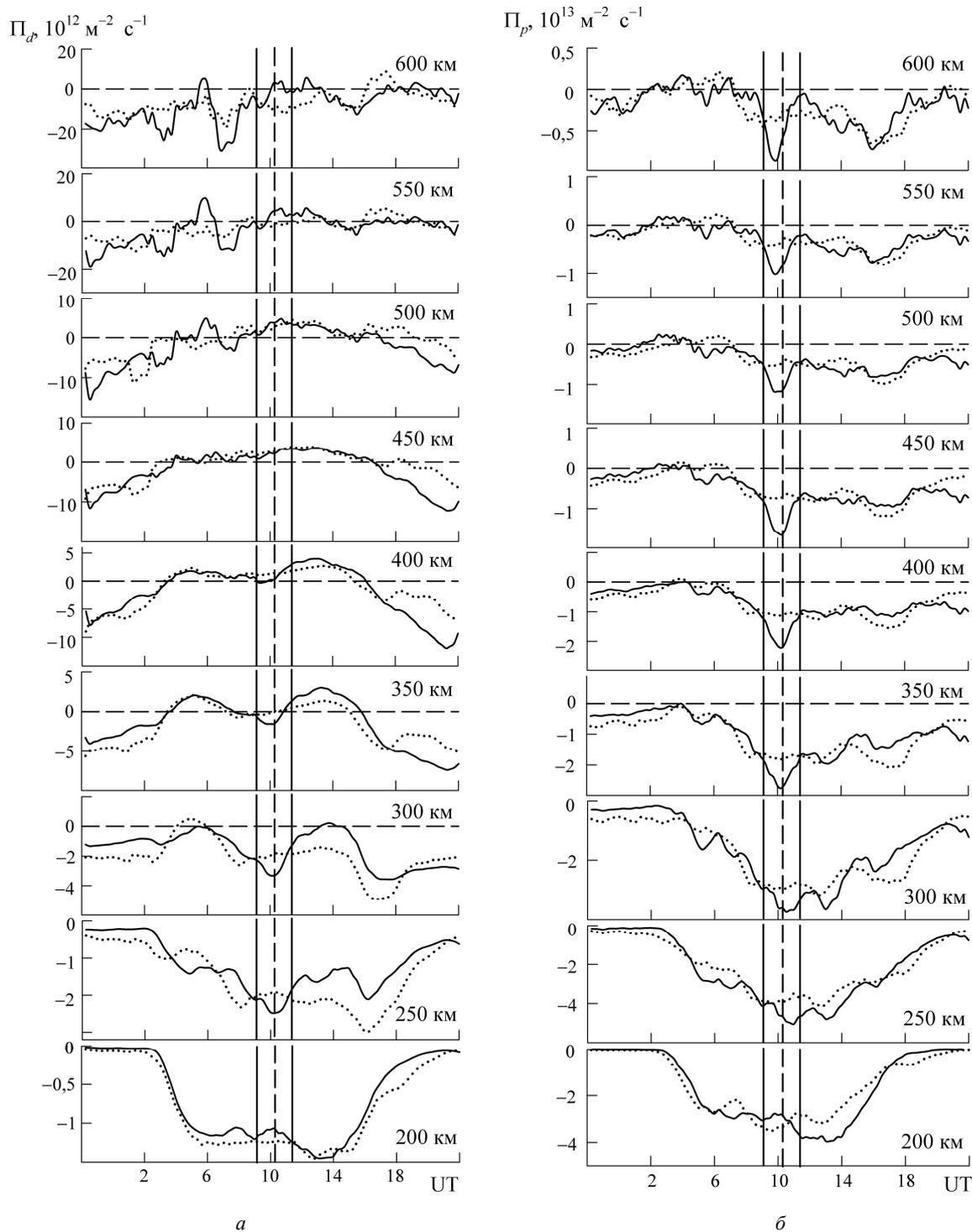


Рис. 6 – Временные вариации: *a* – плотности потока плазмы, вызванного диффузией, *б* – плотности общего потока плазмы в день С3 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки).

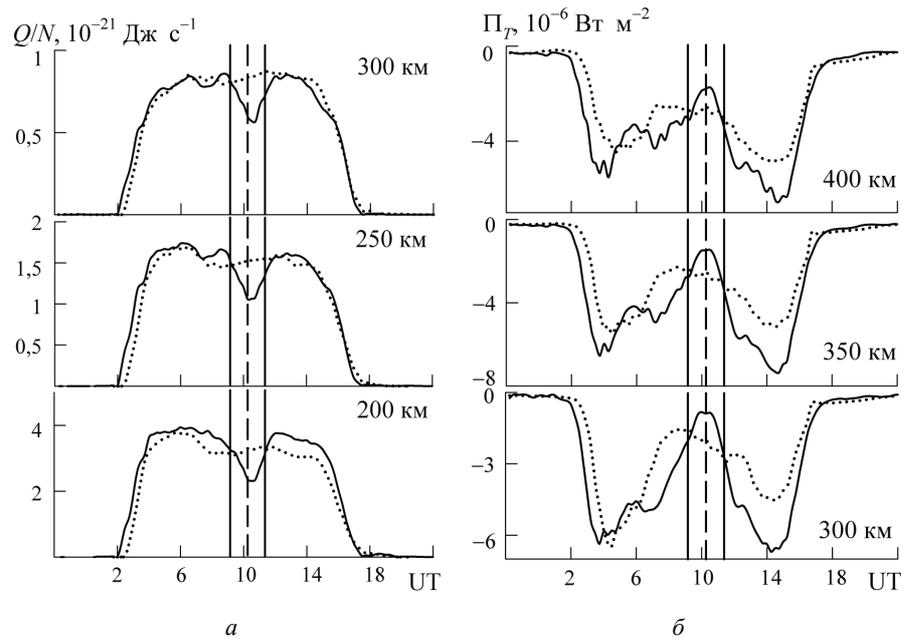


Рис. 7 – Временные вариации: *а* – величины энергии, подводимой к электронам, *б* – плотности потока тепла, переносимого электронами, в день СЗ 20 марта 2015 г. (сплошная линия) и контрольные сутки 20 марта 2013 г. (точки)

Изменение плотности диффузионного потока плазмы P_d (рис. 6, *а*) составило примерно $0.4 \cdot 10^{12}$, $1.2 \cdot 10^{12}$, $1.1 \cdot 10^{12}$ и $0.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно. Плотность полного потока плазмы P_p изменилась на $0.85 \cdot 10^{13}$, $0.77 \cdot 10^{13}$, $1.16 \cdot 10^{13}$, $1.17 \cdot 10^{13}$, $0.94 \cdot 10^{13}$, $0.77 \cdot 10^{13}$, $0.91 \cdot 10^{13}$ и $0.82 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на высотах 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 км соответственно (рис. 6, *б*).

Вариации параметров тепловых процессов в ионосфере. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронам, в момент максимального покрытия диска Солнца составило 32–34 % на высотах 200–300 км (рис. 7, *а*).

Уменьшение плотности потока тепла, переносимого электронами, при этом достигло 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно (рис. 7, *б*).

Выводы.

1. Особенностью СЗ 20 марта 2015 г. было то, что оно наблюдалось на фоне релаксирующей геокосмической бури. Тем не менее, эффекты СЗ были заметны в вариациях параметров ионосферы.

2. Обнаружено, что в момент максимального покрытия Солнца высота максимума слоя F2 ионосферы увеличилась примерно на 40 км.

3. В вариациях критической частоты и концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы эффекты СЗ заметно маскировались ионосферной бурей. Изменения критической частоты были малосущественными (не более 12 %).

4. Эффекты СЗ были наиболее заметны в диапазоне высот 190–210 км. На высотах 190 и 210 км уменьшение концентрации электронов в максимальную фазу затмения составило примерно 19 и 17 % соответственно.

5. Уменьшение температуры электронов во время максимального покрытия диска Солнца составило

12.1, 12, 17.7, 17, 19.5, 19, 15.5 и 13.4 % на высотах 190, 210, 240, 290, 340, 410, 490 и 580 км соответственно.

6. В вариациях температуры ионов эффекты СЗ проявились слабо.

7. Как показали результаты экспериментальных исследований и теоретических расчетов, СЗ привело к существенному изменению динамического и теплового режимов в ионосфере.

8. Во время СЗ на высотах, больших 308 км, наблюдалось увеличение абсолютных значений скорости нисходящего движения ионосферной плазмы с максимумом вблизи момента максимальной фазы СЗ и последующим их восстановлением. Величина изменения скорости увеличивалась с ростом высоты, а наибольшее значение изменения (относительно данных контрольных суток и среднего значения V_z накануне и после СЗ) составило 19–55 м/с в диапазоне высот 363–583 км.

9. Характер высотного профиля $V_z(h)$ во время максимальной фазы СЗ близок к характеру ночного профиля.

10. Изменение величины плотности потока, обусловленного диффузией плазмы, составило $0.4 \cdot 10^{12}$, $1.2 \cdot 10^{12}$, $1.1 \cdot 10^{12}$ и $0.8 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на высотах 250, 300, 350 и 400 км соответственно, тогда как плотность полного потока плазмы изменилась примерно на $0.85 \cdot 10^{13}$, $0.77 \cdot 10^{13}$, $1.16 \cdot 10^{13}$, $1.17 \cdot 10^{13}$, $0.94 \cdot 10^{13}$, $0.77 \cdot 10^{13}$, $0.91 \cdot 10^{13}$ и $0.82 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ на высотах 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550 и 600 км соответственно.

11. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронам, в момент максимального покрытия диска Солнца составило около 30 % на высотах 200–300 км. Уменьшение плотности потока тепла, переносимого электронами, при этом достигло 63, 50 и 42 % на высотах 300, 350 и 400 км соответственно.

Список літератури

1. Черногор Л. Ф. Физические эффекты солнечных затмений в атмосфере и геокосмосе: Монография. / Л. Ф. Черногор, – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2013. – 480 с.
2. Борисов Б. Б. Комплексное экспериментальное исследование реакции ионосферы на солнечное затмение 9 марта 1997 г. / Б. Б. Борисов, Д. А. Егоров, Н. Е. Егоров [и др.] // Геомагнетизм и аэронавтика. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 94–103.
3. Farges T. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network / T. Farges, J. C. Jodogne, R. Bamford [et al.] // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2001. – V. 63. – P. 915–924.
4. Le H. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling / H. Le, L. Liu, X. Yue, W. Wan // Annales Geophysicae. – 2008. – V. 18. P. 107–116.
5. Klobuchar J. A. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse / J. A. Klobuchar, H. E. Whitney // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70, No. 5. – P. 1254–1257.
6. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations / E. A. Cohen // Radio Sci. – 1984. – V. 19, No. 3. – P. 769–777.
7. Afraimovich E. L. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced from GPS data / E. L. Afraimovich, K. S. Palamartchouk, N. P. Perevalova [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25, No. 4. – P. 465–468.
8. Huang C. R. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse / C. R. Huang, C. H. Liu, K. C. Yeh [et al.] // J. Geophys. Res. – 1999. – V. 104(A1). – P. 79–94.
9. Hunter A. N. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973 / A. N. Hunter, B. K. Holman, D. G. Fieldgate [et al.] // Nature. – 1974. – V. 250. – P. 205–206.
10. Evans J. V. An F Region Eclipse / J. V. Evans // J. Geophys. Res. – 1965. – V. 70. – P. 131–142.
11. Oliver W. L. The F1 region during a solar eclipse / W. L. Oliver, S. A. Bowhill // Radio. Sci. – 1974. – V. 9, No. 2. – P. 185–195.
12. Jakowski N. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005 / N. Jakowski, S. M. Stankov, V. Wilken [et al.] // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. – 2008. – V. 70, No. 6. – P. 836–853.
13. Chen G. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009 / G. Chen, Z. Zhao, G. Yang [et al.] // J. Geophys. Res. – 2010. – V. 115. – P. A09325. DOI:10.1029/2010JA015530.
14. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008 / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – V. 50, No. 3. – P. 346–361.
15. Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2012. – V. 52, No. 6. – P. 768–778, P. 779–792.
16. Chernogor L. F. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 1. – P. 19–31.
17. Farges T. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network / T. Farges, J. C. Jodogne, R. Bamford [et al.] // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. – 2001. – V. 63. – P. 915–924.
18. Tomas A. T. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP / A. T. Tomas, H. Luhr, M. Forster [et al.] // J. Geophys. Res. – 2007. – V. 112. – P. A06303. DOI:10.1029/2006JA012168.
19. Урядов В. П. О вариациях характеристик КВ сигнала на трассе наклонного зондирования во время солнечного затмения 11 августа 1999 г. / В. П. Урядов, А. М. Леонов, А. А. Понатов [и др.] // Изв. вузов. Радиофизика. – 2000. – Т. 43, № 8. С. 682–686.
20. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse / L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2010. – V. 50, No. 1. – P. 100–110.
21. Taran V. I. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar / V. I. Taran, V. K. Bogovsky, V. N. Lysenko, Ye. I. Grigorenko, L. Ya. Emelyanov // Космічна наука і технологія, Space Plasma physics (додаток до журналу). – 2001. – Т. 7, № 2. – С. 36–41.
22. Yemelyanov L. Ya. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination / L. Ya. Yemelyanov, D. A. Dzyubanov // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – V. 66, No. 14. – P. 1313–1327.
23. Бурмака В. П. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. / В. П. Бурмака, Е. И. Григоренко, Л. Я. Емельянов, В. Н. Лысенко, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2007. – № 3. – С. 38–53.
24. Grigorenko E. I. Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere / E. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2008. – V. 48, No. 3. – P. 337–351.
25. Дзюбанов Д. А. Динамика плазмы ионосферы над Харьковом в период солнечного затмения 1 августа 2008 г. / Д. А. Дзюбанов, Л. Я. Емельянов, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 62–69.
26. Емельянов Л. Я. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений / Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70–81.
27. Chernogor L. F. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv / L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32, No. 11. – P. 3219–3229.
28. Domnin I. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse / I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, L. F. Chernogor // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. – V. 3, No. 4. – P. 311–324.
29. Domnin I. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations / I. F. Domnin, L. Ya. Yemelyanov, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 1. – P. 113–123.
30. Lyashenko M. V. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion / M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2013. – V. 53, No. 3. – P. 367–376.
31. Domnin I. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkov: Observation and simulation results / I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Geomagnetism and Aeronomy. – 2014. – V. 54, No. 5. – P. 583–592.
32. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No. 47 (1089). – P. 28–42.

References (transliterated)

1. Chernogor L. F. *Fizicheskie jeffekty solnechnyh zatmenij v atmosfere i geokosmose: Monografija*. [Physical effects of solar eclipses in the atmosphere and Geospace: Monograph]. Kharkiv, KhNU im. V.N. Karazina, 2013. 480 p.
2. Borisov B. B., Egorov D. A., Egorov N. E. et al. *Kompleksnoe eksperimental'noe issledovanie reakcii ionosfery na solnechnoe zatmenije 9 marta 1997 g.* [Complex experimental study of ionospheric response to solar eclipse of March 9, 1997]. *Geomagnetizm i ajeronomija* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2000, vol. 40, no. 3, pp. 94–103.
3. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R. et al. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 915–924.
4. Le H., Liu L., Yue X., Wan W. The ionospheric responses to the 11 August 1999 solar eclipse: observations and modeling. *Annales Geophysicae*. 2008, vol. 18, pp. 107–116.
5. Klobuchar J. A., Whitney H. E. Ionospheric electron content measurements during a solar Eclipse. *J. Geophys. Res.* 1965, vol. 70, no. 5, pp. 1254–1257.
6. Cohen E. A. The study of the effect of solar eclipses on the ionosphere based on satellite beacon observations. *Radio Sci.* 1984, vol. 19, no. 3, pp. 769–777.
7. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. et al. Ionospheric effects of the solar eclipse of March 9, 1997, as deduced

- from GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1998, vol. 25, no. 4, pp. 465–468.
8. Huang C. R., Liu C. H., Yeh K. C. et al. A study of tomographically reconstructed ionospheric images during a solar eclipse. *J. Geophys. Res.* 1999, vol. 104(A1), pp. 79–94.
 9. Hunter A. N., Holman B. K., Fieldgate D. G. et al. Faraday rotation studies in Africa during the solar eclipse of June 30, 1973. *Nature.* 1974, vol. 250, pp. 205–206.
 10. Evans J. V. An F Region Eclipse / J. V. Evans // *J. Geophys. Res.* – 1965. – V. 70. – P. 131–142.
 11. Oliver W. L., Bowhill S. A. The F1 region during a solar eclipse. *Radio. Sci.* 1974, vol. 9, no. 2, pp. 185–195.
 12. Jakowski N., Stankov S. M., Wilken V. et al. Ionospheric behavior over Europe during the solar eclipse of 3 October 2005. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 6, pp. 836–853.
 13. Chen, G. Zhao Z., Yang G. et al. Enhancement and HF Doppler observations of sporadic E during the solar eclipse of 22 July 2009. *J. Geophys. Res.* 2010, vol. 115, pp. A09325. DOI:10.1029/2010JA015530.
 14. Chernogor L. F. Wave Response of the Ionosphere to the Partial Solar Eclipse of August 1, 2008. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 3, pp. 346–361.
 15. Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipses in the Ionosphere: Doppler Sounding Results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2012, vol. 52, no. 6, pp. 768–778.
 16. Chernogor L. F. Physical Processes in the Middle Ionosphere Accompanying the Solar Eclipse of January 4, 2011, in Kharkov. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 19–31.
 17. Farges T., Jodogne J. C., Bamford R. et al. Disturbances of the western European ionosphere during the total solar eclipse of 11 August 1999 measured by a wide ionosonde and radar network. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2001, vol. 63, pp. 915–924.
 18. Tomas A. T., Luhr H., Forster M. et al. Observations of the low-latitude solar eclipse on 8 April 2005 by CHAMP. *J. Geophys. Res.* 2007, vol. 112, p. A06303. DOI:10.1029/2006JA012168.
 19. Urjadov V. P., Leonov A. M., Ponjatov A. A. i dr. O variacijah karakteristik KV signala na trasse naklonnogo zondirovanija vo vremja solnechnogo zatmenija 11 avgusta 1999 g. [On variations of the characteristics of the HF signal on a line oblique sounding during a solar eclipse August 11, 1999]. *Izv. vuzov. Radiofizika.* [Proceedings of Higher Education. Radiophysics]. 2000, vol. 43, no. 8, pp. 682–686.
 20. Chernogor L. F. Variations in the Amplitude and Phase of VLF Radiowaves in the Ionosphere during the August 1, 2008, Solar Eclipse. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2010, vol. 50, no. 1, pp. 100–110.
 21. Taran V. I., Bogovsky V. K., Lysenko V. N., Grigorenko Ye. I., Emelyanov L. Ya. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar. *Kosmichna nauka i tehnologija.* [Space Plasma physics]. 2001, vol. 7, no. 2, pp. 36–41.
 22. Yemelyanov L. Ya., Dzyubanov D. A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination. *Telecommunications Radio Engineering.* 2007, vol. 66, no. 14, pp. 1313–1327.
 23. Burmaka V. P., Grigorenko E. I., Emel'janov L. Ja., Lysenko V. N., Ljashenko M. V., Chernogor L. F. Radarnye nabljudenija jeffektov v geokosmose, vyzvannyh chastnym solnechnym zatmeniem 29 marta 2006 g. [Radar observations Geospace effects caused by the partial solar eclipse of March 29, 2006]. *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* [Advances of Modern Radioelectronics]. 2007, no. 3, pp. 38–53.
 24. Grigorenko E. I., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Effects of Solar Eclipse of March 29, 2006, in the Ionosphere and Atmosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008, vol. 48, no. 3, pp. 337–351.
 25. Dzyubanov D. A., Emel'janov L. Ja., Chernogor L. F. Dinamika plazmy ionosfery nad Har'kovom v period solnechnogo zatmenija 1 avgusta 2008 g. [The dynamics of the ionospheric plasma over Kharkov during the solar eclipse on August 1, 2008]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 62–69.
 26. Emel'janov L. Ja., Ljashenko M. V., Chernogor L. F. Jeffekty v geokosmicheskoj plazme vo vremja chastnogo zatmenija Solnca 1 avgusta 2008 g. nad Har'kovom. 1. Rezul'taty nabljudenij [Effects in geospatial plasma during a partial solar eclipse August 1 2008 on Kharkov. 1. Observation results]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2009, vol. 15, no. 3, pp. 70–81.
 27. Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V. Effects in geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing.* 2011, vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229.
 28. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse. *Radio Physics and Radio Astronomy.* 2012, vol. 3, no. 4, pp. 311–324.
 29. Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar Eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of Incoherent Scatter Observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 113–123.
 30. Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Solar eclipse of August 1, 2008, over Kharkov: 3. Calculation Results and discussion. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 3, pp. 367–376.
 31. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F. Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: Observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 5, pp. 583–592.
 32. Domnin I. F., Chepurny Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Politechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere.* Kharkiv, NTU "KhPI", 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.

Поступила (received) 14.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Реакція іоносфери на сонячне затемнення 20 березня 2015 р над Харковом / І. Ф. Домнін, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 63–72. – Бібліогр.: 32 назв. – ISSN 2078-9998.

Реакция ионосферы на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом / И. Ф. Домнин, Л. Я. Емельянов, М. В. Ляшенко, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 63–72. – Библиогр.: 32 назв. – ISSN 2078-9998.

Reaction of the ionosphere on solar eclipse of March 20, 2015 over Kharkov / I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 63–72. – Bibliogr.: 32. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Домнін Ігор Феліксович – доктор технічних наук, професор, Інститут іоносфери, директор, м. Харків; тел. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

Домнин Игорь Феликсович – доктор технических, профессор, Институт ионосферы, директор, г. Харьков; тел. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

Domnin Igor Feliksovich – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Ionosphere, Director, Kharkiv; tel. 057-706-22-87; e-mail: domninpro@ukr.net.

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

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

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

Ляшенко Михайло Володимирович кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, вчений секретар, м. Харків, тел.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Ляшенко Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, ученый секретарь, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Institute of Ionosphere, Scientific Secretary, Kharkiv; tel.: 706-22-87; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Чорногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Карабіна, професор кафедри космічної радіофізики, м. Харків; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Черногор Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, профессор кафедры космической радиофизики, г. Харьков; тел. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Chernogor Leonid Feoktistovich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, V. N. Karazin Kharkiv National University, Professor at the Department of Space Radiophysics, Kharkiv; tel. 057-707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

УДК 550.388.2, 551.510.535

Е. Д. АКСЁНОВА, С. В. ПАНАСЕНКО

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Проанализированы временные вариации относительных изменений мощности, температуры электронов и ионов, полученных методом некогерентного рассеяния, для ряда суточных наблюдений в магнитоспокойные дни вблизи характерных геофизических периодов (равноденствия и солнцестояния). Показано, что волновые процессы присутствовали во всех проанализированных суточных зависимостях. Их периоды, длительности, а также диапазоны высот, где они наблюдались, были близки между собой. Продemonстрировано, что периоды среднемасштабных перемещающихся волновых возмущений составляли 40 – 80 мин, а продолжительности 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды волновых возмущений в мощности менялись в пределах 0,1 – 0,3, а в температурах электронов и ионов они равнялись 0,03 – 0,1.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, перемещающиеся ионосферные возмущения, слабая геомагнитная активность, сезонные вариации, периоды, длительности и амплитуды волн.

Проаналізовано часові варіації відносних змін потужності, температури електронів та іонів, отримані методом некогерентного розсіяння, для ряду добових вимірів в магнітоспокійні дні поблизу характерних геофізичних періодів (рівнодення і сонцестояння). Показано, що хвильові процеси були присутні у всіх проаналізованих добових залежностях. Їх періоди, тривалість, а також діапазони висот, де вони спостерігалися, були близькі між собою. Продemonстровано, що періоди середньомасштабних рухомих іоносферних збурень становили 40 – 80 хв, а тривалість 2 – 5 періодів. Відносні амплітуди хвильових варіацій в потужності змінювались в межах 0,1 – 0,3, а в температурах електронів та іонів вони рівнялись 0,03 - 0,1.

Ключові слова: некогерентного розсіювання, рухомі іоносферні збурення, слабка геомагнітна активність, сезонні варіації, періоди, тривалість та амплітуди хвиль.

We analyzed temporal variations in the relative power changes, electron and ion temperatures, obtained by incoherent scatter technique, for a number of daily observations in magnetically quiet days near the typical geophysical periods (equinoxes and solstices). It is shown that the wave processes occurred in all analyzed daily dependencies. Their periods, the duration and range of altitudes, where they observed were close to each other. It has been demonstrated that periods of medium scale traveling ionospheric disturbances were of 40 - 80 minutes, the durations were of 2 – 5 periods. The relative amplitudes in power variation were between 0.1 – 0.3, and for the electron and ion temperatures they were equal to 0.03 – 0.1.

Keywords: incoherent scattering, traveling ionospheric disturbances, weak geomagnetic activity, seasonal variations, periods, duration and amplitudes of the waves.

Введение. В ионосфере наблюдается широкий спектр неоднородностей, вызванных воздействиями естественных (солнечная, сейсмическая, метеорологическая активность) и искусственных (нагрев мощными радиоволнами) источников. Генерируемые этими источниками атмосферные волны распространяются до больших высот с нарастанием амплитуды и могут приводить в движение ионосферную плазму за счет соударений нейтральных и заряженных частиц. Акустико-гравитационные волны (АГВ) в ионосфере вызывают распространение перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в F – области, а также различного типа плазменные неустойчивости. ПИВ – это особый тип волновых ионосферных возмущений, который характеризуется квазипериодическими вариациями параметров ионизированной компоненты и способностью распространяться на большие расстояния. Таким образом, АГВ невозможно обнаружить методом некогерентного рассеяния (НР), поэтому с использованием этого метода удается исследовать только их проявления на ионосферных высотах, которыми зачастую являются ПИВ. Поскольку мощность НР сигнала прямо пропорциональна концентрации электронов, появляется возможность анализа самого сигнала НР для получения характеристик ПИВ.

Интерес к АГВ/ПИВ обусловлен их сильным влиянием на распространение радиоволн различных диапазонов и тем, что они играют основную роль в

глобальном перераспределении энергии, получаемой атмосферой через магнитосферу от солнечного ветра. Метод НР дает возможность наиболее комплексного измерения и диагностики наземными средствами высотного распределения параметров ионосферной плазмы (концентрация электронов (N_e), температуры электронов (T_e) и ионов (T_i), скорость движения плазмы, ионный состав).

Несмотря на многолетние исследования ПИВ, многие вопросы их генерации и динамики все еще не получили должного объяснения.

Целью данной работы является выявление и анализ квазипериодических вариаций мощности НР сигнала и плазменных температур, вызванных прохождением ПИВ над Харьковом, в интервалы времени, близкие к весеннему и осеннему равноденствию, а также зимнему и летнему солнцестоянию в магнитоспокойные дни.

Методика обработки данных. Для нахождения параметров ПИВ использовались временные зависимости мощности НР сигнала, полученные с помощью харьковского радара НР. Данные сначала подвергались предварительной фильтрации с целью удаления следующих помех.

1. Резкий скачок уровня сигнала, который возникает при изменении усиления или выходе из строя одного из элементов прямо-передающей системы.

2. Внешние импульсные помехи, часто имеющие место во время грозы или связанные с приемом

сигналов близко расположенных мощных радиостанций. Проявляются в виде длительного (около 10 – 60 мин) увеличения мощности сигнала.

3. Когерентные отражения, связанные с отражением излученного сигнала от точечных целей – космических аппаратов или фрагментов космического мусора. Они представляют собой кратковременные (длительность меньше минуты) всплески уровня НР сигнала.

Для решения задачи фильтрации были разработаны алгоритмы, реализованные в компьютерной программе. Они позволяют скорректировать уровень сигнала и отфильтровать помехи на основе статистических методов анализа временных рядов [1].

При дальнейшем анализе определялись интервалы времени, при которых мощность НР сигнала испытывала квазипериодические вариации продолжительностью не менее двух периодов и в широком диапазоне высот. Для уточнения параметров этих возмущений применялась полосовая фильтрация с использованием цифрового фильтра.

Также была решена обратная задача НР для оценки температур электронов (T_e) и ионов (T_i) с использованием пакета программ UPRISE, где выполняется автоматизированная пороговая фильтрация данных с целью устранения когерентных помех [2]. Для получения плазменных температур необходимо многократно решать прямую задачу НР с использованием библиотек теоретических корреляционных функций, которые сравниваются с экспериментальной корреляционной функцией до нахождения наилучшего согласия.

Вдобавок было рассчитано время прохождения солнечного терминатора (СТ) на исследуемых ионосферных высотах. В ряде работ было показано, что движение СТ вызывает генерацию АГВ, неустойчивостей и флуктуаций в ионосферной плазме в широком диапазоне высот [3; 4].

Таким образом, для выявления и оценки параметров ПИВ, было проведено несколько этапов обработки данных.

1. Предварительная фильтрация данных (устранение когерентных отражений, импульсных помех и сбоев аппаратуры).

2. Устранение тренда и выявления вариаций мощности НР сигнала в диапазоне периодов 5 – 120 мин.

3. Расчет времени прохождения солнечного терминатора над Харьковом на исследуемых высотах.

4. Решение обратной задачи НР для оценки температур электронов и ионов с использованием пакета программ UPRISE.

5. Устранение тренда и выявления вариаций температур электронов и ионов в диапазоне периодов 5 – 120 мин.

6. Полосовая фильтрация вариаций мощности и плазменных температур в диапазоне периодов 40 – 80 мин.

7. Интерпретация полученных результатов.

Иначе говоря, для анализа экспериментальных данных, полученных методом НР, необходимо использование усовершенствованных пакетов программ, с помощью которых можно получить интересные нас параметры ионосферы.

Сведения о геомагнитной активности.

Поскольку объектом исследования являются среднемасштабные ПИВ, была проанализирована геомагнитная обстановка в дни наблюдений.

Среднемасштабные ПИВ имеют горизонтальную длину волны несколько сотен километров, периоды 15 – 80 мин и фазовую скорость 50 – 250 м/с. Они генерируются различными источниками в нижней атмосфере, связанными с метеорологическими процессами, движением СТ и др.

Индексы геомагнитной активности предназначены для описания вариаций магнитного поля Земли, вызванных нерегулярными источниками (воздействие потока солнечной плазмы (солнечного ветра) на магнитосферу Земли, изменениями внутри магнитосферы и взаимодействием магнитосферы и ионосферы). A_p -индекс определяется в единицах магнитного поля (нТл) и представляет среднее значение вариации магнитного поля, соответствующей данному K_p -индексу.

Планетарные K_p - и A_p -индексы были получены по запросу [5] из Центра Прогноза Погоды (Национальное управление океанических и атмосферных исследований).

В табл. 1 приведены значения A_p - и K_p -индексов, которые позволяют оценить состояние геомагнитной активности в дни наблюдений.

Таблица 1 – Сведения о магнитной активности

Дата	A_p - индекс	K_p - индекс
19.12.14	8	3 2 2 2 1 2 2 2
25.03.09	10	4 4 2 3 1 1 1 1
21.06.11	10	2 3 2 1 3 3 2 2
25.09.13	4	2 2 2 1 1 1 0 1

В таблице 2 приведена количественная характеристика возмущения или бури при конкретном значении K_p - индекса [6].

Таблица 2 – Количественная характеристика возмущения или бури

K_p -индекс	Количественная характеристика возмущения или бури
0	Крайне слабое возмущение
1	Сверхслабое возмущение
2	Очень слабое возмущение
3	Слабая буря
4	Весьма умеренная буря
5	Умеренная буря

С помощью таблицы 2 можно сделать вывод, что выбранные для анализа квазипериодических вариаций дни являются магнитоспокойными ($A_p \leq 10$, $K_p \leq 3$).

Результаты наблюдений. Целью наблюдений было выявить ПИВ не в одном, а в целом наборе параметров – вариациях мощности δP , температур

электронов δT_e и ионов δT_i , в характерные геофизические периоды.

Результаты наблюдений представлены на рис. 1. Решение о прохождении ПИВ принималось при наличии квазигармонических вариаций во всех рассмотренных зависимостях, если их периоды, диапазоны высот и время наблюдения были близки между собой.

Из рис. 1 видно, что имели место ярко выраженные волновые процессы с различными периодами и длительностью, охватывающие широкий диапазон высот и проявляющиеся как в вариациях мощности, так и в вариациях температур электронов и ионов. Наклон линий равной фазы указывает на то,

что источники ПИВ находились в нижней атмосфере, скорее всего, на стратосферных высотах.

Визуальный анализ полученных зависимостей показал, что наибольшую энергию имеют волны с периодом близким к 60 мин.

С ростом высоты относительные амплитуды ПИВ сначала увеличивались за счет уменьшения плотности нейтральной и ионизирующей составляющих атмосферы, достигали максимума на высотах 200 – 250 км и дальше уменьшались за счет усиления роли молекулярной вязкости, теплопроводности и амбиполярной диффузии.

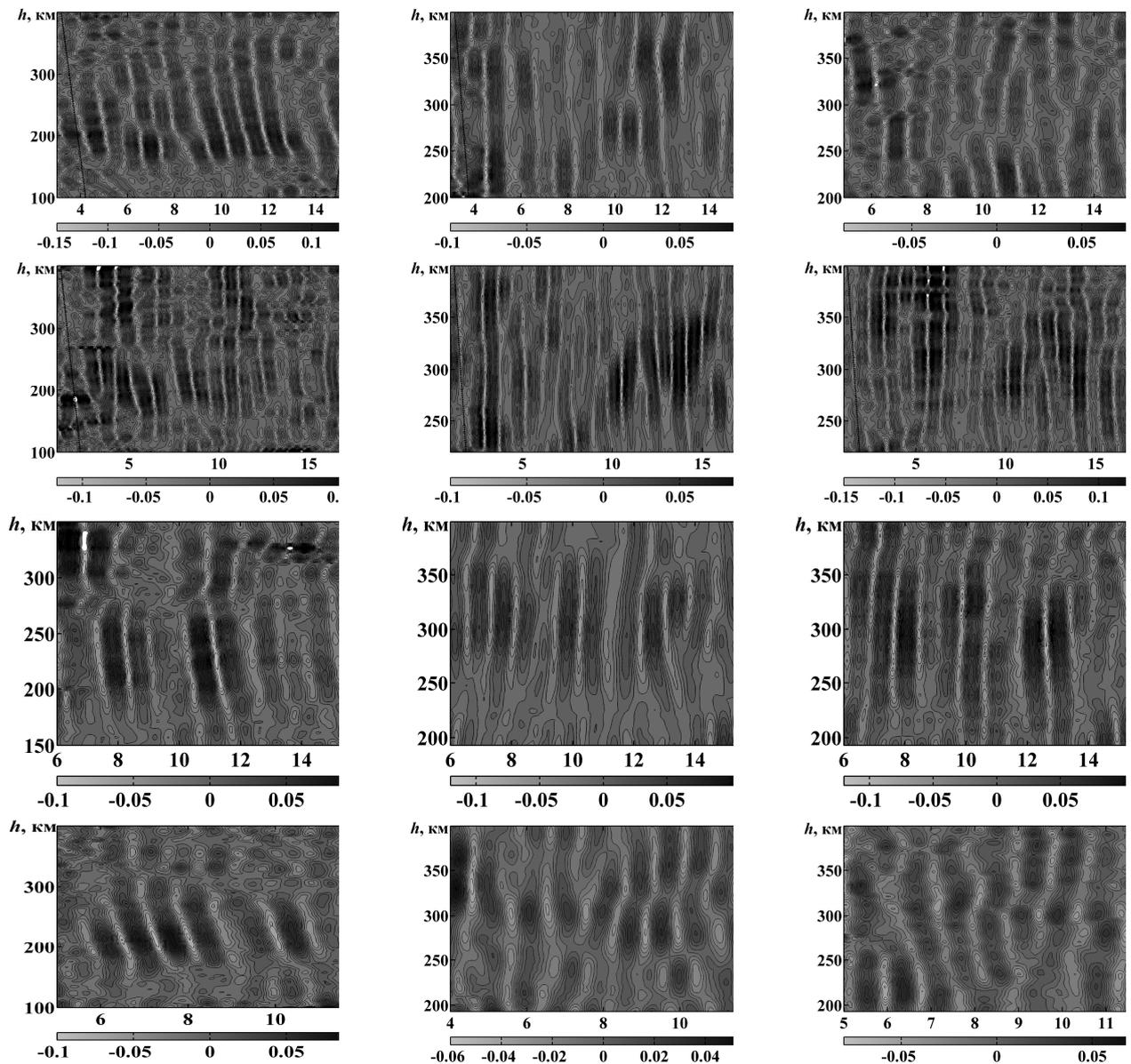


Рис. 1 – Высотно-временные вариации мощности (левый столбец), температуры электронов (средний столбец), и температуры ионов (правый столбец) в диапазоне периодов 40 – 80 мин в периоды зимнего солнцестояния – 19.12.14 г. (верхняя панель); весеннего равноденствия – 25.03.09 г. (вторая панель); летнего солнцестояния – 21.06.11 г. (третья панель); осеннего равноденствия – 25.09.13 г. (нижняя панель). Пунктирной линией показаны утренний и вечерний солнечные терминаторы.

Можно сделать вывод, что продолжительность ПИВ обычно не превышала 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды вариаций мощности НР сигнала составляли 0,1 – 0,3, а для температур электронов и ионов они равнялись 0,03 – 0,1.

Во время зимнего солнцестояния ПИВ имели место примерно с 8:00 до 13:00 UT. В период весеннего равноденствия возмущения наблюдались с 7:00 до 15:00 UT. Для летнего солнцестояния волны отслеживаются с 9:00 до 13:00 UT, а во время осеннего равноденствия наиболее выражено проявили себя с 6:00 до 10:00 UT.

В утренние часы после восхода Солнца и вечером вблизи захода происходило усиление волновой активности. При этом ПИВ, сопровождавшие утренний СТ наблюдались с запаздыванием, а вечерний СТ – с опережением относительно времени прохождения СТ на исследуемых ионосферных высотах.

Выводы. Применение метода НР дает возможность получать обширную информацию о параметрах волновых процессов в ионосферной плазме. При помощи разработанного в Институте ионосферы пакета программ была проведена обработка экспериментальных данных. Результаты наблюдений показали, что во все сезоны имели место ПИВ, четко проявляющиеся в вариациях мощности НР сигнала и температурах электронов и ионов. Для всех исследованных событий вертикальная фазовая скорость ПИВ была направлена вниз и увеличивалась с ростом высоты. Это указывает на то, что источники возмущений находились в нижней атмосфере.

Показано, что преобладающие периоды возмущений составляли 40 – 80 мин, а их длительность не превышала 2 – 5 периодов. Относительные амплитуды ПИВ принимали значения 0.1 – 0.3 для мощности НР сигнала, а для температур электронов и ионов равнялись 0.03 – 0.1.

Список литературы

1. Панасенко С.В. Фильтрация временных вариаций мощности некогерентно рассеянного сигнала при наличии нерегулярных помех и сбоев аппаратуры / Панасенко С.В. // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ". Тематичний випуск "Радіофізика та іоносфера" – 2011. – № 44 – С. 40-44.
2. Богомаз А.В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А.В. Богомаз, Д.В. Котов // Вісник НТУ "ХПИ". Серія «Радіофізика та іоносфера» – 2013. – №28 (1001). – С. 29-37.
3. Mishin E. V. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March / E. V. Mishin // J. Atmos. Terr. Phys. – 1991. – Vol. 53, N 6/7. – P. 643–648.
4. Somsikov V.M. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region / V.M. Somsikov, B. Ganguly // J. Atmos. Terr. Phys. 1995. V.57. N12. P. 1513-1523.
5. <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>.
6. Черногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур: монографія / Л. Ф. Черногор, І. Ф. Домнін. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – 408 с.

7. Kirchengast G. Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements / G. Kirchengast, K. Hocke, K. Schlegel // Radio Sci. – 1995. – V. 30, No 5. – P. 1551–1567.
8. Панасенко С. В. Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала / С. В. Панасенко, А. О. Мамедов // Вісник НТУ «ХПИ». Сер.: Радіофізика та іоносфера – 2013. – № 33 (1066). – С. 12–18.
9. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволны. монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин // Харьков: Вид-во «Підручник НТУ «ХПИ», 2010. - 240 с.
10. Dominici P. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible modeling: a short review / P. Dominici, L. R. Cander, B. Zolesi // Annali di geofisica. –1997. – Vol. 15, N 5. – P. 1171–1178.

References (transliterated)

1. Panasenko S.V. Fil'tracija vremennyh variacij moshhnosti nekogerentno rassejannogo signala pri nalichii nereguljarnyh pomeh i sboev apparatury [Filtering temporal variations of power incoherent scatter signal in the presence of irregular interference and equipment malfunction]. Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI". Tematychnyj vy'pusk "Radiofizy'ka ta ionosfera" [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Special issue: Radiophysics and ionosphere]. 2011, no.44, pp. 40-44. Print.
2. Bogomaz A.V., Kotov D.V. Paket programm novogo pokolenija dlja obrabotki dannjah radarov nekogerentnogo rassejanija Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) [Software package of a new generation of programs for the treatment of incoherent scatter radar data]. Visnyk NTU "XPI". Serija "Radiofizika i ionosfera" [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Radiophysics and ionosphere]. 2013, no. 28 (1001), pp. 29-37. Print.
3. Mishin E. V. Disturbances of F-region electron density following solar terminator during the WITS period of 16–20 March. J. Atmos. Terr. Phys. 1991, vol. 53, n.6/7, pp. 643–648. Print.
4. Somsikov V.M., Ganguly B. On the formation of atmospheric inhomogeneities in the solar terminator region. J. Atmos. Terr. Phys. 1995, v.57, n.12, pp. 1513-1523. Print.
5. <http://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>.
6. Chornogor L. F., Domnin I. F. Fyzyka geokosmichny'x bur [Physics of geospace storms]. Monografija. – X.: XNU imeni V. N. Karazina. 2014, p.408. Print.
7. Kirchengast G. Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements. Radio Sci. 1995, v. 30, no. 5, pp.1551–1567. Print.
8. Panasenko S. V., Mamedov A. O. Obnaruzhenie peremeshhajushhihsja ionosfernyh vozmushhenij v kvaziperiodicheskijh variacijah moshhnosti nekogerentno rassejannogo signala [Detection of traveling ionospheric disturbances in the quasi-periodic variations of incoherent scatter signal power]. Visnyk NTU «XPI». Ser.: Radiofizy'ka ta ionosfera. [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Series: Radiophysics and ionosphere] 2013, no. 33 (1066), pp.12–18. Print.
9. Puljaev V. A., Dzjubanov D. A., Domnin I. F. Opredelenie parametrov ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln [Determination of the parameters of the ionosphere by incoherent scatter technique of radio waves]. Monografija - Kharkiv: Vy'd-vo «Pidruchny'k NTU «XPI». 2010, p. 240. Print.
10. Dominici P., Cander L. R., Zolesi B. On the origin of medium-period ionospheric waves and their possible modeling: a short review. Annali di geofisica. 1997, vol. 15, n. 5, pp. 1171–1178. Print.

Поступила (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Сезонные вариации параметров волновых процессов в ионосфере по данным метода некогерентного рассеяния / Е. Д. Аксёнова, С. В. Панасенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 73–77. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Сезонні варіації параметрів хвильових процесів в іоносфері за даними методу некогерентного розсіяння / К. Д. Аксьонова, С. В. Панасенко // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Радиофизика и ионосфера. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 73–77. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Seasonal variations in the parameters of wave processes in the ionosphere according to the method of incoherent scattering / K. D. Aksonova, S. V. Panasenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 73–77. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Аксёнова Катерина Дмитрівна – викладач-стажист Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, м. Харків, тел. (057) 707-62-52; e-mail: katya.aksen@rambler.ru.

Аксёнова Екатерина Дмитриевна – преподаватель-стажер Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”, г. Харьков, тел. (057) 707-62-52; e-mail: katya.aksen@rambler.ru .

Aksonova Kateryna Dmytrivna – teacher- trainee National technical university “Kharkiv polytechnic institute”, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: katya.aksen@rambler.ru.

Панасенко Сергій Валентинович – кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com

Панасенко Сергей Валентинович – кандидат физико-математических наук, заведующий отделом Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

Panasenko Sergii Valentynovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department of Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: sergii.v.panasenko@gmail.com.

УДК 519.2

А. О. ЩИРЫЙ

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО НАЗЕМНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

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

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

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

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

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

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

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

частотной модуляцией (ЛЧМ) в качестве зондирующего.

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

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

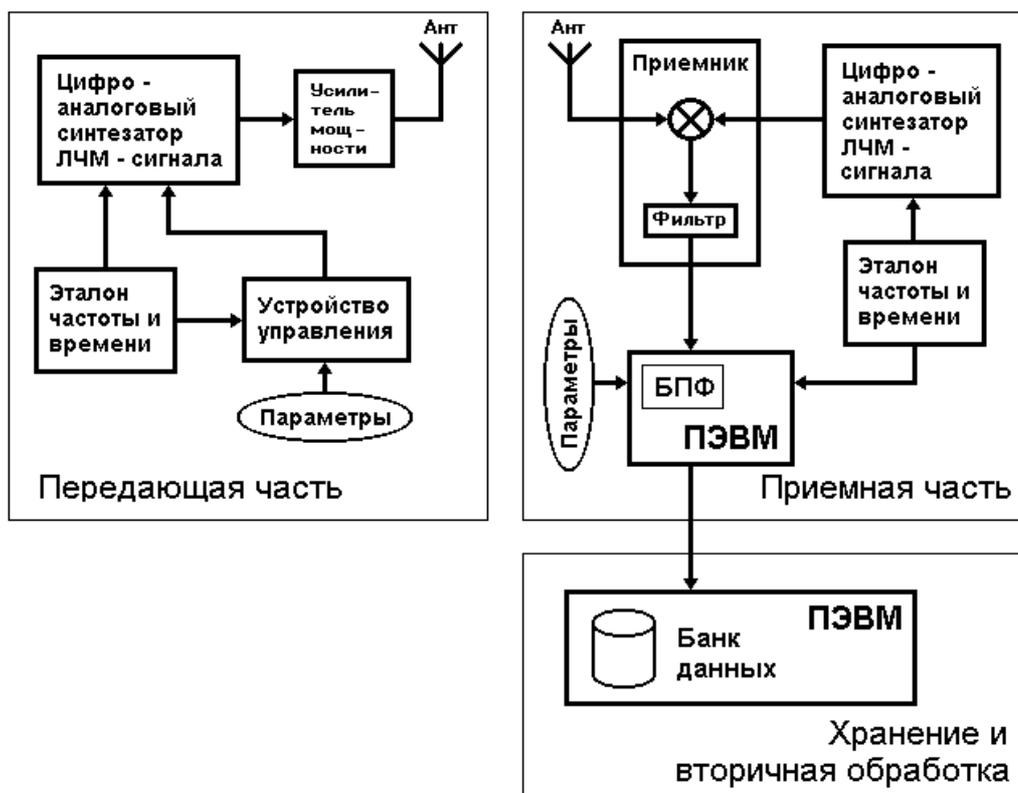


Рис. 1 – Общая структура комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы

В случае наклонного зондирования приемная и передающая части комплекса пространственно

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

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

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

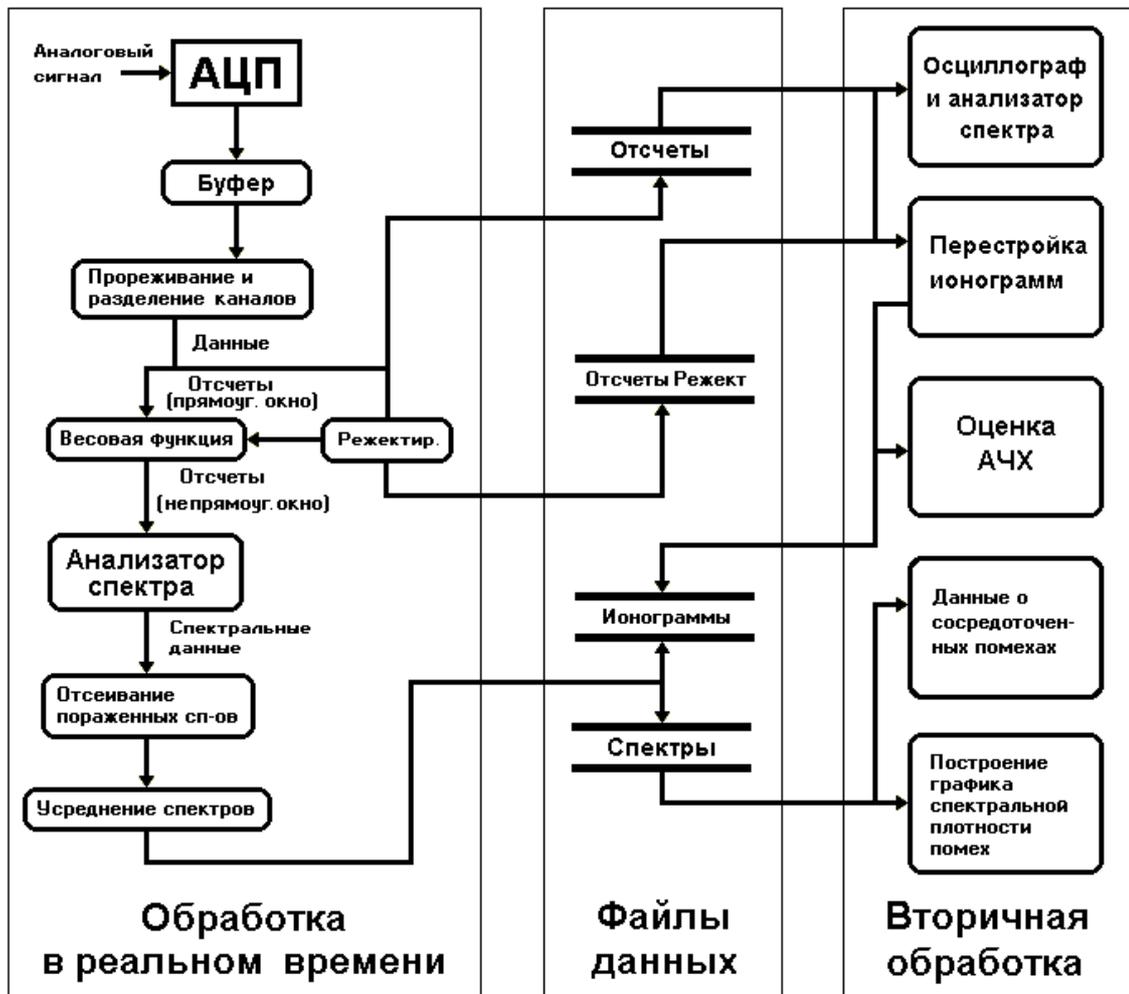


Рис. 2 – Общая структура ПО комплекса радиозондирования

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

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

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

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

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

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

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

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

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

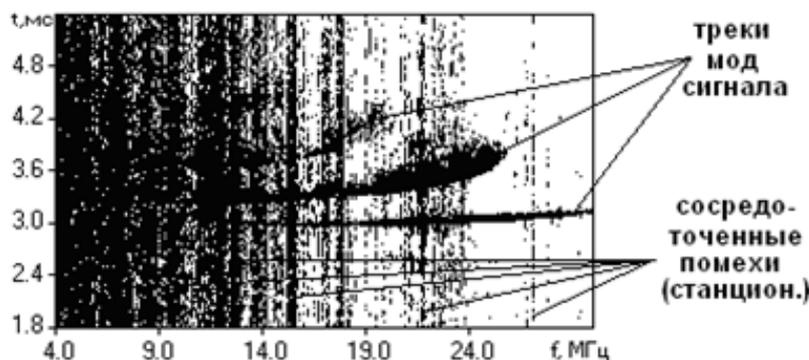


Рис. 3 – Пример ионограммы наклонного зондирования

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

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

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

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

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

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

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

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

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

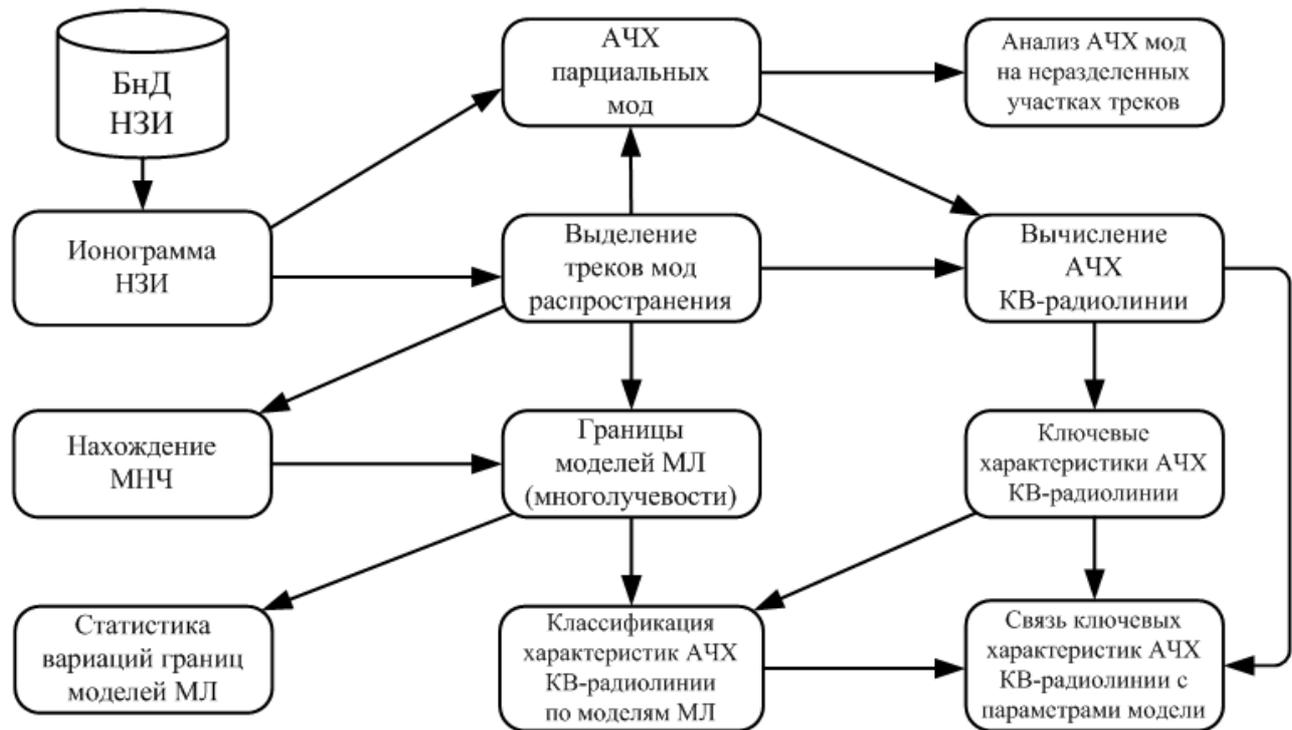


Рис. 4 – Информационная диаграмма исследования характеристик моделей многолучевости

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

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

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

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

Список литературы

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

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

References (transliterated)

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

Поступила (received) 30.05.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

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

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

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

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. В. БОГОМАЗ, Б. Р. БРАВИЧЕВ**УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

З метою контролю вимірювання параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння (НР) запропоновано пристрій формування сигналів для тестування радіоприймальних та оброблювальних систем радару НР. Вимоги до нього вироблені на основі аналізу характеристик НР сигналу. Пристрій дозволяє оперативно контролювати основні параметри радіотехнічних систем радару, точність визначення параметрів іоносфери, таких як температури іонів і електронів, швидкість руху іоносферної плазми, а також тестувати і оптимізувати алгоритми та програми обробки шумоподібних сигналів.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, доплерівський зсув, обробка сигналу, спектр випадкового сигналу, пристрій контролю, синтезатор сигналу, швидкість руху плазми.

С целью контроля измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) предложено устройство формирования сигналов для тестирования приемных и обрабатывающих систем радару НР. Требования к нему выработаны на основе анализа характеристик НР сигнала. Устройство позволяет оперативно контролировать основные параметры радиотехнических систем радару и точность определения параметров ионосферы, таких как температуры ионов и электронов, скорость движения ионосферной плазмы, а также тестировать и оптимизировать алгоритмы и программы обработки шумоподобных сигналов.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, доплеровское смещение, обработка сигнала, спектр случайного сигнала, устройство контроля, синтезатор сигнала, скорость движения плазмы.

The signal generation device for testing radio receiving and processing systems of the incoherent scatter (IS) radar is proposed to check the ionosphere parameters measurements by IS technique. Requirements to it were developed based on analysis of the characteristics of the IS signal. The device consists of a generator of the signal spectrum in the low frequency range on the basis of PC and synthesizer of the monitoring signals. It allows to synthesize continuous or radio pulse pilot signal of several types: harmonic signal with specified frequency shift relative to the work radar frequency, noise-like signal with uniform spectrum in selected frequency band, the signal with programmable parameters that is similar to the IS signal for different states of the ionosphere. The device allows to operatively check main parameters of radar systems, monitoring the accuracy of the ionospheric parameters such as the ion and electron temperatures and the ionospheric plasma drift velocity, test and optimize the noise-like signal processing algorithms and programs.

Keywords: incoherent scatter radar, Doppler shift, signal processing, the spectrum of a random signal, the testing device, the signal synthesizer, plasma drift velocity.

Введение. Измерения параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) являются прецизионными, поскольку полезный НР сигнал, будучи шумоподобным, принимается на фоне космического и аппаратного шума (отношение сигнал/шум составляет величину от нуля до нескольких десятков), параметры сигнала зависят от состояния ионосферы и при ее возмущении могут значительно изменяться [1]. Чрезвычайно прецизионными являются измерения скорости движения ионосферной плазмы, что связано с необходимостью определять доплеровское смещение спектра НР сигнала, на 2–3 порядка меньше ширины этого спектра [2, 3].

Погрешность измерения параметров сигнала, а, значит, и параметров ионосферы, может быть вызвана аппаратными факторами.

Актуальной задачей является обеспечение контроля параметров систем радару НР как при подготовке его к измерениям, так и во время проведения измерений ионосферных параметров, с целью обнаружения источников погрешности, ее исключения или учета при обработке полученной информации.

Часть процедур, связанных с подготовкой радару к измерениям, осуществляется при выключенном радиопередающем устройстве (РПУ), а ряд процедур требует работы РПУ, которое потребляет значительную мощность (импульсная мощность РПУ радару НР Института ионосферы в обычных режимах работы составляет 2 МВт, средняя потребляемая мощность порядка 100 кВт). Поэтому в настоящее

время актуальность также состоит в необходимости оперативного контроля с минимальными затратами времени и электроэнергии.

Вопросы, связанные с контролем радару, рассматривались рядом авторов (см., например, [4–10]). Так, для экспериментальной проверки точности измерения параметров НР сигнала были разработаны способы формирования контрольного сигнала путем пропускания белого шума через линейный фильтр (при этом спектральная плотность мощности сигнала на выходе фильтра определяется его амплитудно-частотной характеристикой) [7, 11, 12], суммирования большого числа независимых гармонических сигналов со случайными начальными фазами [8, 10, 13] и др. [14, 15]

В составе аппаратуры радару НР Института ионосферы имеется устройство контроля, основанное на формировании спектра сигнала, подобного НР сигналу, с помощью генератора белого шума на стабилизаторе и фильтров нижних частот [7]. Контрольный сигнал, вырабатываемый этим устройством на частоте, близкой к несущей частоте радару, подается по эфиру на антенно-фидерное устройство радару. Этот сигнал используется для контроля измерения огибающей корреляционной функции шумоподобного сигнала и связанных с ней параметрами ионосферы – температур ионов и электронов, а также для измерения характеристики разрядников антенного коммутатора. Однако контроль измерения скорости плазмы с помощью

© Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, Б. Р. Бравичев, 2016

устройства [7] проблематичен в связи с отсутствием когерентного формирования сигнала на несущей частоте и взаимной нестабильностью центральной частоты спектра контрольного сигнала и рабочей частоты приемника. Ограничение функциональности устройства также связано с формированием всего трех сигналов с отличающимися спектрами, что связано с наличием трех фильтров, формирующих спектр. С течением времени характеристики фильтров и, следовательно, спектра контрольного сигнала могут измениться, что скажется на прецизионности контрольных измерений.

Измерение характеристики антенного коммутатора осуществляется также с помощью гармонического сигнала, формируемого другим устройством (генератором опорного напряжения) или промышленным высокостабильным генератором [6, 9]. С помощью этих же устройств контролируется измерение скорости. Однако целесообразно осуществлять контроль по имитируемому доплеровскому смещению не только частоты гармонического сигнала, но и спектра шумоподобного контрольного сигнала.

Целью данной работы является разработка многофункционального устройства формирования сигналов для тестирования приемных и обрабатывающих систем радара НР и контроля точности измерения параметров ионосферы методом НР, в том числе скорости движения ионосферной плазмы.

Аппаратурные факторы, влияющие на точность определения параметров ионосферы методом НР. Параметры ионосферы определяются по измеренным корреляционным функциям НР сигнала, которые однозначно связаны с его спектром.

Спектр НР сигнала зависит от ряда параметров ионосферы, таких как температура ионов, температура электронов и ионный состав, которые изменяются с высотой и зависят от уровня солнечной активности, сезона, времени суток, а также состояния космической погоды. При движении ионосферной плазмы спектр НР сигнала сдвигается на величину доплеровского смещения, а при наличии токов в ионосфере появляется его перекос.

В то же время на спектр принимаемого сигнала, а также на другие его параметры, может оказывать влияние ряд аппаратурных факторов. К ним, в частности, относятся:

- нестабильность коэффициента передачи приемного тракта, вызванная, в основном, процессом восстановления разрядников антенного коммутатора антенно-фидерного устройства после окончания излучения зондирующего сигнала;
- неравномерность амплитудно-частотной характеристики приемного тракта;
- наличие собственного шума приемного тракта;
- неточность установки сдвига фазы между двумя сигналами синхронного гетеродина, которые используются для выделения квадратурных составляющих НР сигнала.

Некоторые из этих факторов являются устранимыми, а другие – учитываются в процессе обработки. Описание радара НР, режимов его работы и методик обработки приведены в [3–6, 16–21]

Для контроля аппаратурных факторов, влияющих на точность определения параметров ионосферы, и измерения характеристик, используемых для коррекции данных в процессе обработки, необходимо использовать устройство формирования контрольного сигнала (устройства контроля).

Особые требования к устройству контроля.

1. Возможность синтеза гармонических и шумоподобных сигналов с задаваемыми параметрами.
2. Прецизионность:
 - высокая точность установки сдвига центральной частоты спектра контрольного сигнала относительно рабочей частоты радара (158 МГц) и промежуточных частот контролируемых трактов – до 0,1–0,5 Гц;
 - формирование сигналов, нестабильность частоты (или центральной частоты спектра) которых относительно рабочей частоты радара НР (158 МГц) не превышает 0,1 Гц;
 - абсолютная симметрия спектра контрольного сигнала относительно его центральной частоты.
3. Удобство в управлении для оперативного контроля.
4. Обеспечение электромагнитной совместимости с системами радара НР.

Сигналы, формируемые предлагаемым устройством контроля. Для обеспечения всеобъемлющего контроля радара НР предлагается устройство формирования контрольного сигнала, которое позволяет, благодаря когерентной структуре, проводить контроль измерения параметров ионосферной плазмы, включая скорость ее движения, а также синтезировать контрольный сигнал нескольких видов:

- гармонический сигнал со смещением частоты (задается программно) относительно рабочей частоты радара;
- шумоподобный сигнал с равномерным спектром в избираемой полосе частот;
- сигнал, подобный НР сигналу для различных состояний ионосферы с параметрами, которые задаются программным способом.

Для контроля во время ионосферных измерений, можно использовать радиоимпульсный синтезированный сигнал, который подается в контролируемый тракт на участках радиолокационной развертки дальности, где НР сигнал отсутствует. Для тестирования радара при подготовке к измерениям может использоваться (в зависимости от контролируемого параметра) радиоимпульсный или непрерывный сигнал. Сигналы радара НР во время ионосферных измерений изображены на рис. 1. Типы синтезируемых сигналов приведены на рис. 2.

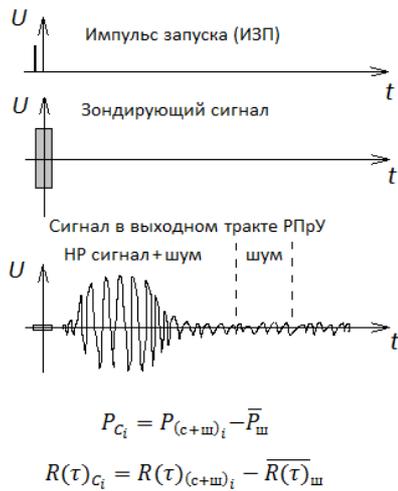


Рис. 1 – Сигналы радара НР во время ионосферных измерений

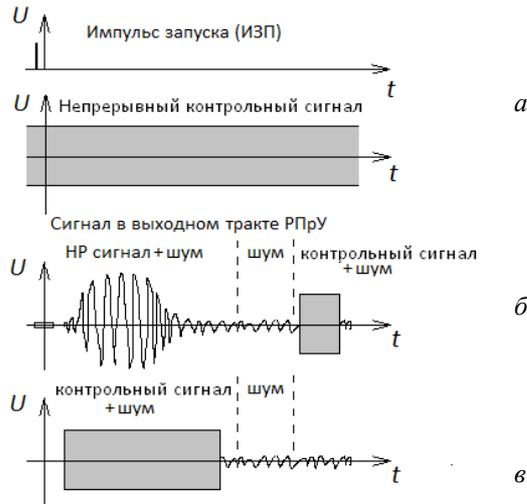


Рис. 2 – Применение контрольного сигнала: а, в – при тестировании аппаратуры, б – во время ионосферных измерений

Здесь ИЗП – импульс запуска передатчика. Период следования ИЗП соответствует длительности радиолокационной развертки (около 40 мс). Статистические параметры НР сигнала (мощность P_{ci} и корреляционная функция $R(\tau)_{ci}$) для каждого конкретного i -го участка развертки определяются при обработке в виде разности соответствующих

параметров смеси сигнал+шум и усредненных параметров шума, измеренных на участках развертки, где НР сигнал отсутствует (рис. 1).

Устройство контроля в составе радара НР.

Функциональная схема работы устройства контроля в составе радара некогерентного рассеяния изображена на рис. 3.

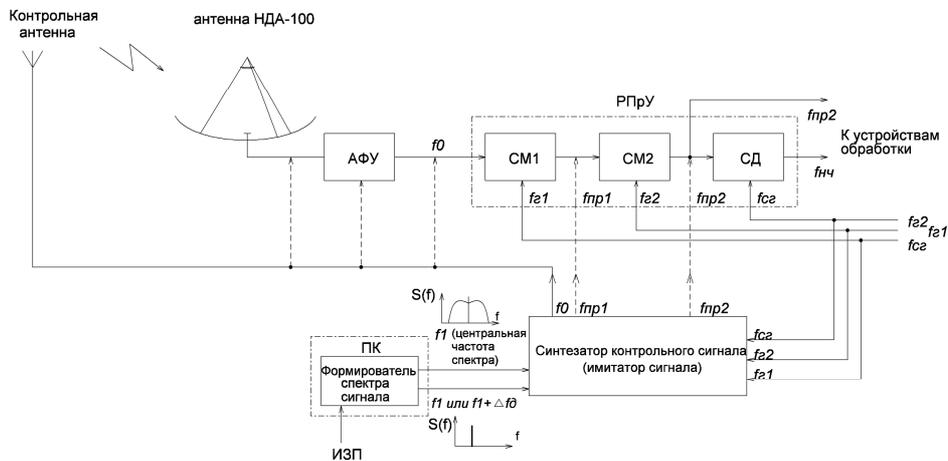


Рис. 3 – Функциональная схема работы устройства контроля в составе радара НР

Здесь показаны структурные элементы в составе радара: антенна, антенно-фидерное устройство (АФУ), радиоприемное устройство (РПрУ) со смесителями (СМ) и синхронным детектором (СД), а также элементы устройства контроля: формирователь спектра сигнала и синтезатор контрольного сигнала (имитатор сигнала).

Формирователь спектра сигнала – это персональный компьютер с оригинальным программным обеспечением и встроенной звуковой картой, которая формирует на выходе ее цифро-аналогового преобразователя сигнал с необходимыми

характеристиками (такими как спектральная плотность мощности и закон распределения).

Синтезатор контрольного сигнала осуществляет перенос спектра сформированного сигнала на рабочую частоту радара $f_0=158$ МГц, а также на промежуточные (ПЧ) частоты $f_{пр1}$ и $f_{пр2}$, для контроля всех каскадов приемно-обрабатывающего тракта радара НР.

Для обеспечения когерентности используются сигналы первого, второго и синхронного гетеродинов РПрУ радара с частотами $f_{г1}$, $f_{г2}$ и $f_{сг}$ [16, 18]. Доплеровское смещение спектра контрольного

сигнала имитируется с помощью смещения частоты вспомогательного сигнала на величину Δf_d .

Контрольный сигнал может подаваться (непрерывно или на определенном участке радиолокационной развертки) на вход радиоприемного устройства непосредственно, либо с помощью контрольной антенны по эфиру через антенно-фидерный тракт радара, а также в тракты

первой $f_{пр1}$ и второй $f_{пр2}$ промежуточных частот РПРУ (см. рис. 2 и 3).

Длительность и задержка начала контрольного сигнала относительно ИЗП устанавливается экспериментатором.

Структурная схема устройства контроля приведена на рис. 4.

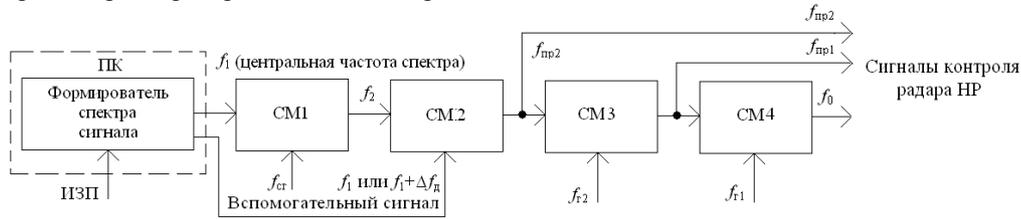


Рис. 4 – Структурная схема устройства контроля

Устройство включает в себя формирователь (на базе ПК) сигнала с центральной частотой спектра f_1 и вспомогательного гармонического сигнала, а также тракт переноса спектра контрольного сигнала на несущую частоту радара f_0 , выполненный на основе четырех смесителей СМ1–СМ4.

Формирователь спектра сигнала. Принцип формирования шумоподобного сигнала основан на его синтезе в виде суммы гармонических составляющих со случайными фазами и амплитудами, которые соответствуют рассчитанным по параметрам ионосферы спектрам [13, 22]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{S_i} \sin(2\pi f_i t + \theta_i). \quad (1)$$

Здесь S_i – значение составляющей энергетического спектра, который задается для синтеза, f_i – частота; θ_i – случайная начальная фаза, равномерно распределенная на интервале $[-\pi; \pi]$. При $S_i = const$ формируется шумоподобный сигнал с равномерным спектром, а при $N = 1$ – гармонический сигнал.

Структурная схема формирователя спектра представлена на рис. 5.

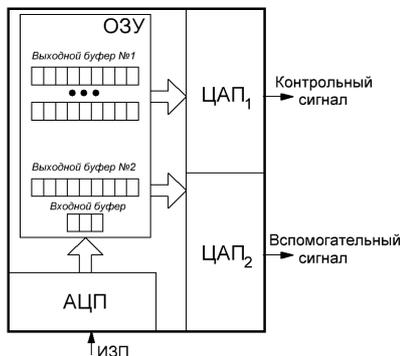


Рис. 5 – Структурная схема формирователя спектра сигнала

Для работы со звуковой платой используется библиотека BASS [23].

Контрольный и вспомогательный сигналы формируются с помощью двух ЦАП, работающих в 16-разрядном режиме.

Сигнал ИЗП, необходимый для синхронизации работы формирователя спектра, поступает на микрофонный вход звуковой платы. Задержка между ИЗП и началом формирования сигнала задается программно.

Алгоритм работы программы-формирователя спектра показан на рис. 6.

Инициализация звуковой платы включает выбор устройства, которое будет производить вывод сигнала (ПК может иметь несколько звуковых плат), установку частоты дискретизации АЦП равной 44100 Гц, что достаточно для формирования сигнала со спектром на центральной частоте 15 кГц и шириной единицы килогерц (таким спектром обладает сигнал, некогерентно рассеянный областью ионосферы, представленной ионами атомарного кислорода), а также выделение памяти для выходных буферов. Выбор режима работы формирователя осуществляется с клавиатуры в текстовом окне. Для работы устройства в режиме реального времени целесообразно применение заранее рассчитанных выборок сигналов, так как вычисления по формуле (1) при большом количестве гармонических составляющих N являются относительно ресурсоемкими. Как показывает опыт формирования шумоподобных сигналов на ПК с использованием данного способа [10], применение табличных значений функции синуса и уменьшение количества гармоник негативно сказывается на качестве имитации сигнала. Расчет вспомогательного сигнала и запись его мгновенных значений в соответствующий буфер производится однократно. Многократное воспроизведение этого сигнала осуществляется аппаратным способом в сигнальном процессоре звуковой платы. Во время ожидания прихода ИЗП производится заполнение входного буфера звуковой платы одной из реализаций сигнала с заданным спектром. Простейший алгоритм формирования нужной задержки относительно фронта ИЗП может обеспечить ее значение от 5 мс. Для получения меньшей задержки необходимо учитывать информацию о времени поступления ИЗП предыдущей радиолокационной развертки. Вывод контрольного сигнала на звуковую плату осуществляется путем смены рабочего выходного буфера звуковой платы на заранее подготовленный (во время ожидания ИЗП) входной буфер.



Рис. 6 – Алгоритм работы программы-формирователя спектра

Синтезатор контрольного сигнала. Для того чтобы перенести спектр синтезируемого сигнала на рабочую частоту радара НР с точностью до выбранного смещения частоты Δf_d и соблности когерентность, используется четырехкратное преобразование частоты (см. рис. 4). От формирователя спектра сигнала на синтезатор поступает гармонический сигнал с частотой f_1 , или сигнал с равномерным спектром с центральной частотой f_1 , или сигнал, подобный НР сигналу, с той же центральной частотой. Также подается вспомогательный сигнал (непрерывный или

радиоимпульсный) с частотой f_1 или (для имитации доплеровского смещения) $f_1 + \Delta f_d$. В результате преобразования сигналов в смесителях СМ1 и СМ2 спектр контрольного сигнала переносится на вторую ПЧ $f_{пр2}$, в СМ3 – на первую ПЧ $f_{пр1}$, а в СМ4 – на несущую частоту f_0 .

Анализ характеристик НР сигнала для формирования контрольного сигнала. Для расчета параметров и выбора элементов устройства контроля был проведен анализ характеристик НР сигнала для различного состояния ионосферы, как по модели IRI, так и с использованием реальных данных измерений с помощью радара НР. На рис. 7 приведены в качестве примера спектры НР сигнала для ряда высот в условиях высокой солнечной активности [24].

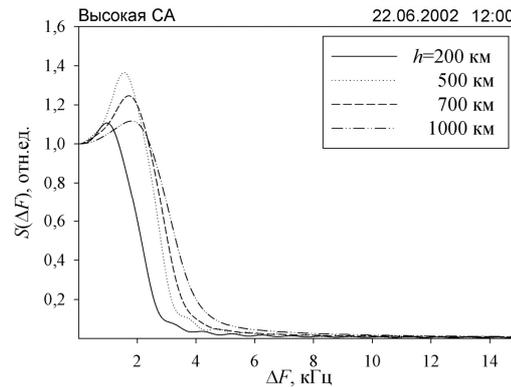


Рис. 7 – Спектры НР сигнала в области низких частот, измеренные с помощью радара НР для ряда высот ионосферы

В результате анализа выяснено, что при имеющейся звуковой карте формирователя спектра целесообразно синтезировать шумоподобный контрольный сигнал с полушириной спектра до 5 кГц. Исходя из этого, выбрана частота вспомогательного сигнала $f_1 = 15$ кГц.

Величина имитируемого доплеровского смещения Δf_d выбрана в диапазоне $-500 \dots +500$ Гц, исходя из реальных значений доплеровского смещения спектра НР сигнала для радара Института ионосферы,

Принцип формирования сигналов устройства контроля (см. рис. 4) иллюстрируется таблицей 1 и рисунками 8, 9 и 10.

Таблица 1 – Порядок формирования частот в синтезаторе контрольного сигнала

Частоты гетеродинов (от РПрУ)	Частоты синтезируемых сигналов	Примечания
$f_{r1} = 173,0312$ МГц	$f_1 = 15$ кГц (центральная частота спектра)	Гармонический или случайный сигнал с заданным спектром
$f_{r2} = 16$ МГц	$f_1 = 15$ кГц или $f_1 + \Delta f_d = 14,5 \dots 15,5$ кГц	Вспомогательный гармонический сигнал (Δf_d – задаваемое имитируемое доплеровское смещение, $\Delta f_d = -500 \dots 0 \dots 500$ Гц с шагом 1 Гц)
$f_{cr} = 972,4$ кГц	$f_2 = f_1 + f_{cr} = 987,4$ кГц	СМ1
	$f_{пр2} = f_2 - f_1 = 972,4$ кГц	СМ2
	$f_{пр1} = f_{r2} - f_{пр2} = 15,0276$ МГц	СМ3
	$f_0 = f_{r1} - f_{пр1} = 158,0036$ МГц	СМ4

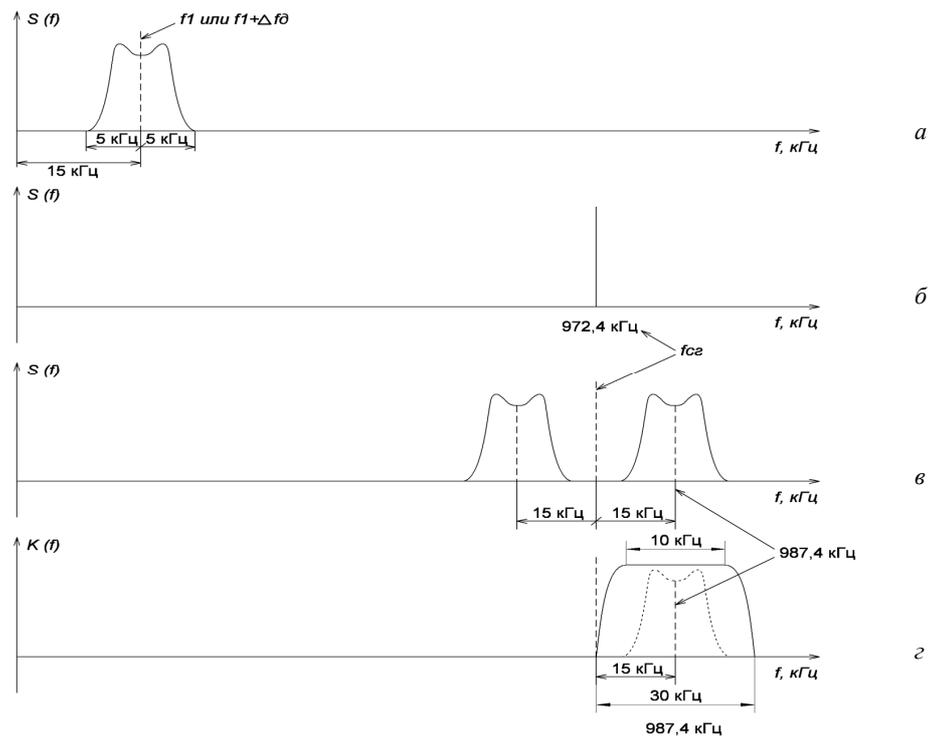


Рис. 8 – Перенос спектра синтезируемого сигнала на вспомогательную частоту f_2 : а – спектр сигнала формирователя спектра; б – спектр сигнала синхронного гетеродина; в – спектр сигнала после смесителя СМ1; г – спектр того же сигнала, выделенного полосовым фильтром на частоте f_2 и коэффициент передачи мощности $K(f)$ полосового фильтра

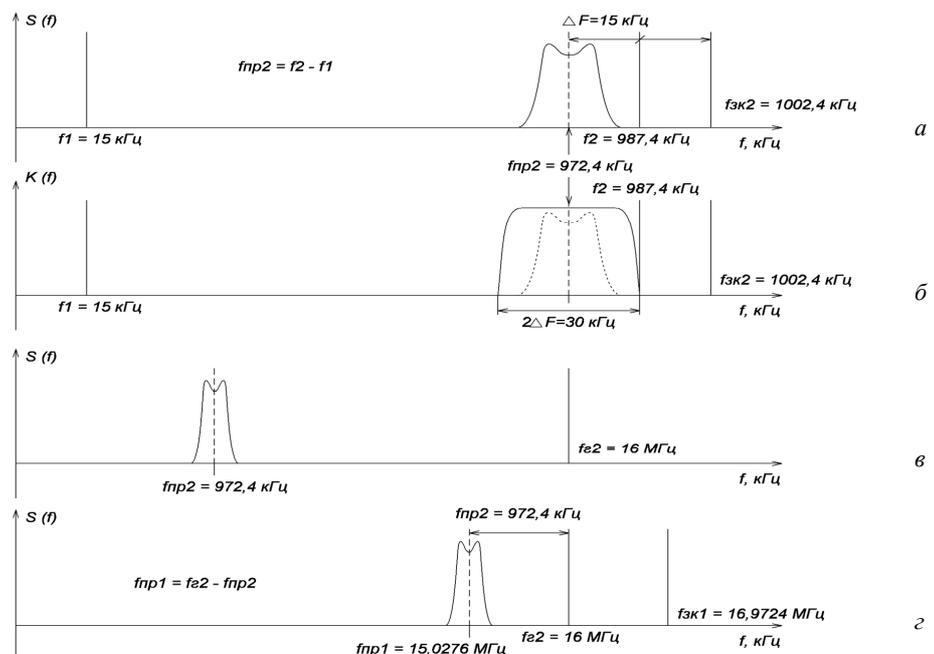


Рис. 9 – Перенос спектра синтезируемого сигнала на промежуточные частоты f_{np2} и f_{np1} в смесителях СМ2 (а и б) и СМ3 (в и г), коэффициент передачи мощности $K(f)$ полосового фильтра на частоте f_{np2} (б)

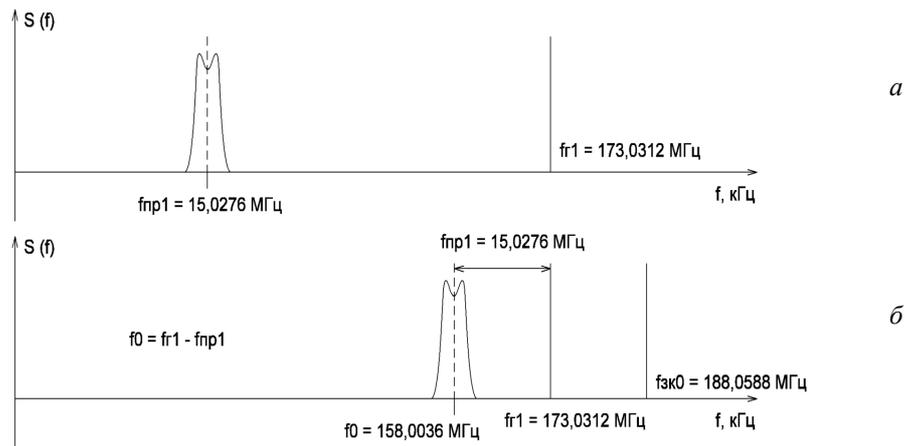


Рис. 10 – Перенос спектра синтезируемого сигнала на несущую частоту f_0 в смесителе СМ4: а – спектры контрольного сигнала на 1-й ПЧ и сигнала 1-го гетеродина; б – спектр сигнала на несущей частоте f_0

Функциональная схема устройства контроля.

В результате тщательного анализа условий эксплуатации, параметров контрольного сигнала, которые должно обеспечить устройство, а также на основании указанных выше требований и структурной схемы, была разработана функциональная схема устройства контроля, которая изображена на рис. 11. Схема содержит балансные смесители СМ1–СМ4, полосовые фильтры, буферные каскады, согласующую цепь и аттенюатор.

В качестве основного элемента смесителей была выбрана микросхема двойного балансного смесителя SA612A. Выбор именно этой микросхемы объясняется ее характеристиками, удовлетворяющими по таким параметрам, как диапазон рабочих частот (не менее чем до 500 МГц), входное и выходное сопротивления

(1,5 кОм), коэффициент шума (до 6 дБ) и достаточно эффективное подавление паразитных сигналов [25]. Полосовые фильтры применены для фильтрации побочных продуктов преобразования.

Согласующая цепь и буферные каскады предназначены для согласования входных и выходных сопротивлений узлов, развязки по постоянному току и исключения влияния последующих каскадов на предыдущие. Регулируемый аттенюатор служит для ослабления сигнала и шума предыдущих каскадов и дополнительной установки напряжения выходного сигнала на несущей частоте в необходимых пределах 0–25 мкВ (основная установка уровня напряжения каждого из выходных сигналов осуществляется программно с помощью формирователя спектра сигнала).

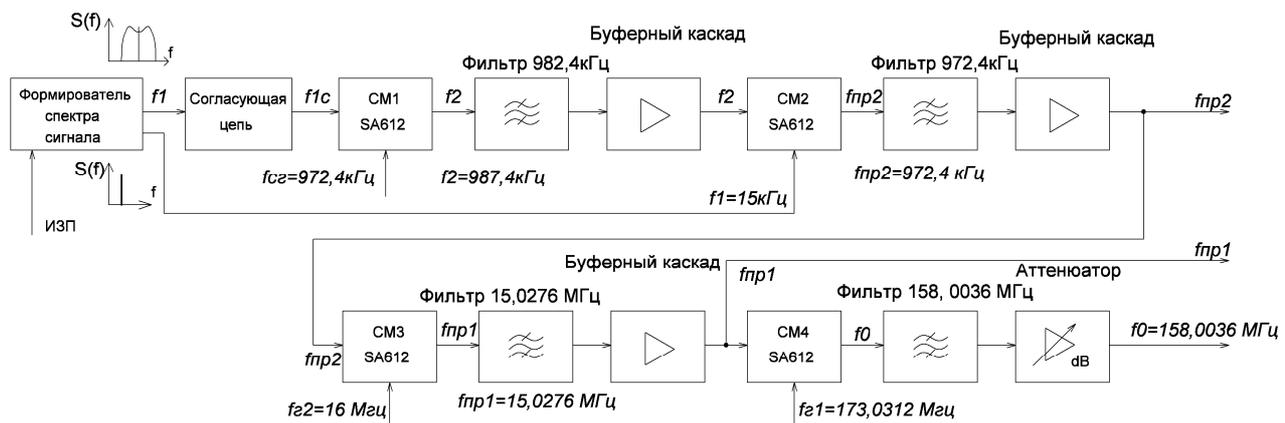


Рис. 11 – Функциональная схема устройства контроля

Требования к полосовым фильтрам на выходах смесителей. Для всех фильтров: неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе спектра контрольного сигнала ($2\Delta f = 10$ кГц) – не более 0,1 дБ; подавление внеполосных помех – не менее 40 дБ. Исходя из этих условий сформулированы основные требования к каждому конкретному фильтру, которые представлены в таблице 2.

Особые требования к ширине полосы пропускания и ширине полосы задержания АЧХ предъявляются к фильтрам, стоящим после смесителей СМ1 и СМ2. Это обусловлено тем, что разница между частотой гетеродина (f_{cr}) на входе СМ1, а также сигнала (f_1) на входе СМ2, и центральной частотой спектра сигнала на выходе соответствующего смесителя (f_2 и f_{np2}) достаточно мала (15 кГц) и соизмерима с шириной

синтезированного спектра сигнала ($2\Delta f=2\dots 10$ кГц). Наиболее приемлемыми для всех фильтров являются фильтры типа Кауэра. Основные характеристики рассчитанных фильтров приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Основные требования к полосовым фильтрам

Расположение фильтров	Ширина полосы пропускания	Ширина полосы задержания (по уровню 40 дБ)
СМ1 и СМ2	не менее 10 кГц (при неравномерности АЧХ не более 0,1 дБ)	≤ 30 кГц
СМ3	590 кГц	$\leq 1,8$ МГц
СМ4	4,9 МГц	≤ 15 МГц

Таблица 3 – Основные характеристики рассчитанных полосовых фильтров

Расположение фильтра	Тип фильтра	Порядок фильтра	Затухание в полосе пропускания ΔA , дБ	Затухание в полосе задержания A_s , дБ	Рабочая частота, МГц
СМ1	Кауэра	5	0,039	60,8	0,9874
СМ2	Кауэра	5	0,039	60,8	0,9724
СМ3	Кауэра	3	0,011	52,82	15,0276
СМ4	Кауэра	3	0,011	52,82	158,0036

С целью проверки проведенных расчетов было проведено моделирование полосовых фильтров в программной среде Multisim 13.0, которое подтвердило правильность расчета и удовлетворило

требованиям, указанным в таблице 2. На рис. 12 в качестве примера представлен результат моделирования двух фильтров, используемых в смесителях СМ1 (рис. 12, а, б) и СМ3 (рис. 12, в, г).

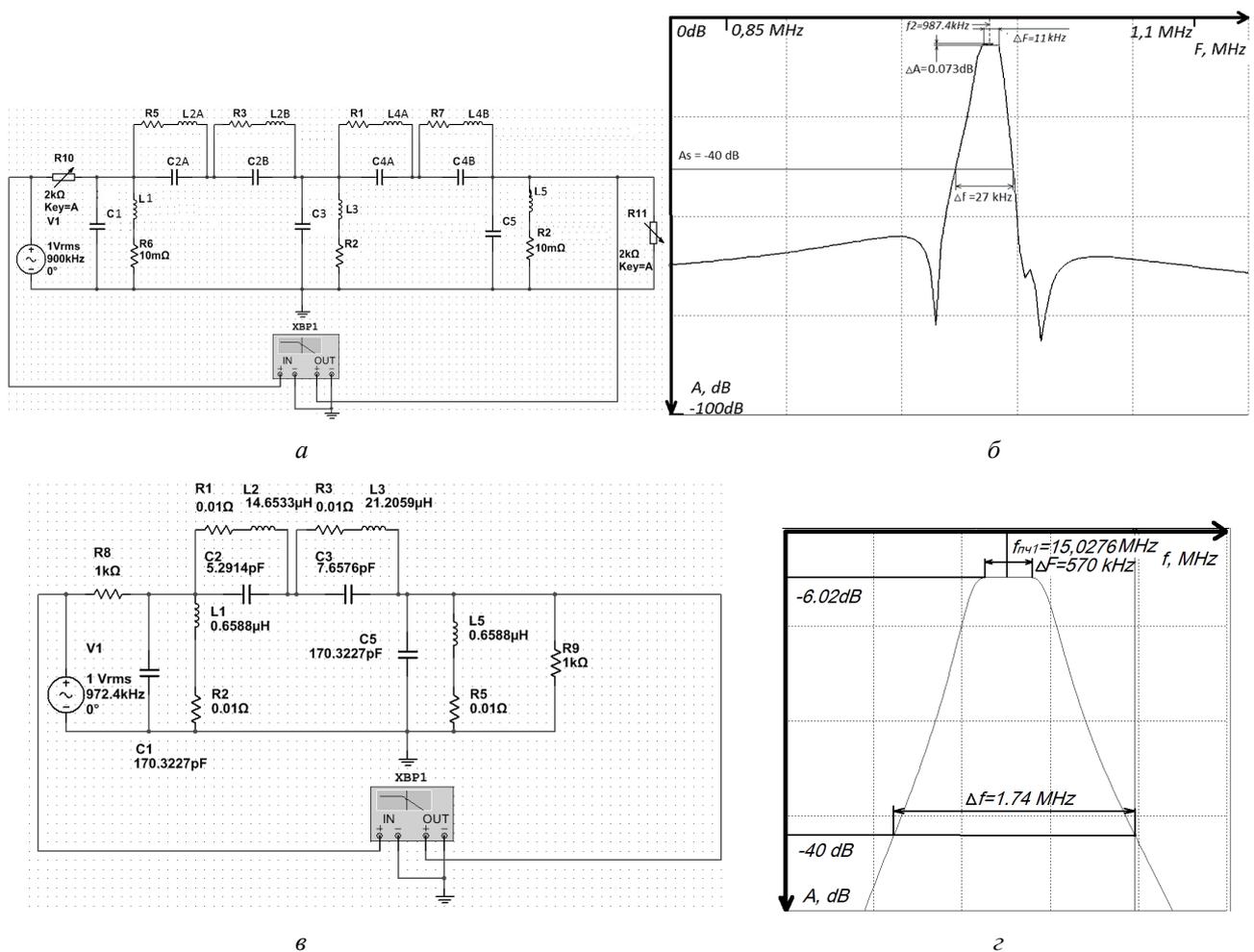


Рис. 12 – Пример моделирования полосовых фильтров: а, б – схема и АЧХ фильтра в составе смесителя СМ1; в, г – схема и АЧХ фильтра в составе смесителя СМ2

Функционирование устройства контроля. Для проведения контроля узлов радара НР осуществляется подключение к контролируемому узлу соответствующего выхода устройства контроля. Вводятся в ПК входные данные (тип сигнала, его характеристики – напряжение, длительность, задержка по отношению к ИЗП, для гармонического сигнала – частота, для случайного сигнала с равномерным спектром – ширина спектра и имитируемое доплеровское смещение, для сигнала-аналога НР сигналу – значения имитируемых температур ионов и электронов, скорости движения плазмы, длительности зондирующего импульса). При использовании сигнала на несущей частоте дополнительно устанавливается необходимое ослабление регулируемого аттенюатора (до проведения контроля ослабление максимальное). В случае контроля с использованием имитируемого НР сигнала его спектр рассчитывается автоматически с учетом длительности зондирующего радиоимпульса в соответствии с выражениями, представленными в [24, 26].

Выводы. Разработанное устройство формирования сигналов для тестирования радиотехнических систем радара НР позволяет:

- оперативно контролировать точность определения параметров ионосферы, таких как температуры ионов и электронов, скорость движения ионосферной плазмы;

- контролировать такие параметры систем радара, как амплитудную и фазовую стабильность параметров приемно-обрабатывающего тракта (как долговременную, так и на протяжении радиолокационной развертки), чувствительность и амплитудно-частотную характеристику РПрУ, точность установки фазового сдвига при формировании квадратурных сигналов и др.;

- тестировать и оптимизировать алгоритмы и программы обработки сигнала.

Предложенное устройство контроля позволяет осуществлять оперативный контроль систем радара как при подготовке к ионосферным измерениям, значительно сокращая время на нее, так и в период измерений. Оно может использоваться в качестве лабораторного макета в учебном процессе.

Список литературы

1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139–175.
2. Емельянов Л. Я. Влияние характеристик зондирующего сигнала и радиоприемного тракта на точность измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Физические аспекты современных технологий. Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 103. – С. 34–38.
3. Емельянов Л. Я. Оптимизация приема и обработки НР сигнала для повышения точности определения скорости переноса ионосферной плазмы / Л. Я. Емельянов // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – № 35. – С. 79–84.
4. Емельянов Л. Я. Контроль поляризации и стабильности параметров радара некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов,

- И. Б. Скляр, С. В. Черняев, А. А. Полеткин // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. трудов. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2001. – № 4. – С. 85–88.
5. Емельянов Л. Я. Обеспечение достоверности определения скорости дрейфа ионосферной плазмы методом некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, И. Б. Скляр // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2003. – № 7, т. 4. – С. 35–40.
6. Emel'yanov L. Ya. Incoherent Scatter Measurement of the Electron Density Altitude Profiles / L. Ya. Emel'yanov // Geomagnetism and Aeronomy, – 2002, – V 42, N 1, – P. 109–113.
7. Скляр И. Б. Устройство формирования контрольного сигнала радара некогерентного рассеяния / И. Б. Скляр // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 117–119.
8. Лысенко В. Н. Синтез модели НР-сигнала / В. Н. Лысенко // Вестн. Харьк. политехн. ин-та: Исследование ионосферы методом НР. – 1987. – № 248. – Вып. 5. – С. 21–24.
9. Цуркан А. В. Учет влияния антенного коммутатора на определение параметров ионосферы / А. В. Цуркан // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Физические аспекты современных технологий. Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 103. – С. 113–115.
10. Богомаз А. В. Программно-аппаратный комплекс для имитации некогерентно рассеянного сигнала / А. В. Богомаз, Д. А. Искра // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Серия: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – № 33 (1066) – 2013. – С. 3–7.
11. Лысенко В. Н. Имитация НР-сигнала / В. Н. Лысенко, А. А. Капустян, А. В. Бруско // Вестн. Харьк. политехн. ин-та: Исследование ионосферы методом НР. – Харьков: ХПИ, 1986. – № 234, Вып. 4. – С. 60–64.
12. Скляр И. Б. Синтез фильтров для получения шумоподобного сигнала, имитирующего некогерентно рассеянный сигнал / И. Б. Скляр // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Физические аспекты современных технологий. Сб. научн. тр. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 103. – С. 107–109.
13. Богомаз А. В. Моделирование случайного сигнала с заданной спектральной плотностью мощности / А. В. Богомаз // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Автоматика и приборостроение. – Харьков. – 2009. – № 23 – С. 29–32.
14. Лялюк А. И. Исследование цифровых имитаторов сигнала некогерентного рассеяния / А. И. Лялюк, Е. В. Рогожкин // Международная научная конференция MicroCAD: Секція № 17 – Навколоземний космічний простір. Радиофізика та іоносфера. Тез. докл. – НТУ «ХПИ». – 2009. – С. 175.
15. Рогожкин Е. В. Анализ возможности контроля результатов ионосферных измерений при НР / Е. В. Рогожкин, Д. П. Белозеров // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Серия: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – № 9, т. 5. – С. 61–64.
16. Dominin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Dominin, Ya. M. Cherpurnyy, L. Ya. Emelyanov [et al.] // Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2014. – No 47 (1089). – P. 28–42.
17. Емельянов Л. Я. Минимизация погрешностей измерения скорости движения ионосферной плазмы / Л. Я. Емельянов, И. Б. Скляр // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2002. – № 9, т. 5. – С. 29–33.
18. Емельянов Л. Я. Радиоприемное устройство радара некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999. – Вып. 31. – С. 108–112.
19. Dominin I. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar eclipse / I. F. Dominin, L. Ya. Emelyanov, L. F. Chernogor // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2012. – V. 3, No. 4. – P. 311–324. DOI: 10.1615/RadiophysicsRadioAstronomy.v3.i4.50.
20. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of

- the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / A. V. Bogomaz, D. V. Kotov // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Серия: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37.
21. Yemelyanov L. Ya. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination / L. Ya. Yemelyanov, D. A. Dzyubanov // Telecommunications Radio Engineering. – 2007. – V. 66, No. 14. – P. 1313–1327).
 22. Богомаз А. В. Моделирование некогерентно рассеянного сигнала и высотного распределения его параметров / А. В. Богомаз // Вестн. Нац. техн. ун-та «Харьковский политехнический институт»: Сб. научн. тр. Тематический выпуск: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – № 48 – С. 72–76.
 23. Un Developments Seen, 2016. – Режим доступа: <http://www.un4seen.com/> – Дата обращения 30 сентября 2016.
 24. Емельянов Л. Я. Квазиоптимальный прием сигналов некогерентно рассеяния / Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, И. М. Касымов // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015, № 37 (1146). – С. 79–86.
 25. SA612A Double-balanced mixer and oscillator // Product data sheet. Rev. 3–4 June 2014. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SA612A.pdf.
 26. Гринченко С. В. Оптимальный алгоритм многократных вычислений теоретических характеристик некогерентно рассеянного сигнала / С. В. Гринченко // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. Сб. научн. тр. – Харьков, 1999.– Вып. 7. – С. 331–336.

References (transliterated)

1. Jevans, Dzh. V. “Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln” [Theory and practice of Thompson scatter]. *TILJeR* [Proc. IEEE]. vol. 57, no. 4, pp. 139–175.
2. Emel'yanov L. Ya. Vliyanie kharakteristik zondiruyushchego signala i radiopriemnogo trakta na tochnost' izmereniya skorosti dreyfa ionosfernoy plazmy metodom nekogerentnogo rasseyaniya [Influence of the characteristics of sounding signal and radio receiver path on the accuracy of ionosphere plasma drift velocity measurements by incoherent scatter technique]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Fizicheskie aspekty sovremennykh tekhnologiy. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University: Physical Aspects of Modern Technologies.]. Kharkiv, KhSPU, 2000, issue 103, pp. 34–38.
3. Emel'yanov L. Ya. Optimizatsiya priema i obrabotki NR signala dlya povysheniya tochnosti opredeleniya skorosti perenos ionosfernoy plazmy [Optimization of reception and processing IS signal for improving accuracy of the ionospheric plasma drift velocity determination]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2005, no. 35, pp. 79–84.
4. Emel'yanov L. Ya., Sklyarov I. B., Chernyaev S. V., Poletkin A. A. Kontrol' polyarizatsii i stabil'nosti parametrov radara nekogerentnogo rasseyaniya [Testing of polarization and stability of incoherent scatter radar parameters]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2001, no. 4, pp. 85–88.
5. Emel'yanov L. Ya., Sklyarov I. B. Obespechenie dostovernosti opredeleniya skorosti dreyfa ionosfernoy plazmy metodom nekogerentnogo rasseyaniya [Ensuring the reliability of the ionosphere plasma drift velocity determination by the incoherent scatter technique]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Tematicheskiiy vypusk: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Thematic issue: Radiophysics and Ionosphere.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2003, no. 7, vol. 4, pp. 35–40.
6. Emel'yanov L. Ya. Incoherent Scatter Measurement of the Electron Density Altitude Profiles. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2002, vol. 42, no. 1, pp. 109–113.
7. Sklyarov I. B. Ustroystvo formirovaniya kontrol'nogo signala radara nekogerentnogo rasseyaniya [Device for generation of test signal of the incoherent scatter radar]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University.]. Kharkiv, KhSPU, 1999, issue 31, pp. 117–119.
8. Lysenko V. N. Sintez modeli NR-signala [Synthesis of IS signal model]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta: Issledovanie ionosfery metodom NR* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute: Investigation of the Ionosphere by IS Technique]. Kharkov, 1987, no. 248, issue 5, pp. 21–24.
9. Tsurkan A. V. Uchet vliyaniya antennogo kommutatora na opredelenie parametrov ionosfery [Accounting antenna switch effect on determination ionospheric parameters]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Fizicheskie aspekty sovremennykh tekhnologiy. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University.]. Kharkiv, KhSPU, 2000, issue 103, pp. 113–115.
10. Bogomaz A. V., Iskra D. A. Programmo-apparatnyy kompleks dlya imitatsii nekogerentno rasseyanogo signala [Hardware-software complex for simulating incoherent scatter signal]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Seriya: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2013, no. 33 (1066), pp. 3–7.
11. Lysenko V. N., Kapustyan A. A., Brusko A. V. Imitatsiya NR-signala [Simulation of IS signal]. *Vestn. Khar'k. politekhn. in-ta: Issledovanie ionosfery metodom NR* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute: Investigation of the Ionosphere by IS Technique]. Kharkov, 1986, no. 234, issue 4, pp. 60–64.
12. Sklyarov I. B. Sintez fil'trov dlya polucheniya shumopodobnogo signala, imitiruyushchego nekogerentno rasseyanyy signal [Synthesis of filters for generation of the noise-like signal, simulating incoherent scatter signal]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Fizicheskie aspekty sovremennykh tekhnologiy. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University.]. Kharkiv, KhSPU, 2000, issue 103, pp. 107–109.
13. Bogomaz A. V. Modelirovanie sluchaynogo signala s zadannoy spektral'noy plotnost'yu moshchnosti [Simulation of random signal with predetermined power spectral density]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Avtomatika i priborostroenie* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Automatics and Instrument Engineering.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2009, no. 23, pp. 29–32.
14. Lyalyuk A. I., Rogozhkin E. V. Issledovanie tsifrovyykh imitatorov signala nekogerentnogo rasseyaniya [Research of digital simulators of incoherent scatter signal]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya MicroCAD: Sektsiya № 17 – Navkolozemniy kosmichniy prostir. Radiofizika ta ionosfera. Tez. dokl.* [International Scientific Conference MicroCAD: Section 17 – Near-Earth Space Environment. Radiophysics and Ionosphere. Abstracts.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2009, p. 175.
15. Rogozhkin E. V., Belozherov D. P. Analiz vozmozhnosti kontrolya rezul'tatov ionosfernykh izmereniy pri NR [Analysis of the possibility of testing the results of ionospheric measurements with IS technique]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Seriya: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2002, no. 9, vol. 5, pp. 61–64.
16. Domnin I. F., Chepurnyy Ya. M., Emelyanov L. Ya. et al. Kharkiv Incoherent Scatter Facility. *Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute». Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere.* Kharkiv, NTU “KhPI”, 2014, no. 47 (1089), pp. 28–42.
17. Emel'yanov L. Ya., Sklyarov I. B. Minimizatsiya pogreshnostey izmereniya skorosti dvizheniya ionosfernoy plazmy [Minimization of errors in the ionospheric plasma drift velocity measurement]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Tematicheskiiy vypusk: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Thematic issue: Radiophysics and Ionosphere.]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2002, no. 9, vol. 5, pp. 29–33.
18. Emel'yanov L. Ya. Radiopriemnoe ustroystvo radara nekogerentnogo rasseyaniya [Radio receiving device of the incoherent scatter radar]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University.]. Kharkiv, KhSPU, 1999, issue 31, pp. 108–112.
19. Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Chernogor L. F. Dynamics of the ionospheric plasma above Kharkiv during the January 4, 2011 solar

- eclipse. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2012, vol. 3, no. 4, pp. 311–324.
20. Bogomaz A. V., Kotov D. V. Paket programm novogo pokoleniya dlya obrabotki dannykh radarov nekogerentnogo rasseyaniya Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) [New generation software package for incoherent scatter radar data processing “Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE)”]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Seriya: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2013, no. 28 (1001), pp. 29–37.
 21. Yemelyanov L. Ya., Dzyubanov D. A. The Peculiarities of Mid-Latitude Ionosphere Plasma Drift Velocity Determination. *Telecommunications Radio Engineering*. 2007, vol. 66, no. 14, pp. 1313–1327.
 22. Bogomaz A. V. Modelirovanie nekogerentno rasseyannogo signala i vysotnogo raspredeleniya ego parametrov [Simulation of the incoherent scatter signal and altitude distribution of its parameters]. *Vestn. Nats. tekhn. un-ta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»: Sb. nauchn. tr. Tematicheskiiy vypusk: Radiofizika i ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI", 2010, no. 48, pp. 72–76.
 23. Un Developments Seen, 2016. – Rezhim dostupa [Access mode]: <http://www.un4seen.com/> – Data obrashcheniya 30 sentyabrya 2016 (Accessed 30.09.2016).
 24. Emelyanov L. Ya., Bogomaz A. V., Kasymov I. M. Kvazioptimal'nyy priem signalov nekogerentnogo rasseyaniya [Quasioptimal reception of the incoherent scatter signals]. *Vestn. Nats. tekhn. in-tu «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut». Zbirnyk naukovikh prats'. Seriya: Radiofizyka ta ionosfera* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Radiophysics and Ionosphere]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2015, no. 37 (1146), pp. 79–86.
 25. SA612A Double-balanced mixer and oscillator // Product data sheet. Rev. 3–4 June 2014. http://www.nxp.com/documents/data_sheet/SA612A.pdf.
 26. Grinchenko S. V. Optimal'nyy algoritm mnogokratnykh vychisleniy teoreticheskikh kharakteristik nekogerentno rasseyannogo signala [Optimal algorithm for multiple calculations of theoretical characteristics of the incoherent scatter signal]. *Vestn. Khar'k. gos. politekhn. un-ta. Sb. nauchn. tr.* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI", 1999, issue 7, pp. 79–86.

Поступила (received) 30.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Пристрій формування сигналів для контролю радару некогерентного розсіяння / Л. Я. Ємельянов, О. В. Богомаз, Б. Р. Бравічев // – Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – X. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 84–94. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-9998.

Устройство формирования сигналов для контроля радару некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, Б. Р. Бравічев // Вестник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Харьков : НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 84–94. – Библиогр.: 26 назв. – ISSN 2078-9998.

Device for generation of signals for testing the incoherent scatter radar / L. Ya. Emelyanov, O. V. Bogomaz, B. R. Bravichev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 84–94. – Bibliogr.: 26. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ионосферы, заведующий отделом, г. Харьков; тел.: 706-22-87; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

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

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

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

Bogomaz Oleksandr Viktorovych – Candidate of Technical Sciences, Institute of Ionosphere, Senior research scientist, Kharkiv; тел.: 706-22-87; e-mail: albom85@yandex.ru.

Бравічев Богдан Романович – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, кафедра “Радіоелектроніка”, магістр, м. Харків; тел. (067) 134-07-70; e-mail: ur6lln@mail.ru.

Бравічев Богдан Романович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра «Радиоэлектроника», магистр, г. Харьков; тел. (067) 134-07-70; e-mail: ur6lln@mail.ru.

Bravichev Bogdan Romanovich – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Department ‘Radioelectronics’, Master, Kharkiv; тел.: (067) 134-07-70; e-mail: ur6lln@mail.ru.

СОДЕРЖАНИЕ

Пуляев В.О., Рогожкін Є.В. Покращання висотного розрізнення в максимумі іонізації при цифровій обробці сигналу некогерентного розсіяння	3
Кацко С.В., Емельянов Л.Я., Черногор Л.Ф. Наблюдение ионосферных эффектов над Харьковом в течение фазы релаксации геомагнитной бури 14–17 марта 2016 г.....	8
Левон О.О., Токарев О.О. Розробка програмної оболонки для моделювання та дослідження електронних систем.....	13
Брезгунов А.В. Вычисление амплитуды и начальной фазы высокочастотного колебания узкополосного радиоимпульса	17
Брезгунов А.В., Брезгунов С.А. Фильтрация электрических сигналов с помощью шума	21
Гринченко С.В. Общее решение уравнения движения заряженной частицы в скрещённых магнитном и электрическом полях.....	27
Гринченко С.В. Настройка ввода-вывода русского текста в консольных приложениях Visual C++ 2010.....	34
Гринченко С.В., Дзюбанов Д.А. Влияние структуры магнитного поля Земли на теоретический расчёт скорости движения плазмы, индуцированного ветром нейтральной среды	41
Ляшенко М.В., Ляшенко Н.С. Эффекты сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах цикла солнечной активности	49
Шульга М.А. Исследование вариаций относительной концентрации ионов водорода во внешней ионосфере в период максимума солнечной активности по данным метода некогерентного рассеяния	58
Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Реакция ионосферы на солнечное затмение 20 марта 2015 г. над Харьковом.....	63
Аксёнова Е.Д., Панасенко С.В. Сезонные вариации параметров волновых процессов в ионосфере по данным харьковского радара некогерентного рассеяния	73
Щирый А.О. Развитие программного обеспечения вторичной обработки данных дистанционного наземного радиозондирования ионосферы	78
Емельянов Л.Я., Богомаз А.В., Бравичев Б.Р. Устройство формирования сигналов для контроля радара некогерентного рассеяния.....	84

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Радіофізика та іоносфера

№ 34 (1206) 2016

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

Відповідальний та технічний редактор: к.ф.-м.н., с.н.с. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, м. Харків, МСП, вул. Кирпичова, 16
Інститут іоносфери НАН та МОН України
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail*: iion@kpi.kharkov.ua

Обл.-вид. № 25-16.

Підписано до друку 07.11.2016 р. Формат 21×29,7 1/8.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 5,67. Наклад 300 прим. Зам. № 2249.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 21

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРИНТ»
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Багалия, 16