

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

ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»

Серія: Радіофізика та іоносфера

№ 37 (1146) 2015

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків
НТУ «ХПІ», 2015

ISSN 2078-9998

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 37 (1146). – 112 с.

Державне видання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України

КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська.

Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р., № 1 – 05/4 (Бюлетень ВАК України, № 6, 2010 р., с. 3, № 20).

Координаційна рада:

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.; Є. І. СОКОЛ, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. 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. СПІФАНОВ, 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. А. 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

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)**.*

Випуск видано за підтримки гранту СРЕА-2012/10021 “Норвезько-українське співробітництво, спрямоване на стійкий розвиток освітнього процесу при дослідженні навколоземного космічного простору”.

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 8 від 18 вересня 2015 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2015

УДК 628.396

Д. В. ШАПОВАЛОВА, В. А. ПУЛЯЕВ

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ПО ДАННЫМ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Рассмотрен вариант реализации процедуры расчета суточного распределения критических частот слоя F2 ионосферы по константе радара некогерентного рассеяния. Из-за флуктуаций значений константы производится ее предварительное уточнение путем анализа уровня фонового шума на антенном входе радара. Достоверность расчета критических частот подтверждается нахождением реперных точек, для расчета которых используется поиск критической частоты по углу поворота плоскости поляризации излучаемой радиоволны.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, константа радара, критическая частота, фоновые шумы радара, поляризация радиоволны.

Введение. В процессе исследования ионосферы, когда необходимо проводить расчет ее параметров [1], важное место занимают сведения о состоянии среды в максимуме ионизированного слоя. Одной из характеристик в этом случае является величина критической частоты f_oF2 , процедуре расчета которой посвящен материал данной статьи.

Анализ состояния вопроса. Сведения о критической частоте нужны, в частности, для получения информации о высотном распределении электронной концентрации $N_e(h)$. Это распределение в виде профиля можно получить, привязывая изменение мощности сигнала рассеяния $P_C(h)$ с высотой, полученное радаром некогерентного рассеяния (НР), к абсолютному значению электронной концентрации в точке максимума слоя F2, которое напрямую связано с критической частотой f_oF2 этого слоя [2]. Критическую же частоту выдает ионосферная станция – ионозонд, функционирующий поблизости от радара НР.

Анализ проблемы. Практика ионосферных измерений показывает, что, излучая собственные сигналы в довольно широком диапазоне частот, ионозонд во время своей работы нередко создает дополнительные помехи, мешающие работе высокочувствительных (доли микровольт) радиоприемных систем радара НР. Кроме того, при появлении ионосферных возмущений и магнитных бурь, при возникновении спорадических слоев (экранировке слоя F2 слоями E_S или F1) весьма сложно получить точное значение критической частоты. В этом случае используется подход, когда задействуются сведения о константе C , или величине [2]

$$C = \frac{P_C(h_{F2}) \cdot h_{F2}^2 \cdot [1 + T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{N_{eF2}}, \quad (1)$$

зависящей от параметров конкретного радара НР и отражающей состояние его основных технических систем. Здесь N_{eF2} – электронная концентрация в максимуме слоя F2 (на высоте h_{F2}), полученная ионозондом; $P_C(h_{F2})$, $T_e(h_{F2})$ и $T_i(h_{F2})$ – мощность сигнала рассеяния, электронная и ионная температуры плазмы, полученные радаром НР.

Казалось бы, используя эти данные, без особых проблем можно применять выражение вида [2]

$$f_oF2 = \sqrt{\frac{P_C(h_{F2}) \cdot (h_{F2})^2 \cdot [1 + T_e(h_{F2})/T_i(h_{F2})]}{1,24 \cdot 10^{10} \cdot C}} \quad (2)$$

для нахождения критической частоты для конкретного момента проведения эксперимента.

Но как показывает практика проведения экспериментов, трудно поддерживать условия, способствующие неизменности величины константы, т.к. имеет место [3] нестабильность параметров технических систем радара НР. К примеру, в этом повинны колебания питающего напряжения, изменения температуры окружающей среды, нагрев и охлаждение систем антенно-фидерного тракта и др., в результате чего константа меняет свое значение и приходится периодически ее уточнять, включая ионозонд.

Существующие методы решения задачи. Известен один из вариантов [4] алгоритмического подхода к уточнению константы, когда не используется ионозонд, а анализируется информация об уровне шумов $P_{\text{ТЕК}}(t)$ на входе приёмника, в частности тех его составляющих [3], которые связаны с космическим фоновым излучением и отражениями от поверхности Земли, принятые боковыми лепестками диаграммы направленности антенны.

Цель работы. Цель этой статьи заключается в проверке работоспособности алгоритмов уточнения значений константы $C_{\text{ЭТ}}$ радара НР за счет использования информации об изменении мощности шума на входе радара и последующем расчете уже по новой константе $C_{\text{ТЕК}}$ значений критической частоты.

Результаты численного моделирования. В работах [5, 6] описана алгоритмическая процедура, реализованная операторами языка FreeBASIC, в которой для уточнения константы до ее новых значений $C_{\text{ТЕК}}$ предложено проводить сравнение суточного распределения уровня шума $P_{\text{ТЕК}}(t)$, полученного в текущее время работы радара НР, с эталонными значениями шума $P_{\text{ЭТ}}(t)$, использованными при расчете константы $C_{\text{ЭТ}}$ в предыдущие периоды работы, по формуле

$$C_{\text{ТЕК}} = \frac{C_{\text{ЭТ}}}{k_0} \left[1 - \frac{k_0 \cdot d_0}{P_-} \right], \quad (3)$$

где P_- – составляющая уровня шума, зафиксированная во время определения константы $C_{\text{ЭТ}}$ при выключенном передатчике радара НР; k_0 и d_0 – значения масштабирующих переменных, полученных в процедурах сопоставления суточного распределения значений текущего и эталонного шумов.

© Д. В. Шаповалова, В. А. Пуляев, 2015

Согласно этой процедуре, для одного из дней работы радара НР Института ионосферы по исследованию параметров ионосферы, который

состоялся 16.10.2014 г., было проведено уточнение текущего значения константы $C_{\text{ТЕК}}$.

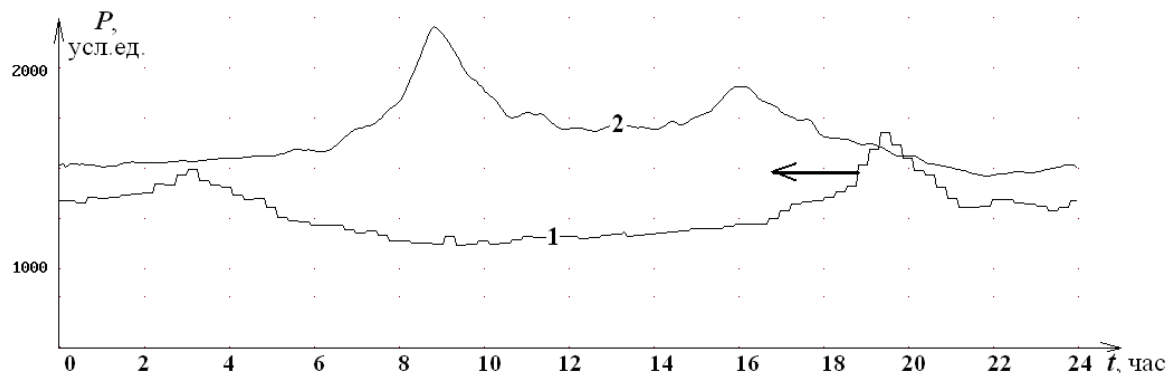


Рис. 1 – Положение профилей суточного распределения уровней фонового шума в текущий (линия 1) и эталонный дни перед началом сопоставления. Стрелкой показано направление циклического сдвига профиля шума текущего дня до совпадения положений максимумов и минимумов по горизонтали

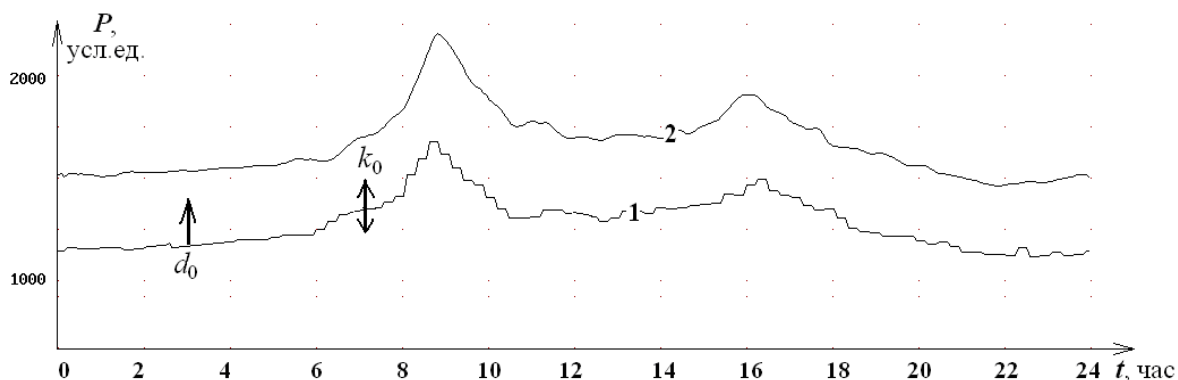


Рис. 2 – Положение профилей суточного распределения уровней фонового шума в текущий и эталонный дни перед началом их сопоставления по вертикали. Показано направление процедуры подъема (добавлением слагаемого d_0) первого графика и изменения его масштаба (вводом множителя k_0) до совпадения линий по вертикали

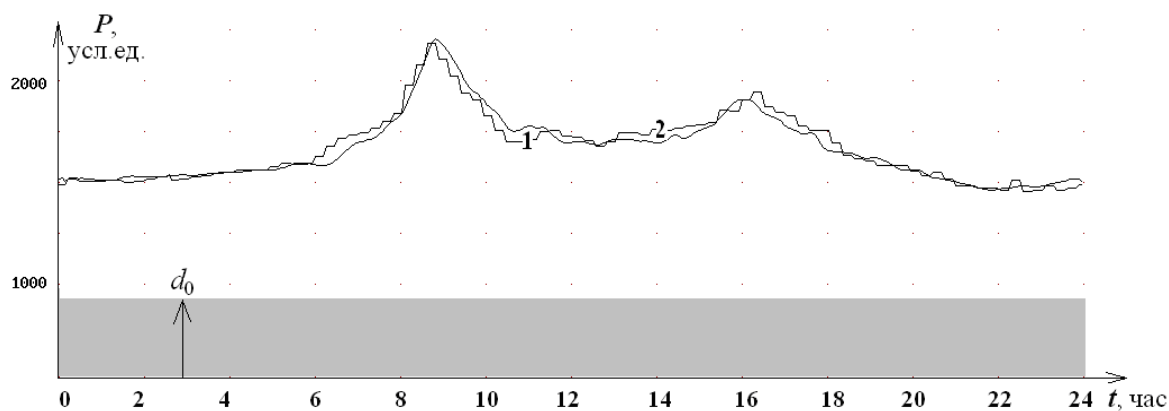


Рис. 3 – Результаты совпадения уровней шумов в текущий и эталонный дни. Результаты сопоставления следующие: составляющая $d_0 = 420$, а множитель $k_0 = 1.4$.

Для уточнения было использовано эталонное значение уровня шума $P_{ЭТ}(t)$, полученное радаром НР в течение нескольких суток в мае 2006 г. [4], которое на рис. 1–3 представлено усредненной линией 2. Текущее значение уровня шума $P_{ТЕК}(t)$ для дня проведения эксперимента 16.10.2014 г. в это время представляет линия 1.

Согласно предложенному алгоритму, первоначально была смоделирована процедура сдвига линии 1 до момента совпадения положений наиболее характерных участков двух профилей – их минимумов и

максимумов – вдоль горизонтали (рис. 1), а затем уже – процедура совмещения линий по вертикали (рис. 2).

Как можно видеть, для получения требуемого совмещения (рис. 3) были использованы масштабные коэффициенты k_0 и d_0 , которые и дают возможность по формуле (3) уточнить значение $C_{ТЕК}$. Поставив же его в выражение (2), находятся (рис. 4) критические частоты $f_0F2(t)$ (в данном случае – для каждого 15-минутного сеанса).

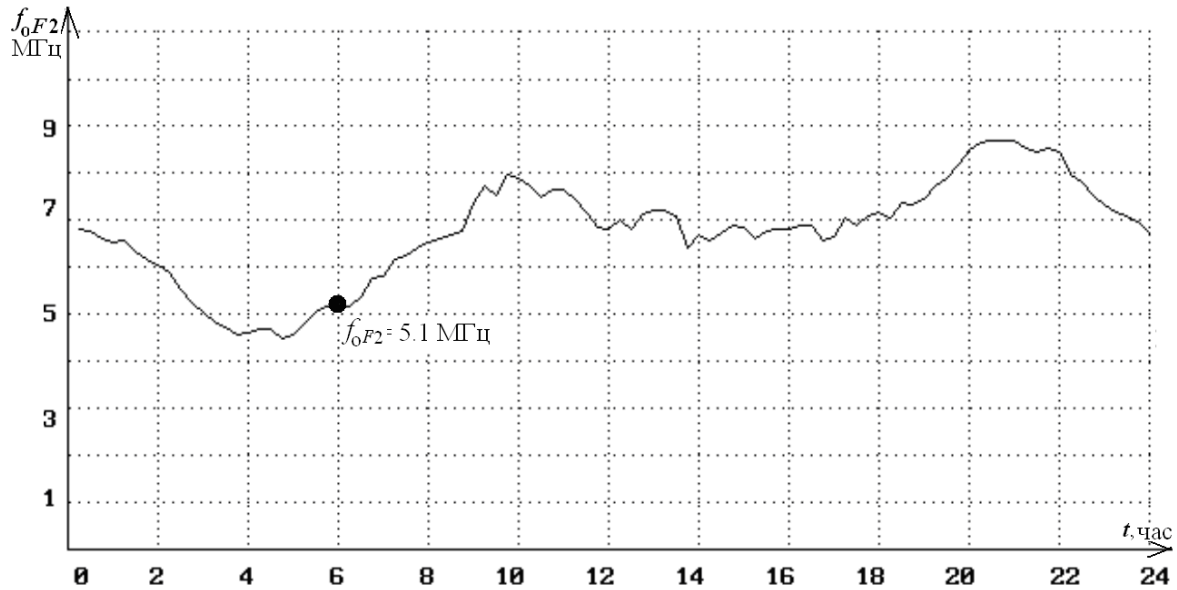


Рис. 4 – Суточное распределение значений критических частот, полученное с помощью радара НР. Точкой отмечено значение критической, полученной по углу поворота плоскости поляризации зондирующей радиоволны

Для того чтобы проверить достоверность работы данного алгоритма, в работе было осуществлен поиск критической в виде реперной точки, что подтвердило бы точность найденных выше значений. Суть поиска такова.

Как известно, одним из источников информации о критической частоте, является величина поворота плоскости поляризации распространяющейся в ионосфере радиоволны, когда поворот определяется при наличии фарадеевского вращения [4]. Для реализации этого метода требуется линейная поляризация зондирующего сигнала и контроль степени поляризации при приеме сигнала рассеяния.

Один из вариантов определения f_0F2 заключается в следующем. Угол поворота плоскости на 90° берется

из анализа уровня мощности $P_C(h)$ сигнала, полученного, например, после излучения импульса и с круговой поляризацией, но принятого на линейно-поляризованную антенну (рис. 5). Для этого случая существует упрощенная формула [6]

$$f_0F2(\text{МГц}) \approx \sqrt{\frac{3380}{2\Delta h(\text{км})}}, \quad (4)$$

которая в нашем случае ($2\Delta h = 130$ км) для утреннего времени 6^{00} даст значение $f_0F2 = 5.1$ МГц, вполне совпадающее с рассчитанным по константе значением для данного момента времени (рис. 4).

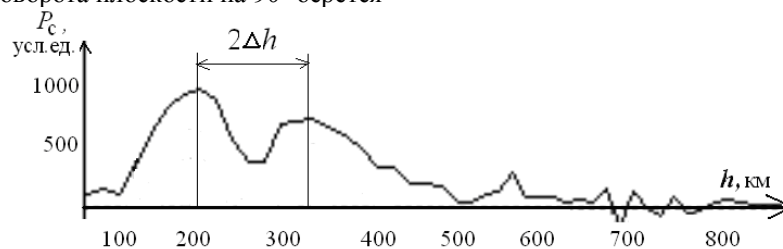


Рис. 5 – Метод получения значения критической частоты в максимуме слоя F2 по углу поворота плоскости поляризации зондирующей радиоволны

Выводы. В статье приведено описание вычислительных подходов, которые включают в себя процедуры получения суточного распределения критических частот $f_oF2(h)$ слоя F2 ионосферы в случае отсутствия сведений, получаемых через заданные промежутки времени (обычно через 15 мин) со станции вертикального зондирования – ионозонда. Согласно этим процедурам, в работе используются сведения о константе радара некогерентного рассеяния.

В то же время отмечается, что указанная константа может менять свои значения из-за “ухода” технических характеристик аппаратуры радара. В случае наличия таких флуктуаций рекомендуется проводить предварительное уточнение константы путем анализа уровня фоновых шумового потока, фиксируемого его приемной антенной. При этом алгоритм предусматривает сравнение графических линий $P_{Эт}(t)$ и $P_{ТЕК}(t)$, представляющих собой распределения шумов вдоль времени суток в эталонный и текущий дни проведения ионосферных измерений. Так как шумы включают в себя несколько составляющих, изменением масштабных коэффициентов при них можно варьировать форму и положение линий.

В статье показано, что достоверность расчета критических частот с использованием таких процедур подтверждается путем нахождения реперных (опорных) точек, которые можно рассчитать с помощью профиля мощности. Для их получения используется анализ угла поворота плоскости поляризации излучаемой радиоволны, если имеется возможность фиксировать мощность сигнала рассеяния независимо в каждом из приемных квадратурных каналов.

Еще одним из достоинств такой обработки является быстрое заполнение пробелов (разрывов) на суточном распределении $f_oF2(h)$, если количество этих пробелов значительное и нет возможности для проведения их аналитической интерполяции.

Список литературы. 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. Пуляев В. А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В. А. Пуляев, Д. А. Дзюбанов, И. Ф. Домнин. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2011. – 240 с. 3. Головин В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода НР. Сообщение 2. Аппаратурные и методические особенности / В. И. Головин, В. Рогожкин, В. И. Таран // Вестн. ХПИ : Исследования ионосферы методом НР. – Харьков : ХПИ, 1979. – №155, вып. 1. – С. 12–22. 4. Пуляев В. О. Обчислювальні процедури при аналізі некогерентного розсіяння в іоносферній плазмі : монографія / В. О. Пуляев, С. В. Рогожкін, О. В. Богомаз / – X. : НТУ “ХПІ”, 2014. – 272 с. 5. Shapovalova D. V. Refinement of the incoherent scatter radar constant / D. V. Shapovalova, V. A. Pulyayev // Bulletin of the NTU “KhPI”. Scientific Papers. Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, №47 (1089) – P. 5–9. 6. Шаповалова Д. В. Уточнение константы радара некогерентного рассеяния / Д. В. Шаповалова, В. А. Пуляев // XXII Міжн. наук.-практ. конф.: Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я. (MicroCAD-2014) (Харків, Україна, 15–17 жовтня 2014 р.). Збірн. тез доповідей. Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера. Харків: НТУ “ХПІ”. – 2014. – Ч. III. – С. 247.

Bibliography (transliterated): 1. Evans Dzh. V. *Teoreticheskie i prakticheskie voprosy issledovaniya ionosfery metodom NR radiovoln* / Dzh. V. Evans // TIIEER. 1969. Vol. 57, No. 4. P. 139-175. 2. Pulyayev V.A., Dzyubanov D.A., Domnin I.F. *Opredelenie parametrov ionosfery metodom nekoherentnogo rasseyaniya radiovoln: monografiya* // Kharkov: NTU “KhPI”, 2011. 240 p. 3. Holovin V.I., Rohozhkin E.V., Taran V.I. *Nablyudeniya ionosfery s pomoshch'yu metoda NR. Soobshchenie 2. Apparaturnye i metodicheskie osobennosti* // Vestn. KhPI : Issledovaniya ionosfery metodom NR. Kharkov : KhPI, 1979. – No. 155, iss. 1. P. 12-22. 4. Pulyayev V.O., Rohozhkin Ye.V., Bohomaz O.V. *Obchyslyval'ni protsedury pry analizi nekoherentnogo rozsiyannya v ionosferniy plazmi: monografiya* // Kharkov: NTU “KhPI”, 2014. 272 s. 5. Shapovalova D.V., Pulyayev V.A. *Refinement of the incoherent scatter radar constant* // Bulletin of the NTU “KhPI”. Scientific Papers. Series: Radiophysics and ionosphere. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2014, No. 47 (1089). P. 5-9. 6. Shapovalova D.V., Pulyayev V.A. *Utochnenie konstanty radara nekoherentnogo rasseyaniya* // XXII Mizhn. nauk.-prakt. konf.: Informatsiyeni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. (MicroCAD-2014) (Kharkiv, Ukrayina, 15–17 zhovtnya 2014 r.). Zbirn. tez dopovidey. Sektsiya 17. Navkolozemnyy kosmichnyy prostir. Radiofizyka ta ionosfera. Kharkiv: NTU “KhPI”. 2014. Ch. III. P. 247.

Поступила (received) 05.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаповалова Дар'я Валеріївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студентка; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Шаповалова Дарья Валерьевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студентка; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Shapovalova Daria Valeriivna – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student; tel.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Пуляев 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; tel.: (057) 707-62-21; e-mail: pulyayev@kpi.kharkov.ua

УДК 550.388.1:621.396.969

Я. Н. ЧЕПУРНЫЙ, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, Д. А. ИСКРА**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОМЕХ ОТ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И ОЦЕНКА ИХ ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ**

Проведен анализ помех, создаваемых отражениями от летательных аппаратов на расстоянии до 400 км и принимаемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны радара некогерентного рассеяния. Определены условия, при которых могут возникать помехи от летательных аппаратов, находящихся на высоте около 10 км над поверхностью земли. Приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние указанных помех на результаты ионосферных измерений.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, измерение ионосферных параметров, отражения от летательных аппаратов.

Введение. Радар некогерентного рассеяния (НР) Института ионосферы (г. Харьков) оснащен неподвижной антенной зенитной ориентации диаметром 100 м (НДА-100). При проведении измерений параметров ионосферной плазмы методом НР уровень рассеянного ионосферой сигнала, как правило, соизмерим с уровнем собственных шумов системы. Отражения от объектов, попадающих в диаграмму направленности (ДН) антенны на удалении от 100 до 3000 км являются помехами, оказывающими влияние на достоверность ионосферных измерений. К таким объектам относятся техногенные космические объекты (в том числе, космический мусор), а также, при некоторых условиях, летательные аппараты.

Помехи от космических объектов, имеющих, как правило, небольшие габариты возникают в результате приёма отражений главным и первыми боковыми лепестками ДН. Из-за космической скорости объектов помехи имеют продолжительность в единицы секунд.

Пример такого отражения на дальности около 1700 км приведен на рис. 1. Здесь, на левом графике, по оси абсцисс – время (номера дискретных отсчетов, следующих через 41 мс, длительность сеанса измерений в 1 мин соответствует 1464 отсчетам), по оси ординат – амплитуда сигнала. На правом графике по оси абсцисс – мощность принимаемого сигнала, по оси ординат – дальность в километрах. Легко определить, что время наблюдения отражения составило около восьми секунд.

Сигналы отражений от летательных аппаратов могут приниматься только боковыми лепестками ДН антенны (вследствие её зенитной ориентации). Небольшие значения усиления антенны по боковым лепесткам компенсируются большой площадью отражения, а из-за значительно меньшей скорости летательных аппаратов, помехи имеют существенно большую продолжительность – до нескольких минут. Пример наблюдения такого отражения на дальности около 320 км приведен на рис. 2.

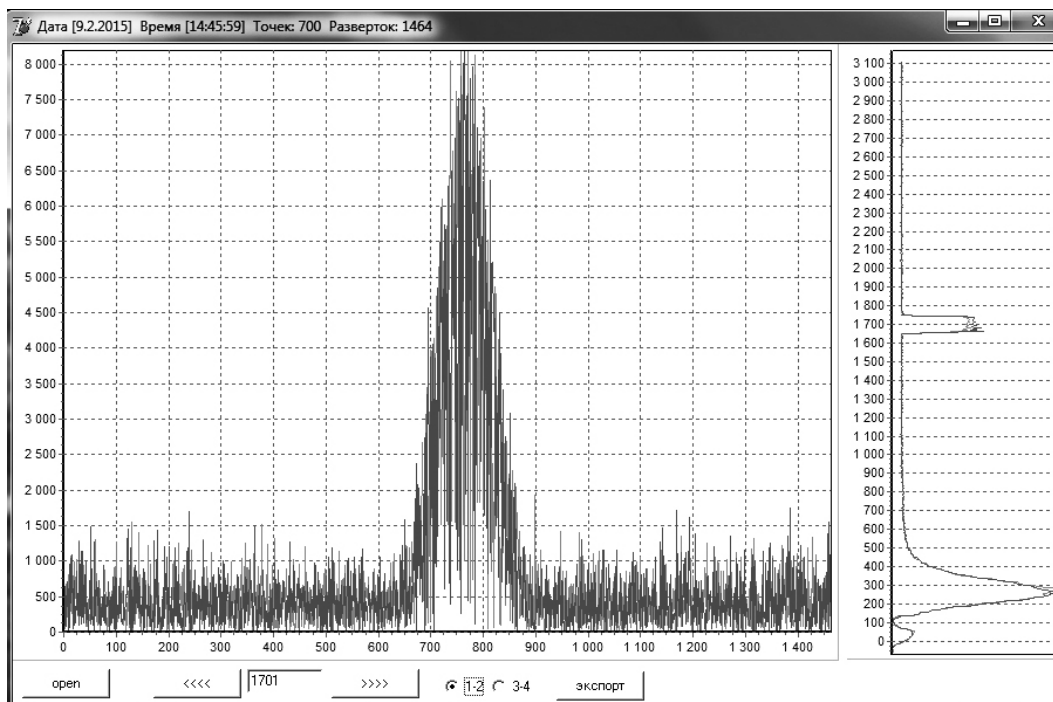


Рис. 1 – Пример наблюдения отражения от техногенного космического объекта

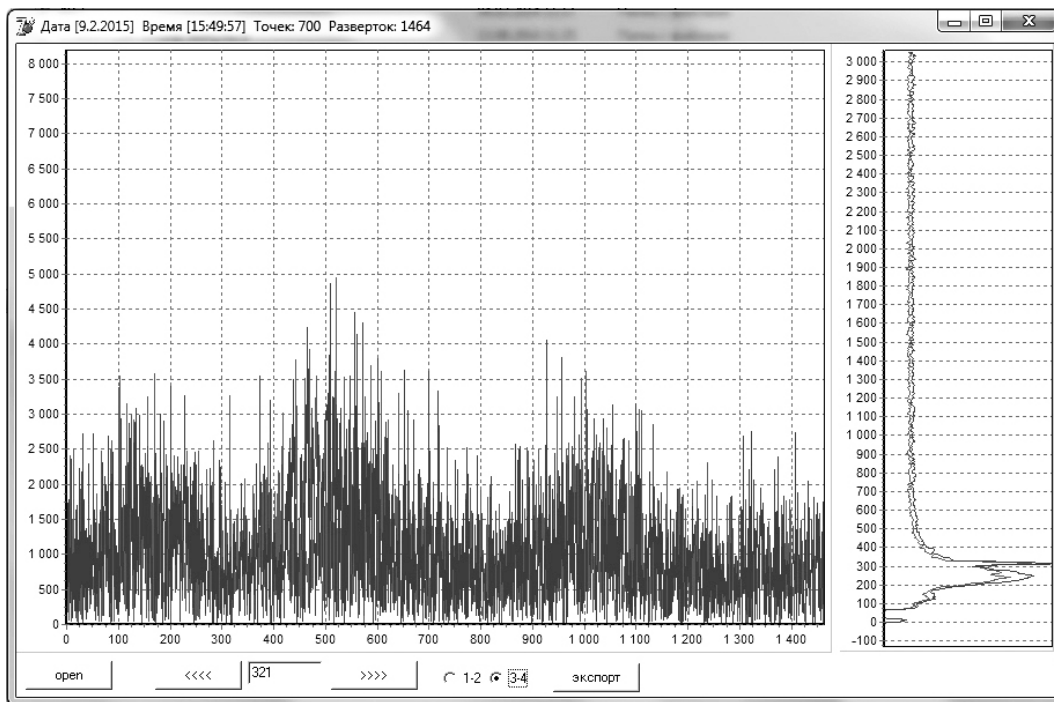


Рис. 2 – Пример наблюдения отражения от летательного аппарата

Цель статьи – определить условия возникновения и возможные источники помех от летательных аппаратов, оценить их влияние на результаты измерения ионосферных параметров.

Анализ условий возникновения помех от летательных аппаратов. Оценим мощность отражений на входе приёмника радара НР при условии их приёма боковыми лепестками ДН антенны. Уровень боковых лепестков (УБЛ) можно оценить по сечению ДН антенны, приведенном на рис. 3. Видно, что в направлении близком к горизонту (т. е. к 90°) УБЛ составляет -37.5 дБ. Это соответствует значениям коэффициента усиления $G_a = 3.6$ дБ (или 2.3 раз) и эффективной площади антенны $A_{эфф} = 0.66$ м².

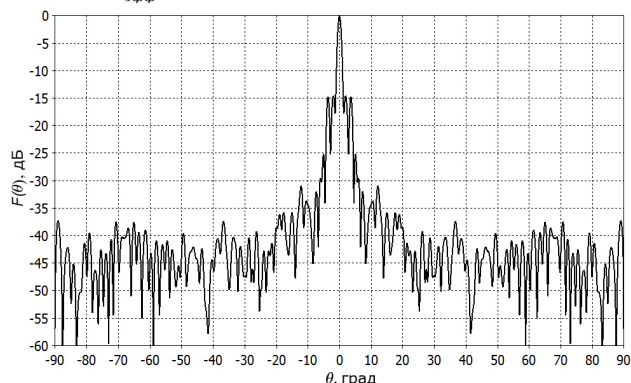


Рис. 3 – Сечение ДН антенны НДА-100 в вертикальной плоскости

Мощность отраженного сигнала на входе приёмника радара НР равна [1]

$$P_{отр} = \frac{P_u G_a A_{эфф} S_{эфф}}{16\pi^2 r^4}, \quad (1)$$

где P_u – выходная мощность передатчика радара НР, G_a – коэффициент усиления антенны в направлении отражающего объекта, $A_{эфф}$ – эффективная площадь антенны в том же направлении, $S_{эфф}$ – эффективная площадь рассеяния объекта в направлении радара НР, r – расстояние до отражающего объекта.

Эффективная площадь рассеяния современных широкофюзеляжных самолетов может достигать очень больших значений, особенно при их ориентации по нормали к направлению на радар НР. В качестве оценки можно использовать соотношение для эффективной площади рассеяния объекта в виде прямоугольной площадки со сторонами a и b [1]

$$S_{эфф} = \frac{4\pi}{\lambda^2} (ab)^2, \quad (2)$$

где $\lambda = 1.9$ м – рабочая длина волны радара НР.

В таблице 1 приведены габаритные размеры некоторых широкофюзеляжных авиалайнеров [2].

Таблица 1 – Габаритные размеры некоторых авиалайнеров

	Boeing 747-400	Boeing 777-300ER	Airbus A330-343	Airbus A380-800
Длина, м	70.6	73.9	63.69	73.0
Размах крыла, м	64.4	64.8	60.3	79.75
Высота киля, м	19.4	18.6	16.9	24.09
Ширина фюзеляжа, м	6.5	6.2	5.64	7.14

Поскольку практический интерес представляет вариант расположения летательного аппарата вблизи линии горизонта, то очевидно, что существенное значение имеют длина и ширина фюзеляжа (вид

сбоку). Подставив в (2) эти значения для Airbus A380-800 получим $S_{эфф} = 59.7$ дБкв.м (дБ относительно 1 кв. м).

Другая оценка $S_{эфф}$, а также диаграмма обратного рассеяния (ДОР) были получены авторами для цилиндра из алюминия (металл с потерями), соответствующего размерам фюзеляжа Airbus A380-800, при компьютерном моделировании. Полученная ДОР приведена на рис. 4. Из неё следует, что при положении оси цилиндра по нормали относительно направления на радар НР эффективная площадь рассеяния имеет максимальное значение $S_{эфф} = 44.9$ дБкв.м, что соответствует 30900 м^2 . ДОР имеет изрезанный характер с узкими главным и боковыми лепестками. $S_{эфф}$ уменьшается до 1000 м^2 при отклонении цилиндра от нормали на $\pm 2.5^\circ$ и до 100 м^2 при отклонении на $\pm 8.4^\circ$.

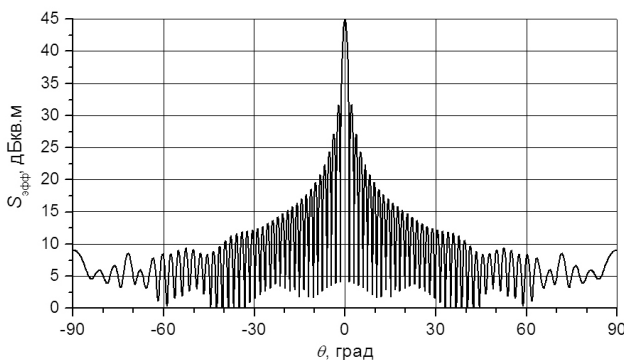


Рис. 4 – Диаграмма обратного рассеяния цилиндра диаметром 7.14 м и длиной 73 м

Подставляя в (1) полученные выше значения G_a , $A_{эфф}$ и значения $S_{эфф}$, при мощности передатчика $P_u = 2$ МВт и дальности до летательного объекта $r = 350$ км получим мощности отражения на входе приёмника радара НР, равные 1.3×10^{-16} Вт, 1.3×10^{-15} Вт, для $S_{эфф}$ равной 100 м^2 и 1000 м^2 соответственно.

Мощность шумов $P_{ш}$ на входе приёмника определяется как [1]

$$P_{ш} = kT_c \Delta f, \quad (3)$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

T_c – шумовая температура системы, учитывающая шумы неба, тепловые шумы антенны и фидера,

Δf – полоса пропускания приёмника.

Для рассматриваемого радара НР, работающего в метровом диапазоне длин волн, $T_c = 570 \text{ К}$, $\Delta f = 20$ кГц. Тогда, получим $P_{ш} = 1.1 \times 10^{-16}$ Вт. Отношения помеха/шум равны 1.2 и 12 для $S_{эфф}$ равной 100 м^2 и 1000 м^2 соответственно. В максимуме ДОР, когда фюзеляж самолета расположен по нормали к лучу лепестка ДН антенны радара НР, отношение помеха/шум, для рассматриваемого случая, может достигать 365. При дальности до летательного аппарата $r = 400$ км отношение помеха/шум становится больше единицы при $S_{эфф} = 135 \text{ м}^2$, при $r = 150$ км – уже при $S_{эфф} = 3 \text{ м}^2$, а при дальности $r = 100$ км – при $S_{эфф} = 0.6 \text{ м}^2$.

Таким образом, мощность импульсов, отраженных от летательных аппаратов и принимаемых боковыми лепестками ДН антенны, на входе приёмника может значительно превышать мощность полезного НР сигнала и мощность собственных шумов системы.

Летательный аппарат, создающий отражения зондирующего сигнала должен находиться в зоне прямой видимости для антенны радара НР. Дальность прямой видимости, с учетом сферичности Земли, определяется выражением [3]

$$r_e \approx 3.57\sqrt{h}, \quad (4)$$

где r_e – дальность прямой видимости (в километрах), h – высота объекта над поверхностью земли (в метрах).

Из этого выражения следует, что при высоте летательного аппарата 10000 м, дальность его прямой видимости составляет 357 км. Высоты 0.8 км достаточно для обеспечения дальности прямой видимости в 100 км. Большинство воздушных судов гражданской авиации имеют ограничение по максимальной высоте полета около 13 км, что соответствует дальности их прямой видимости 407 км.

Зона прямой видимости может ограничиваться рельефом местности, в которой расположен радар НР. Карты рельефа местности доступны, например, в [4]. Их анализ показал, что максимальные углы закрытия ДН антенны радара НР составляют 1.55° в юго-восточном, 1.43° – в западном и 1.3° – в южном направлении. В других направлениях углы закрытия составляют от 0 до 0.47° . По известным углам закрытия были определены дальности прямой видимости объектов, находящихся на высоте 10 км над поверхностью земли. Это позволило очертить зону прямой видимости, в которой могут возникать отражения от летательных аппаратов. На рис. 5 представлена карта местности с нанесенной темным цветом расчетной зоной прямой видимости.

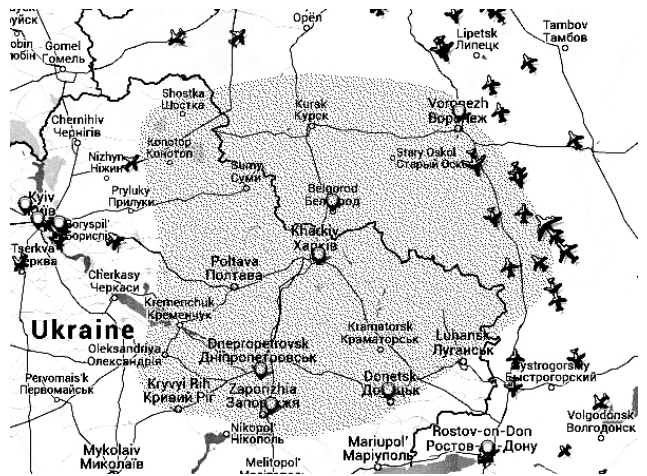


Рис. 5 – Зона видимости радаром НР летательных аппаратов на высоте 10 км

Положение летательных аппаратов в реальном времени доступно для просмотра на сайте [5]. Было

установлено, что в правой части зоны видимости (см. рис. 5), соответствующей восточному и северо-восточному направлениям относительно радара НР, находится одновременно до 10 летательных аппаратов, среди которых есть как небольшие, так и крупногабаритные широкофюзеляжные авиалайнеры. По каждому из них на сайте [5] приведена информация, в том числе, указан тип воздушного судна и высота над уровнем земли. Следует отметить, что среди них значительное число составляют аппараты, приведенные в таблице 1, а их высота над уровнем земли, как правило, находится в пределах 10-11.5 км. Эти факторы являются определяющими в образовании помех радару НР.

Экспериментальные результаты. На радаре НР с антенной НДА-100 зондирование ионосферы осуществляется составным двухчастотным радиоимпульсом с длительностью элементов 650 и 135 мкс. Для этих элементов зондирующего сигнала имеются отдельные каналы приёма и обработки ионосферной информации. Помехи от летательных аппаратов имеют большее влияние на высотный профиль мощности сигнала, некогерентно рассеянного ионосферой от короткого зондирующего импульса (см. рис. 2). Влияние помех на профиль мощности НР сигнала по каналу длинного импульса менее заметно, из-за худшего разрешения по дальности. Однако эхо-сигнал от длинного импульса используется для определения основных ионосферных параметров, которые, вследствие наличия помехи, могут определяться некорректно.

Следует отметить, что характерным признаком помех, вызванных отражениями от летательных аппаратов, является появление гармонической составляющей в отраженном сигнале даже при небольшой их амплитуде по отношению к полезному НР сигналу.

На рис. 6–8 представлены результаты измерений ионосферных параметров в виде трех последовательных одноминутных сеансов наблюдения (по каналу длинного импульса).

На графиках представлены высотные распределения следующих параметров: автокорреляционной функции (АКФ) НР сигнала, спектра НР сигнала, отношения сигнал/шум, измеренного сечения рассеяния ионосферной плазмы и кинетических температур электронов T_e и ионов T_i . Наиболее чувствительным к рассматриваемым помехам оказался спектр НР сигнала, форма которого, при наличии отражений, существенно изменяется, часто с двугорбой на одnogорбую (см. рис. 7). В свою очередь, изменение формы спектра ведет к некорректному определению температур ионов и электронов на интервалах высот, соответствующих расстоянию до источника помех. На рис. 6 представлен начальный этап появления помехи на дальности 320 км. Видно небольшое уменьшение провала центральной части спектра на этой высоте, температуры электронов T_e и ионов T_i практически равны (кривые температур «слипаются»). На рис. 7 помеха является более интенсивной, искажения спектра существенны – он стал одnogорбым, высота максимума сечения рассеяния увеличилась с 272 до 290 км (сместилась в сторону помехи), произошла инверсия кривых температур T_e и T_i . После исчезновения помехи (см. рис. 8) форма спектра, высотная зависимость сечения рассеяния и высотные зависимости температур восстановились до прежних значений.

Возникает также погрешность в определении скорости движения ионосферной плазмы. Из рис. 9 видно, что присутствие помехи на дальности 320 км привело к искажению высотного профиля движения ионосферной плазмы на соответствующем высотном интервале.

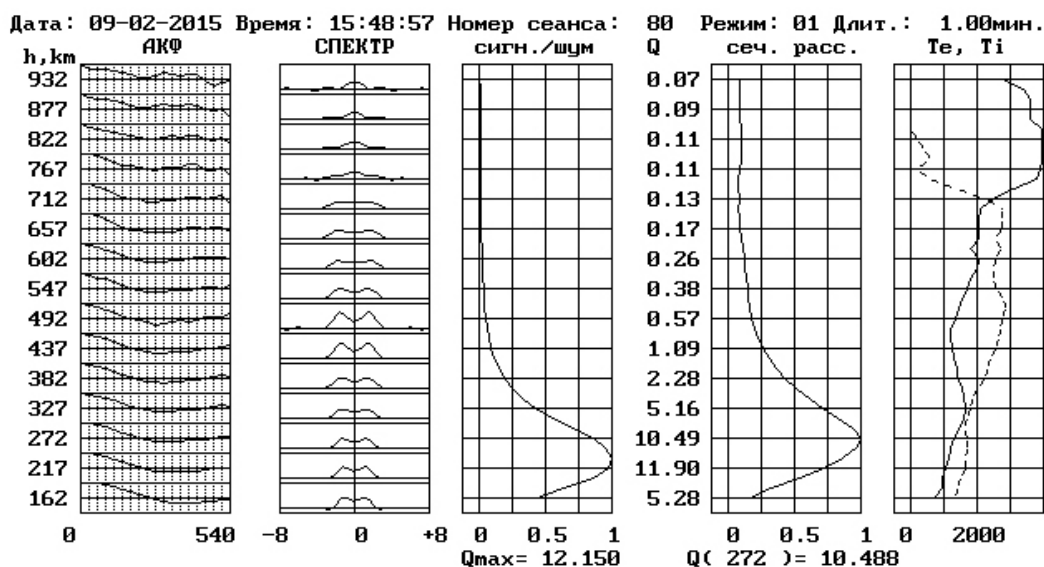


Рис. 6 – Начальный этап появления помехи на высоте 320 км

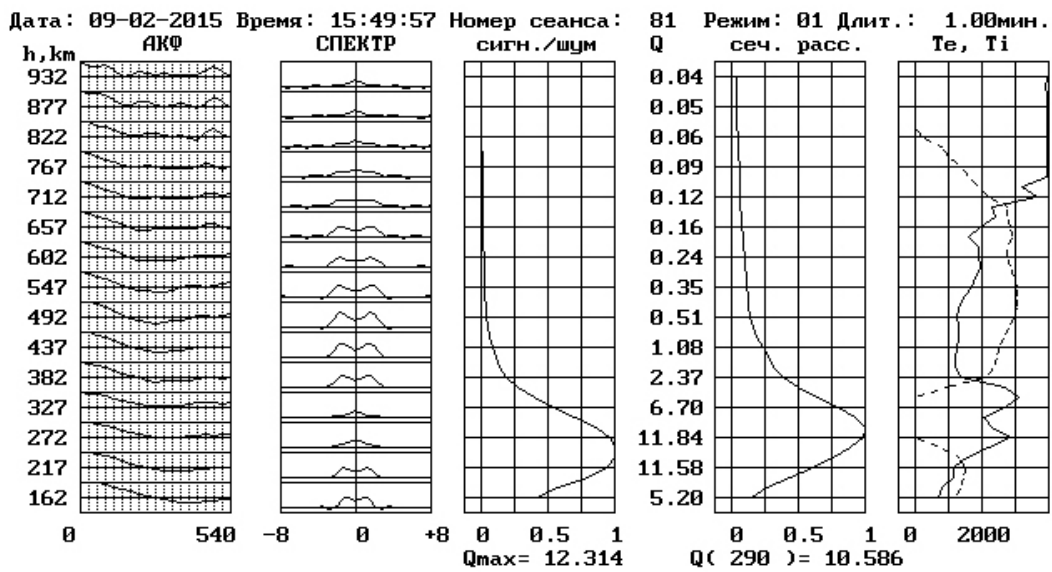


Рис. 7 – Помеха на высоте 320 км вносит искажения в измеряемые ионосферные параметры

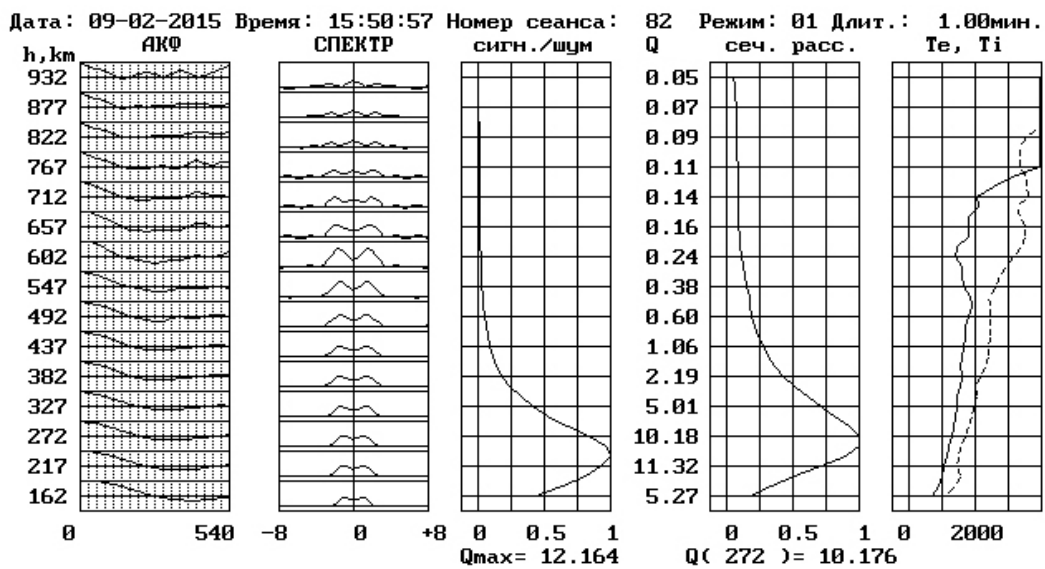


Рис. 8 – Значения ионосферных параметров после исчезновения помехи

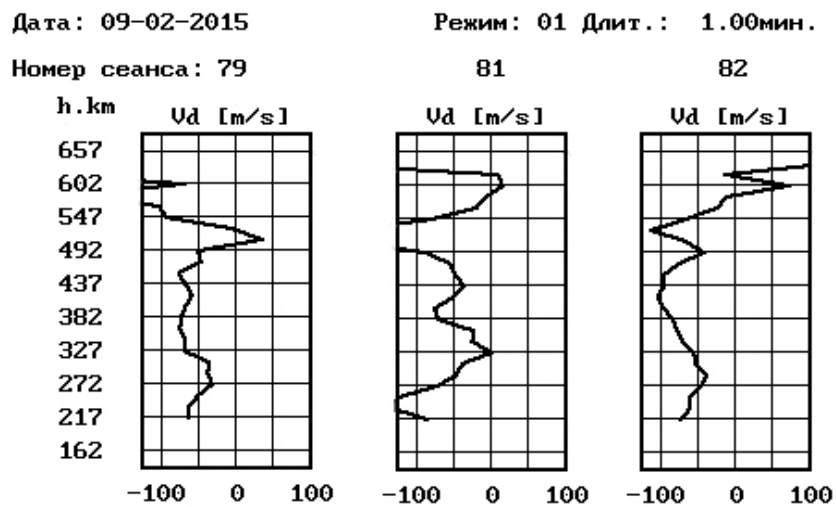


Рис. 9 – Высотные зависимости скорости движения ионосферной плазмы: сеансы 79 и 82 – помеха отсутствует, сеанс 81 – помеха на высоте 320 км

При этом измеренное значение скорости нисходящего ($V_d < 0$) движения плазмы под действием помехи упало с -50 м/с до 0, а после исчезновения помехи снова возросло до прежнего значения (-50 м/с).

Выводы. 1. Источниками помех для радара НР могут служить летательные аппараты на удалении от 100 до 400 км при высоте над поверхностью земли, обеспечивающей их прямую видимость – от 0.8 до 13 км, соответственно.

2. Для создания помехи, превышающей уровень собственных шумов системы достаточно аппарата с эффективной площадью рассеяния от 0.6 м^2 на дальности 100 км до 135 м^2 на дальности 400 км.

3. Проведенный анализ воздушной обстановки с помощью сайта [5] показал, что помехи для радара НР Института ионосферы создаются преимущественно отражениями от летательных аппаратов из восточного и северо-восточного направлений.

4. По каналу приёма эхо-сигнала от короткого импульса влияние помех проявляется в искажении высотного профиля мощности НР сигнала, по каналу приёма эхо-сигнала от длинного импульса – в искажении формы спектра НР сигнала, некорректном определении кинетических температур и скорости движения ионосферной плазмы.

5. Минимизация влияния рассмотренного типа помех возможна при условии разработки специального программного обеспечения, используемого для обработки результатов ионосферных измерений.

Список литературы: 1. Белоцерковский Г. Б. Основы радиолокации и радиолокационные устройства. – М., Сов. радио, 1975. – 336 с. 2. *Wikimedia Project*. Wikipedia, 2015. – Режим доступа : https://en.wikipedia.org/wiki/Wide-body_aircraft. – Дата обращения : 14 июля 2015. 3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. – 336 с. 4. *Google Inc.* Google Earth, 2015. – Режим доступа : <http://www.google.com/earth> – Дата обращения 02 июля 2015. 5. *Svenska Resenätverket AB*. Flightradar24 AB, 2015. – Режим доступа : <http://www.flightradar24.com>. – Дата обращения: 10 марта 2015.

Bibliography (transliterated): 1. Belocerkovskij G. B. *Osnovy radiolokacii i radiolokacionnye ustrojstva*. Moscow: Sov. radio, 1975. Print. 2. *Wikimedia Project*. *Wikipedia*, 2015.– Web. 14 Juli 2015 <https://en.wikipedia.org/wiki/Wide-body_aircraft>. 3. Doluhanov M. P. *Rasprostranjenije radiovoln*. Moscow: Svjaz', 1972. Print. 4. *Google Inc.*, *Google Earth*, 2015. – Web. 02 Juli 2015 <<http://www.google.com/earth>>. 5. *Svenska Resenätverket AB*. *Flightradar24 AB*, 2015. Web. 10 March 2015 <<http://www.flightradar24.com>>.

Поступила (received) 24.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Чепурний Яків Миколайович – головний інженер Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Чепурний Яков Николаевич – главный инженер Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.

Чепурнуу Яків Миколайович – Chief Engineer, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel.: (057) 707-67-69; e-mail: yakov955@gmail.com.@

Ємельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Емельянов Леонид Яковлевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Emelyanov Leonid Yakovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (Ph. D.), Senior Research Scientist, Head of Department, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel. (057) 707-65-88; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Іскра Дмитро Олександрович – молодший науковий співробітник Інституту іоносфери, м. Харків; тел.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Искра Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник Института ионосферы НАН и МОН Украины. тел.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Iskra Dmytro Oleksandrovych – Junior Researcher Scientist, Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel.: (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

С. В. ПАНАСЕНКО

ВЫЯВЛЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ВАРИАЦИЯХ МОЩНОСТИ НЕКОГЕРЕНТНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА

Оценено влияние относительных амплитуд и начальных фаз гармонических вариаций концентрации электронов, температур электронов и ионов на относительные амплитуды мощности некогерентно рассеянного сигнала. Проведено математическое моделирование и рассчитаны относительные систематические погрешности оценки относительной амплитуды концентрации электронов. Продемонстрировано, что для приведенных в литературе соотношений между ионосферными параметрами максимальная относительная систематическая погрешность определения относительных амплитуд квазигармонических вариаций концентрации электронов обычно не превышает 0.4 – 0.5.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, квазигармонические вариации, волновые возмущения, математическое моделирование, систематическая погрешность.

Введение. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн является одним из наиболее информативных радиофизических методов. Он позволяет определять высотно-временные зависимости не только самих ионосферных параметров, таких как концентрация электронов (N_e), температура электронов (T_e) и ионов (T_i), скорость движения плазмы и ее ионный состав (т. е. их регулярные вариации), но и параметров волновых процессов в ионосферной плазме [1–3].

К таким процессам относятся акустико-гравитационные волны (АГВ), играющие важную роль при взаимодействии различных атмосферных областей. Они не только эффективно переносят импульс и энергию, но и служат индикатором мощных природных и искусственных процессов, происходящих на Земле и под ее поверхностью, в атмосфере и геокосмосе. АГВ изучаются уже на протяжении многих десятилетий с помощью как космических, так и наземных средств. Как известно (см., например, [4, 5]) проявлениями АГВ в ионосфере являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), приводящие к квазипериодическим вариациям ионосферных параметров (N_e , T_e , T_i и др.). АГВ часто выявляют по наличию ПИВ, а параметры АГВ при этом рассчитываются через оцененные параметры ионосферных возмущений [6].

Для выявления волновых процессов в ионосферной плазме по данным харьковского радара НР обычно анализируются квазипериодические вариации относительной мощности НР сигнала (см., например, [3, 7–10]). При этом считается, что их относительная амплитуда приблизительно равна относительной амплитуде концентрации электронов на заданной высоте, а влияние квазипериодических вариаций температур электронов и ионов пренебрежимо мало.

Целью данной работы является оценка систематической погрешности, возникающей при нахождении относительной амплитуды волновых возмущений концентрации электронов по квазигармоническим вариациям мощности НР сигнала для различных ионосферных условий.

Результаты теоретических исследований. Как известно (см., например, [1]), мощность принимаемого НР сигнала P определяется из следующего соотношения:

$$P = C \frac{N_e}{h^2 (1 + T_e / T_i)}, \quad (1)$$

где C – константа радара;

h – высота зондируемой ионосферной области.

Формула (1) справедлива при условии $4\pi D_e \ll \lambda$, где D_e – дебаевский радиус экранирования для электронов, λ – длина радиоволны. Это неравенство выполняется для харьковского радара НР.

При дальнейшем анализе исследуемую величину $X = P, N_e, T_e, T_i$ будем представлять в виде:

$$X = \bar{X} \left(1 + \frac{\Delta X}{\bar{X}} \right) = \bar{X} (1 + \delta X), \quad (2)$$

где \bar{X} – регулярная составляющая или тренд;

ΔX – абсолютное отклонение от \bar{X} ;

$\delta X = \Delta X / \bar{X}$ – относительное отклонение.

В случае, если временная зависимость δX носит квазигармонический характер, ее можно представить в виде

$$\delta X = \delta_X \cos(\Omega t + \varphi_X), \quad (3)$$

где t – время;

Ω – циклическая частота колебания;

δ_X и φ_X – относительная амплитуда и начальная фаза соответственно, которые в общем случае могут также зависеть от t .

Подставляя выражения в виде (2) для ионосферных параметров в формулу (1), получим следующее соотношение

$$P = C \frac{\bar{N}_e (1 + \delta N_e)}{h^2 \left[1 + \frac{\bar{T}_e (1 + \delta T_e)}{\bar{T}_i (1 + \delta T_i)} \right]},$$

которое можно представить в следующем виде

$$P = C \frac{\bar{N}_e (1 - k_T)}{h^2} \frac{(1 + \delta N_e)(1 + \delta T_i)}{1 + k_T \delta T_e + (1 - k_T) \delta T_i}, \quad (4)$$

где $k_T = \bar{T}_e / (\bar{T}_e + \bar{T}_i)$.

Из выражения (4) видно, что в общем случае при волновых возмущениях ионосферных параметров временные вариации P не будут иметь квазигармонический характер за счет наличия

нелинейной зависимости в выражении (1). Однако результаты многочисленных экспериментальных исследований свидетельствуют о том, что относительные амплитуды волновых возмущений ионосферных параметров обычно составляют единицы процентов и не превышают нескольких десятков процентов (см., например, [5, 6, 11]). Поэтому сначала рассмотрим такие колебания, для которых $\delta_x \ll 1$. Чтобы избавиться от знаменателя второй дроби в формуле (4), применим разложение в ряд Тейлора, ограничившись только первыми двумя слагаемыми.

$$P = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2} (1 + \delta N_e)(1 + \delta T_i) [1 - k_T \delta T_e - (1 - k_T) \delta T_i].$$

Представим P в виде (2) и, выполняя дальнейшее умножение, оставим только линейные члены в правой части предыдущего равенства. После небольших преобразований получим окончательное соотношение

$$\bar{P}(1 + \delta P) = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2} [1 + \delta N_e + k_T(\delta T_i - \delta T_e)],$$

откуда следует, что

$$\bar{P} = C \frac{\bar{N}_e(1-k_T)}{h^2}, \quad (5)$$

$$\delta P = \delta N_e + k_T(\delta T_i - \delta T_e). \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что равенство $\delta P = \delta N_e$ выполняется только в том случае, если $\delta T_i = \delta T_e$, что с учетом выражений (3) соответствует равенству их относительных амплитуд ($\delta_{T_i} = \delta_{T_e}$) и начальных фаз колебаний ($\varphi_{T_i} = \varphi_{T_e}$). Тогда $\delta_P = \delta_{N_e}$ и $\varphi_P = \varphi_{N_e}$.

Подставляя в (6) выражения (3), можно получить следующую формулу для δ_P

$$\delta_P = \sqrt{\delta_{N_e}^2 + k_T^2 \delta^2 - 2k_T \delta_{N_e} \delta \cos(\varphi_N - \varphi)}, \quad (7)$$

где

$$\delta = \sqrt{\delta_{T_i}^2 + \delta_{T_e}^2 - 2\delta_{T_i} \delta_{T_e} \cos(\varphi_{T_i} - \varphi_{T_e})},$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{\delta_{T_i} \sin \varphi_{T_i} - \delta_{T_e} \sin \varphi_{T_e}}{\delta_{T_i} \cos \varphi_{T_i} - \delta_{T_e} \cos \varphi_{T_e}} \right).$$

Из выражения (7) следует, что равенство $\delta_P = \delta_{N_e}$ может также выполняться, если

$$\delta_{N_e} = \frac{k_T \delta}{2 \cos(\varphi_{N_e} - \varphi)}.$$

Относительную систематическую погрешность оценки δ_{N_e} будем определять следующим образом

$$\varepsilon = \frac{\delta_P - \delta_{N_e}}{\delta_{N_e}},$$

что с учетом (6) можно записать в виде

$$\varepsilon = \sqrt{1 + k_T^2 \left(\frac{\delta}{\delta_{N_e}} \right)^2 - 2k_T \left(\frac{\delta}{\delta_{N_e}} \right) \cos(\varphi_{N_e} - \varphi)} - 1. \quad (8)$$

Из (8) видно, что в зависимости от соотношений между относительными амплитудами и начальными фазами квазигармонических вариаций ионосферных параметров будет иметь место как переоценка ($\varepsilon > 0$), так и недооценка ($\varepsilon < 0$) значения δ_{N_e} .

Если условие $\delta_x \ll 1$ не выполняется, то, как упоминалось выше, вариации δP уже не будут квазигармоническими. В этом случае разложим правую часть выражения (4) в ряд Фурье и найдем относительную амплитуду гармонической составляющей, соответствующей циклической частоте Ω из следующего соотношения:

$$\delta_P^{Fourier} = \frac{\Delta_P^{Fourier}}{\bar{P}^{Fourier}},$$

где $\Delta_P^{Fourier}$ – амплитуда гармоники с относительной частотой Ω ;

$\bar{P}^{Fourier}$ – постоянная составляющая мощности НР сигнала.

Тогда выражение для ε будет иметь вид

$$\varepsilon = \frac{\delta_P^{Fourier} - \delta_{N_e}}{\delta_{N_e}}. \quad (9)$$

Можно показать, что при $\delta_x \ll 1$ выполняются равенства $\delta_P^{Fourier} = \delta_P$, $\bar{P}^{Fourier} = \bar{P}$, и формула (9) переходит в соотношение (8).

Результаты компьютерного моделирования.

Для нахождения величины ε при различных значениях относительных амплитуд и начальных фаз колебаний ионосферных параметров было проведено компьютерное моделирование.

Исходя из выражений (7) – (9), можно показать, что величина ε зависит от семи переменных, а именно

$$\varepsilon = \varepsilon(k_T, \delta_{N_e}, \varphi_{N_e}, \delta_{T_e}, \varphi_{T_e}, \delta_{T_i}, \varphi_{T_i}). \quad (10)$$

Поскольку значение φ_{N_e} всегда можно зафиксировать выбором начального времени наблюдения, здесь и далее будем считать, что $\varphi_{N_e} = 0$. Кроме того, будем анализировать не сами погрешности ε , а их максимальные абсолютные значения $\varepsilon_{\max} = |\varepsilon|_{\max}$.

Зависимость ε_{\max} от δ_{T_e} и δ_{T_i} при различных значениях k_T и δ_{N_e} представлена на рис. 1. При этом каждое значение ε_{\max} является глобальным максимумом функции $|\varepsilon(\varphi_{T_e}, \varphi_{T_i})|$ при фиксированных значениях остальных параметров.

Из рис. 1 видно, что, как и следовало ожидать, величина ε_{\max} существенно возрастает с увеличением δ_{T_e} и δ_{T_i} . В случае сильных вариаций концентрации электронов при $\delta_{T_e}, \delta_{T_i} > 0.5-0.7$ имеет место ярко выраженная зависимость значений ε_{\max} от соотношения между относительными амплитудами температур электронов и ионов (см. рис. 1, правый столбец).

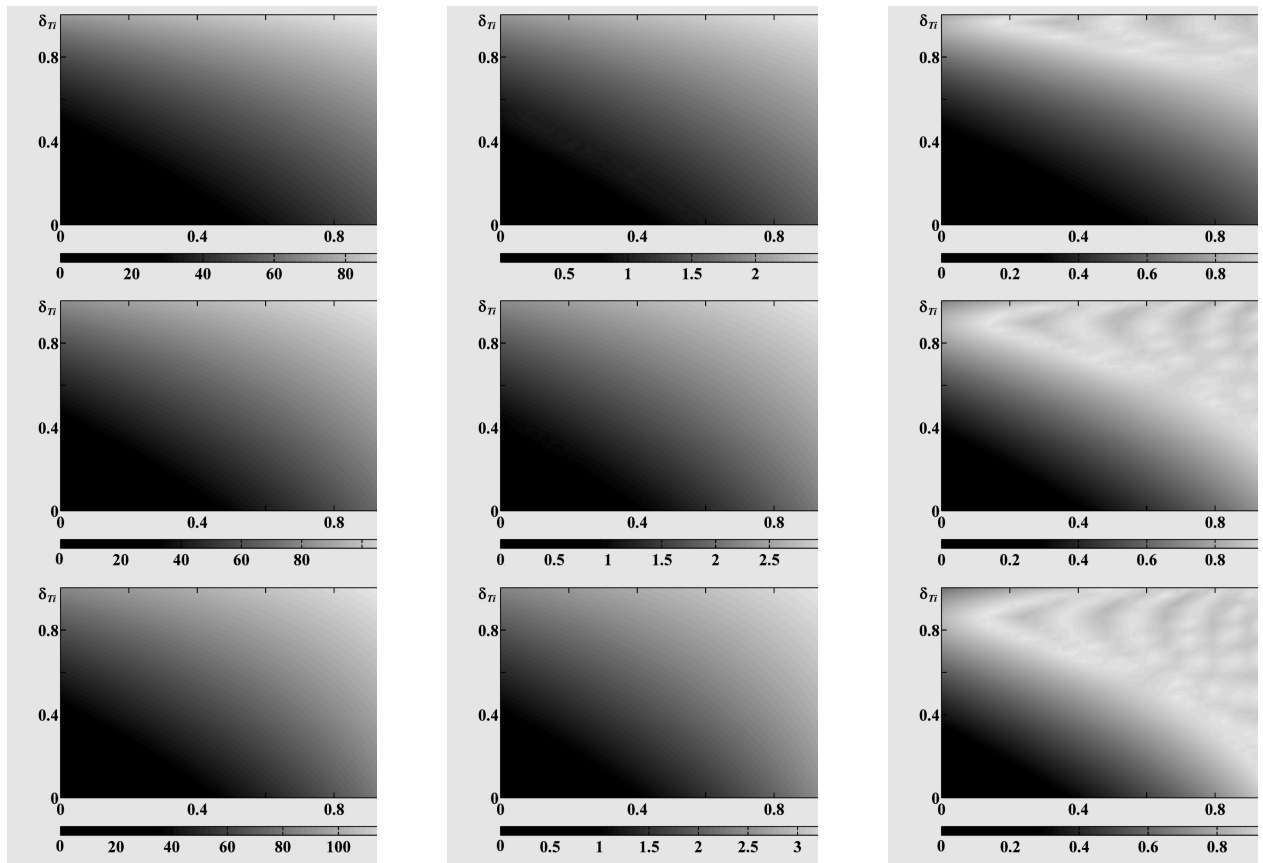


Рис. 1 – Зависимость максимальной систематической относительной погрешности ε_{\max} от относительных амплитуд колебаний температур электронов и ионов при $k_T = 0.5$ (верхняя панель), $k_T = 0.67$ (средняя панель) и $k_T = 0.75$ (нижняя панель) для слабых ($\delta_{Ne} = 0.01$, левый столбец), средних ($\delta_{Ne} = 0.3$, средний столбец) и сильных ($\delta_{Ne} = 0.75$, правый столбец) квазигармонических вариаций концентрации электронов

Следует отметить существенное увеличение исследуемой погрешности с уменьшением δ_{Ne} и ее незначительный рост с увеличением коэффициента k_T .

В табл. 1 представлены глобальные максимумы функции $\varepsilon_{\max}(\delta_{Te}, \delta_{Ti})$ для ряда значений параметров k_T и δ_{Ne} . Из этой таблицы видно, что ε_{\max} может достигать огромных значений (порядка 1–100 или 10^2 – 10^4 %) при определенных соотношениях между ионосферными параметрами. При больших значениях относительной амплитуды концентрации электронов ($\delta_{Ne} \geq 0.75$) величина ε_{\max} перестает зависеть от относительных амплитуд колебаний ионосферных параметров, а ее значение становится равным 1 (см. табл. 1).

Таблица 1 – Значения ε_{\max} при различных соотношениях между k_T и δ_{Ne}

$k_T \backslash \delta_{Ne}$	0.01	0.1	0.3	0.5	0.75	1
0.5	99.42	9.47	2.77	1.41	1.00	0.97
0.67	116.50	11.10	3.26	1.67	1.00	1.00
0.75	126.09	12.02	3.53	1.82	1.00	1.00

Обсуждение результатов. Оценка величины систематической погрешности позволяет получить ответ на вопрос о возможности и целесообразности анализа временных вариаций мощности НР сигнала

для выявления колебаний концентрации электронов и определения значений их относительных амплитуд. Важным и информативным методом ее исследования является компьютерное моделирование, позволяющее проанализировать зависимость этой погрешности от ионосферных параметров и определить диапазон изменения ее значений. При этом необходимо учитывать, что не все соотношения между параметрами, входящими в (10), могут иметь место в экспериментах.

Например, при выборе значений k_T принимался во внимание тот факт, что отношение температур T_e / T_i для реальных ионосферных условий обычно лежит в пределах 1 – 3. Поэтому расчеты проведены для коэффициентов $k_T = 0.5, 0.67$ и 0.75 , которые отвечают отношениям T_e / T_i , равным 1, 2 и 3 соответственно.

Из рис. 1 видно, что наибольшие значения ε_{\max} достигаются, когда $\delta_{Ne} \ll \delta_{Te}, \delta_{Ti}$. Такие неравенства практически никогда не выполняются для ионосферы, поскольку разогрев (охлаждение) электронов и ионов всегда приводит к расширению (сжатию) ионосферной плазмы, что вызывает существенные вариации концентрации электронов.

Результаты экспериментальных исследований параметров квазигармонических вариаций ионосферных параметров представлены в работах [5, 6, 11]. На рис. 2 приведен пример высотных

зависимостей модельных и экспериментальных значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} , полученных в работе [6]. Из этого рисунка видно, что значения $\delta_{Ne} = 0.01-0.2$, $\delta_{Te} = 0.01-0.04$, $\delta_{Ti} = 0.01-0.02$. Подобные значения

относительных амплитуд ионосферных параметров были получены авторами [6] и для других интервалов наблюдений.

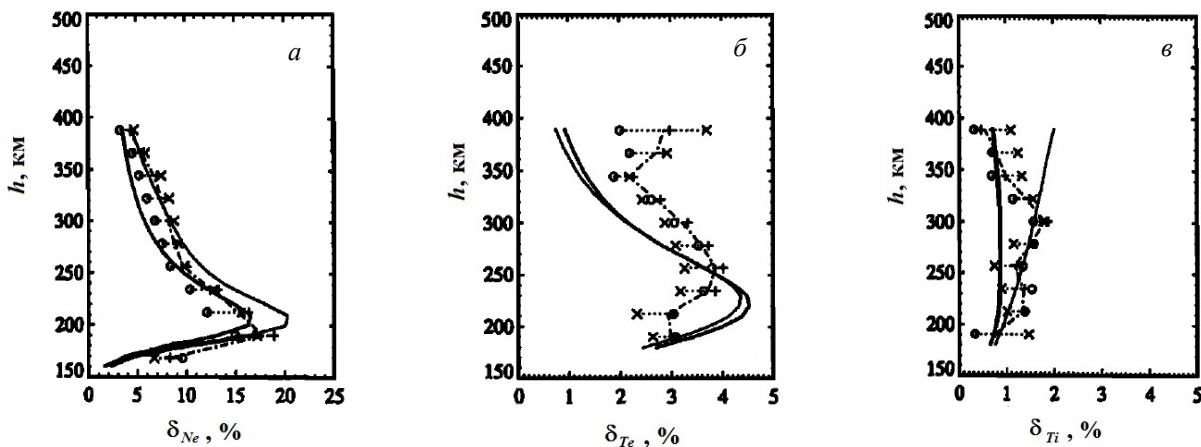


Рис. 2 – Высотные зависимости модельных (сплошные линии) и экспериментальных (штрихпунктирные линии) зависимостей, полученные для 17 ноября 1987 г. [6]: а – δ_{Ne} , б – δ_{Te} , в – δ_{Ti}

Что касается начальных фаз колебаний, то, как показано в работах [5, 11], их средние значения составляют 185° (3.23 рад) и 130° (2.27 рад), если считать, как и раньше, что $\varphi_{Ne} = 0$. Таким образом, квазигармонические вариации концентрации электронов с одной стороны и температур электронов и ионов – с другой происходят почти противофазно.

В табл. 2 приведены результаты расчетов ϵ_{max} для ряда наблюдаемых значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} . При этом, так же, как и на рис. 1, были выбраны такие значения φ_{Te} и φ_{Ti} , для которых имел место глобальный максимум абсолютного значения относительной систематической погрешности. Как видно из этой таблицы, максимальная систематическая погрешность обычно не превышает 0.4–0.5, а при увеличении δ_{Ne} она существенно уменьшается до 0.01–0.1.

Таким образом, для большинства наблюдений можно в качестве оценки δ_{Ne} с приемлемой относительной систематической погрешностью брать значения δ_r . Однако, поскольку соотношения между ионосферными параметрами в каждом конкретном эксперименте заранее не известны, величина ϵ в ряде случаев может принимать значения существенно большие, чем приведенные в табл. 2. Поэтому такую оценку целесообразно использовать лишь тогда, когда случайные погрешности определения δ_{Te} , и δ_{Ti} достаточно велики (низкие значения отношения сигнал / шум), либо температуры электронов и ионов не могут быть оценены из экспериментальных данных (использование режима зондирования “коротким” импульсом для улучшения разрешения по высоте).

Выводы. Проанализирована степень влияния волновых возмущений концентрации электронов, температуры электронов и ионов на уровень квазигармонических вариаций мощности НР сигнала при различных соотношениях между ионосферными параметрами. Проведены теоретическое исследование и компьютерное моделирование, позволившие

оценить величину относительной систематической погрешности определения относительной амплитуды колебаний концентрации электронов. Показано, что ее максимальное значение обычно не превышает 0.4–0.5, а при увеличении δ_{Ne} уменьшается до 0.01–0.1. Приведены случаи, когда использование такой оценки является целесообразным.

Таблица 2 – Значения ϵ_{max} для наблюдаемых значений δ_{Ne} , δ_{Te} , и δ_{Ti} . Расчеты приведены для $k_T = 0.67$

δ_{Ne}	δ_{Te}	δ_{Ti}	φ_{Te}	φ_{Ti}	ϵ_{max}
0.01	0.01	0.01	3.23	2.27	0.36
0.04					0.07
0.07					0.04
0.1					0.03
0.2					0.01
0.04	0.04	0.02	3.23	2.27	0.49
0.07					0.27
0.1					0.19
0.2					0.09

Список литературы: 1. Evans J. V. Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar / J. V. Evans // Proc. IEEE. – 1969. – V. 57, issue 4. – P. 496–530. 2. Брюнелли Б. Е. Метод некогерентного рассеяния радиоволн / Б. Е. Брюнелли, М. И. Кочкин, И. Н. Пресняков, Е. Д. Терещенко, В. Д. Терещенко – Л.: Наука, 1979. – 188 с. 3. Бурмака В. П. Результаты исследования волновых возмущений в ионосфере методом некогерентного рассеяния / В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Успехи современной радиоэлектроники. – 2005. – № 3. – С. 4–35. 4. Hines C. O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights / C. O. Hines // Can. J. Phys. – 1960. – V. 38, No 11. – P. 1441–1481 5. Hocke K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 / K. Hocke, K. Schlegel // Ann. Geophys. – 1996. – V. 14, No 9. – P. 917–940. 6. 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. 7. Burmaka V. P. Wave Disturbances in the Ionosphere during a Lasting Solar Activity Minimum / V. P. Burmaka, L. F. Chernogor // Geomagn.

Aeron. – 2012. – V. 52, No. 2. – Pp. 183 – 196. **8.** *Burmaka V. P.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere / *V. P. Burmaka, L. F. Chernogor* // *Geomagn. Aeron.* – 2013. – V. 53, No. 4. – Pp. 479–491. **9.** *Domnin I. F.* Results of Radiophysical Study of Wave Disturbances in the Ionospheric Plasma During Its Heating by High-Power HF Radio Transmission of “Sura” facility / *I. F. Domnin, S. V. Panasenko, V. P. Uryadov, L. F. Chernogor* // *Radiophys. Quant. El.* – 2012. – V. 55, No 4. – Pp. 253–265. **10.** *Панасенко С. В.* Обнаружение перемещающихся ионосферных возмущений в квазипериодических вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала / *С. В. Панасенко, А. О. Мамедов* // *Вісник НТУ «ХПІ»*. Сер.: Радіофізика та іоносфера – 2013. – № 33 (1066). – С. 12–18. **11.** *Hocke K.* Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT / *K. Hocke, K. Schlegel, G. Kirchengast* // *J. Atm. Terr. Phys.* – 1996. – V. 58, No 1 – 4. – P. 245–255.

Bibliography (transliterated): **1.** Evans, J. V. “Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar.” *Proc. IEEE* 57.4 (1969): 496–530. Print. **2.** Brjunelli, B. E., et al. *Metod nekogerentnogo rasseyaniya radiovoln*. Leningrad: Nauka, 1979. Print. **3.** *Burmaka, V. P., V. I. Taran, and L. F. Chernogor.* “Rezultaty issledovaniya volnovykh vozmushhenij v ionosfere metodom nekogerentnogo rasseyaniya.” *Uspehi sovremennoj radioelektroniki* 3 (2005): 4–35. Print. **4.** Hines, C. O. “Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights.”

Can. J. Phys. 38.11 (1960): 1441–1481. Print. **5.** Hocke, K., and K. Schlegel “A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982 – 1995.” *Ann. Geophys.* 14.9 (1996): 917–940. **6.** Kirchengast, G., K. Hocke, and K. Schlegel. “Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements.” *Radio Sci.* 30.5 (1995): 1551–1567. Print. **7.** *Burmaka, V. P., and L. F. Chernogor.* “Wave Disturbances in the Ionosphere during a Lasting Solar Activity Minimum.” *Geomagn. Aeron.* 52.2 (2012): 183–196. Print. **8.** *Burmaka, V. P., and L. F. Chernogor.* “Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 2. Observation results of wave disturbances in the ionosphere.” *Geomagn. Aeron.* 53.4 (2013): 479–491. Print. **9.** *Domnin, I. F., et al.* “Results of Radiophysical Study of Wave Disturbances in the Ionospheric Plasma During Its Heating by High-Power HF Radio Transmission of “Sura” facility.” *Radiophys. Quant. El.* 55.4 (2012): 253–265. Print. **10.** *Panasenko, S. V., and A. O. Mamedov.* “Obnaruzhenie peremeshhajushhhsja ionosfernyh vozmushhenij v kvaziperiodicheskikh variacijah moshhnosti nekogerentno rasseyannogo signala.” *Visnyk NTU “KhPI”*. Ser.: *Radiofizyka ta ionosfera* 33 (2013): 12–18. Print. **11.** *Hocke, K., K. Schlegel, and G. Kirchengast.* “Phases and amplitudes of TIDs in the high latitude F-region observed by EISCAT.” *J. Atm. Terr. Phys.* 58.1–4 (1996): 245–255. Print.

Поступила (received) 24.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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 Valentynovich – 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 621.314.26

Е. А. ЛЕВОН, И. Ф. ДОМНИН**МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВУХКАНАЛЬНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ С FUZZY-РЕГУЛЯТОРОМ**

Осуществлена микропроцессорная реализация системы управления двухканальным компенсатором неактивных составляющих полной мощности с fuzzy-регулятором на базе микроконтроллера нечеткой логики Motorola 68HC12. Показана возможность программной реализации цифрового fuzzy-регулятора системы управления двухканальным компенсатором в программе fuzzyTECH.

Ключевые слова: fuzzy-регулятор, микропроцессор, система управления, двухканальный компенсатор.

Введение. В работе [1] представлена многоконтурная система управления двухканальным компенсатором для формирователей мощных зондирующих импульсов ФМЗИ с fuzzy-регулятором, применение которого дает возможность в процессе компенсации реактивной мощности уменьшить генерирование в сеть высших гармоник тока, не превышая при этом установленный уровень коммутационных перенапряжений. Метод проектирования нечеткого регулятора в составе системы управления устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности на основе пакета нечеткой логики системы MATLAB достаточно подробно изложен в работах [2, 3]. В данной статье поставлена задача микропроцессорной реализации системы управления двухканальным компенсатором неактивных составляющих полной мощности с fuzzy-регулятором, при решении которой существуют следующие возможные варианты. Первый – аппаратная реализация нечеткого микроконтроллера, входящего в состав fuzzy-регулятора, второй – его программно-аппаратная реализация.

Анализ состояния вопроса. Аппаратная реализация нечеткого микроконтроллера fuzzy-регулятора может быть выполнена с использованием:

- микроконтроллеров специального назначения;
- микроконтроллеров общего назначения с аппаратной поддержкой нечеткой логики.

Ниже приведены аппаратные процессоры нечеткой логики, возможные для использования в составе fuzzy-регулятора системы управления двухканальным компенсатором:

ST52 Dualogic (STMicroelectronics) – семейство 8-битовых микроконтроллеров, содержащих в одном корпусе традиционное вычислительное ядро, ядро для fuzzy-вычислений и периферийные схемы. Поддерживает специальный набор инструкций для работы с нечеткой логикой и позволяет определять несколько независимых наборов правил для нескольких различных алгоритмов.

ST62 (STMicroelectronics) – 8-битовый микроконтроллер со встроенной, однократно программируемой памятью для автомобильной промышленности, продолжение семейства Dualogic. Расширенный температурный диапазон (от -40° до

$+125^{\circ}$ C), гарантированный срок хранения данных для памяти EPROM и EEPROM не менее 20 лет.

68HC12 (Motorola) – fuzzy-микроконтроллер, базирующийся на ядре Motorola 68HC11 и содержащий специальные функции нечеткой логики. Предназначен для использования с программным пакетом fuzzyTECH и позволяет увеличить скорость выполнения приложений, созданных в этом пакете, до 15 раз и компактность кода до 6 раз по сравнению с реализацией на обычном ядре 68HC11.

VY86C570 (Togai InfraLogic) – fuzzy-сопроцессор, 12-битовое ядро FCA (Fuzzy Computational Acceleration), 4Kx12 бит памяти OCTD (Observation, Conclusion, & Temporary Data), память RB (Rule Base) и интерфейсная логика в одном корпусе.

SAE 81C99 (Siemens) – fuzzy-процессор, способный выполнять восемь программируемых алгоритмов, обрабатывать 256 входных переменных и формировать до 64 выходных значений максимум по 16384 правилам. Может использоваться как отдельное устройство или в качестве сопроцессора для 8 и 16-разрядных микроконтроллеров. Скорость работы – 10 миллионов правил в секунду.

В силу того, что аппаратная реализация, при наличии таких преимуществ как скорость и удобство работы, не всегда может быть доступна (из-за малой распространенности и высокой цены), возможна также программная реализация fuzzy-регулятора системы управления двухканальным компенсатором на основе микроконтроллеров общего назначения (AVR, PIC, MSP, ARM). В данном случае, возможно использование следующих программных средств:

- использование специальной «нечеткой» библиотеки, предоставляющей необходимый «нечеткий» API (нечеткий язык) (Free Fuzzy Logic Library, fuzzyCLIPS);

- использование специальных «конструкторов» нечетких систем и последующая трансляция в код программы микроконтроллера (Matlab, Matematica, CubiCalc, RuleMaker, FuziCalc, FuzzyTech);

- использование специализированных программных средств, позволяющих сразу генерировать код с нечеткой системой под любой микроконтроллер.

© Е. А. Левон, И. Ф. Домнин, 2015

К общим достоинствам программной реализации можно отнести простоту использования и высокую доступность (из-за высокой распространенности микроконтроллеров общего назначения), гибкость создаваемых решений. Недостатки программной реализации – скорость работы нечетких операций (в отличие от аппаратной реализации) и погрешность в вычислениях (из-за вынужденной дискретизации).

Решение поставленной задачи. Структура цифровой системы управления и регулирования

двухканальным компенсатором для ФМЗИ, при аппаратной реализации fuzzy-регулятора на основе микроконтроллера специального назначения, приведена на рис. 1. Микроконтроллер общего назначения сопряжен с микроконтроллером специального назначения через интерфейс внешней памяти.

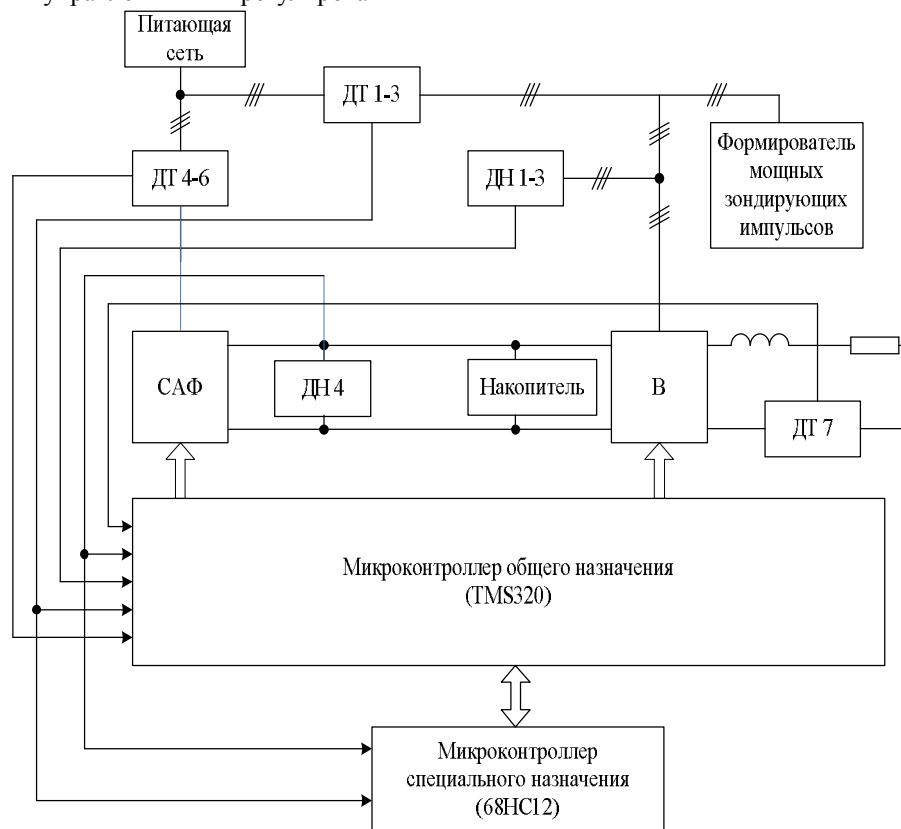


Рис. 1 – Структура цифровой системы управления и регулирования двухканальным компенсатором

Непосредственно управление высокочастотным (САФ) и низкочастотным (В) каналами компенсатора осуществляет микроконтроллер общего назначения TMS320C2812 фирмы «Texas Instrumentals», относящийся к классу сигнальных процессоров.

Микропроцессорная реализация алгоритма управления двухканальным компенсатором с контуром регулирования гармоник тока питающей сети изображена на рис. 2.

После инициализации микропроцессора общего назначения и АЦП, микропроцессор работает в основном цикле программы: получение данных – расчет параметров – выдача управляющих воздействий. Микропроцессор TMS320C2812 имеет тактовую частоту 150 МГц. Основная часть процессорного времени отводится на управление инвертором компенсатора, частота управления

ключами которого находится в диапазоне 15 кГц – 30 кГц. Расчет токов заданий для работы инвертора двухканального полупроводникового компенсатора выполняется на основе р-р или р-р-г теорий мощности.

Управление ключами выпрямителя двухканального компенсатора выполняется с частотой, равной частоте питающей сети. После инициализации микропроцессора общего назначения и АЦП, микропроцессор работает в цикле управления ключами инвертора компенсатора. Переход на управление ключами выпрямителя выполняется по прерыванию каждые 20 мс.

В качестве микроконтроллера специального назначения, с аппаратной поддержкой нечеткой логики, был выбран микроконтроллер 68HC12 фирмы Motorola.

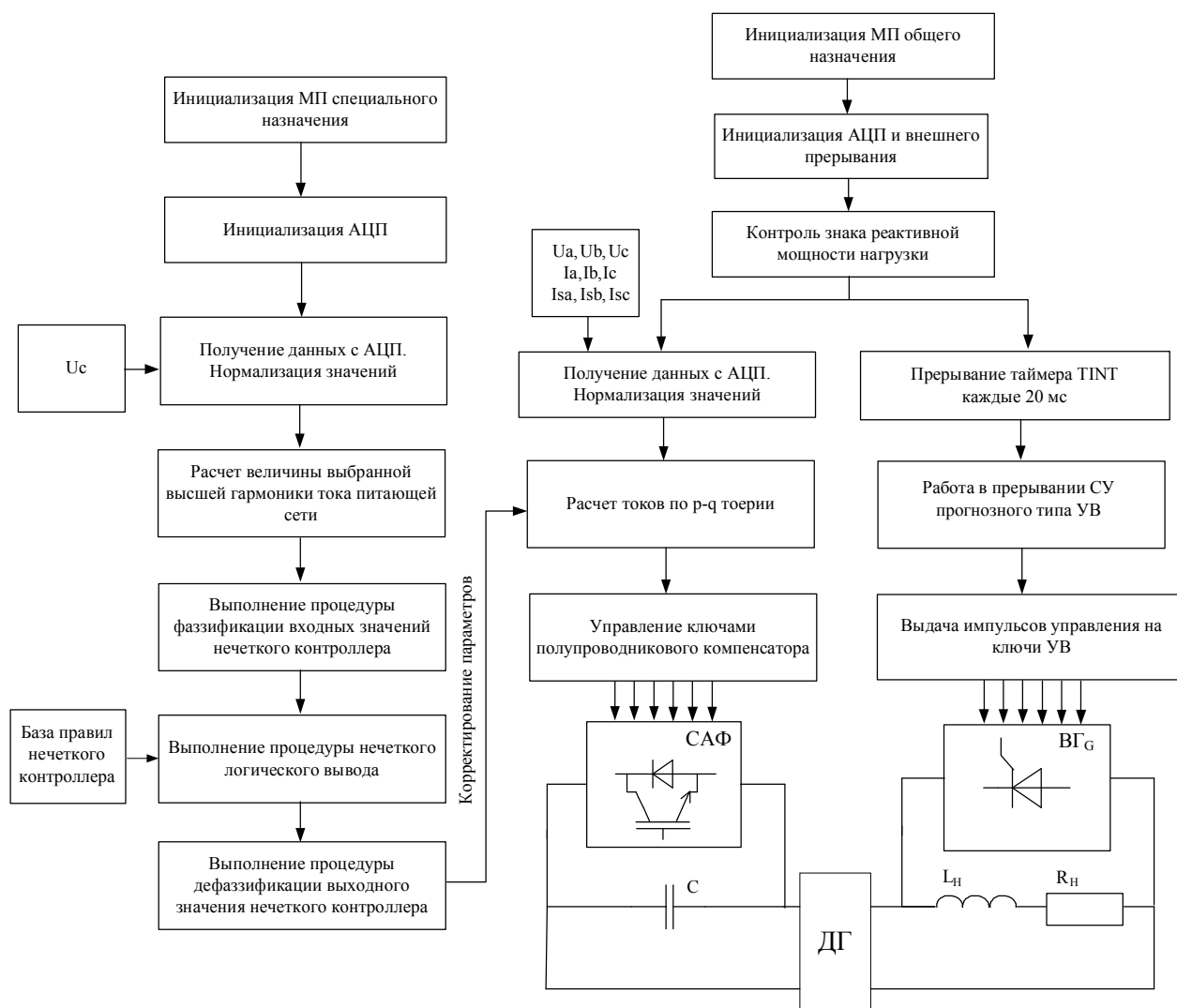


Рис. 2 – Микропроцессорная реализация алгоритма управления двухканальным компенсатором с контуром регулирования гармоник тока питающей сети

Команды нечеткой логики микроконтроллеров семейства 68HC12/912 обеспечивают выполнение ряда специфичных операций, которые позволяют реализовывать на базе выбранного микроконтроллера дополнительный контур регулирования уровня отдельно взятой высшей гармоники тока питающей сети.

На рис. 3 представлена реализация структуры системы нечеткого вывода fuzzy-регулятора дополнительного контура регулирования по уровню отдельно взятой высшей гармоники тока питающей сети в программе fuzzyTECH. В отличие от системы Matlab, программа fuzzyTECH является специализированным средством, которое позволяет разрабатывать и исследовать разнообразные нечеткие модели в графическом режиме, а также

преобразовывать их в программный код на одном из языков программирования с возможностью последующей реализации в программируемых микроконтроллерах. В центре графического интерфейса находится окно редактора проекта (ProjectEditor), в котором отображается структура системы нечеткого вывода в форме прямоугольников переменных и блоков правил. Редактор проекта является основным средством, которое используется для визуализации общей структуры и быстрого доступа к различным инструментам редактирования свойств систем нечеткого вывода в графическом режиме. Редактор проекта программы fuzzyTECH позволяет визуализировать структуру всего проекта и графически представить отношения между компонентами проекта.

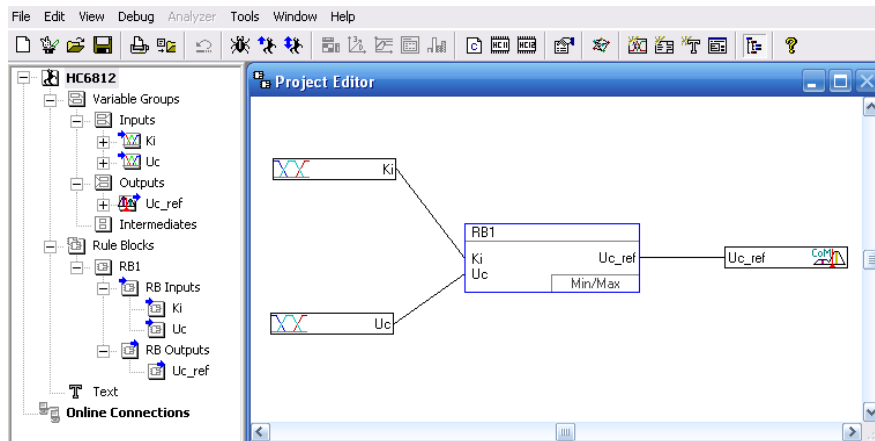


Рис. 3 – Структура системи нечеткого вивода в програмі Fuzzy Tech

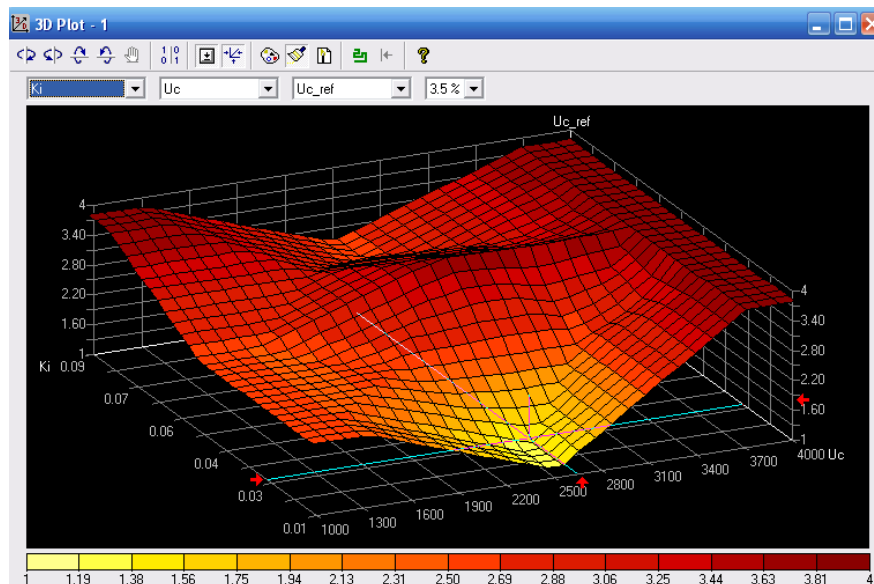


Рис. 4 – Трехмерная поверхность нечеткого вывода

Для общего анализа рассматриваемой нечеткой модели можно воспользоваться графическим окном просмотра поверхности нечеткого вывода на плоскости и графическим окном просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода, показанным на рис. 4.

Данная поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений входных переменных нечеткой модели контура регулирования. Эта зависимость может послужить основой для программирования контроллера или аппаратной реализации соответствующего нечеткого алгоритма управления в форме соответствующей таблицы решений.

Программа fuzzyTECH позволяет осуществить программную реализацию fuzzy-регулятора контура регулирования гармоник тока питающей сети, на основе микроконтроллера нечеткой логики Motorola 68HC12.

Используя лежащую в памяти нечеткую базу знаний, приведенную в [2, 3], микропроцессор решает задачи управления с внедрением нечеткой логики, выполняя 3 главные процедуры:

- фаззификацию - преобразование поступивших данных в значения нечетких входных переменных при помощи соответствующих треугольных функций, характеристики которых выбираются из базы знаний;
- обработку нечетких входных переменных при помощи комплекта логических правил, избираемых из базы знаний;

– дефазифікацію - преобразование нечетких выходных переменных в двоичные значения результатов обработки.

Нижче приведено фрагмент отриманого коду з оголошенням змінних і процедурою дефазифікації на мові Assembler:

```

;----- RAM i/o-vars -----
fuzvals:                ;6 + 3 + 0
fvs:
_t_Ki_hc6812:   ds.b 3
_t_Uc_hc6812:   ds.b 3
_t_Uc_ref_hc6812: ds.b 3
crispio:                ;3
_Ki_hc6812:     ds.b 1
_Uc_hc6812:     ds.b 1
_Uc_ref_hc6812: ds.b 1
;----- defuzzification -----
clr  _invalidflags
ldy  #fuzvals + $6
ldx  #xcom + $0
ldab #$3
stab otcnt
jsr  com()
bcc  out0valid
ldab #$80
out0valid:  stab  _Uc_ref_hc6812
ldab  _invalidflags
rts                ;end of fuzzy controller.

```

Таким образом с помощью программы fuzzyTECH был получен и дополнительно обработан, с целью минимизации времени выполнения

программы, специальный программный код для реализации fuzzy-регулятора контура регулирования гармоник тока питающей сети, на основе микроконтроллера нечеткой логики Motorola 68HC12 на языках C и Assembler.

Выводы. Осуществлена микропроцессорная реализация системы управления двухканальным компенсатором с fuzzy-регулятором. Показана возможность программной реализации цифрового fuzzy-регулятора системы управления двухканальным компенсатором в программе fuzzyTECH.

Список литературы. 1. Домнин И.Ф. Многоконтурная система управления фильтрокомпенсирующим устройством / И.Ф. Домнин, Е.А. Кайда // Техническая электродинамика. – Київ: ІСДНАНУ. – 2010. – Ч. 2, Тематичний вип. – С. 44-47. 2. Domnin I.F. Fuzzy logic based control system of converter for powerful sounding pulses generator / I.F. Domnin, O.O. Levon, V.V. Varyanskaya // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 47 (1089). – Р. 22-27. 3. Кайда Е.А. (Левон Е.А.) Нечеткое регулирование устройством компенсации неактивных составляющих полной мощности / Е.А. Кайда // Техническая электродинамика. – Київ: ІСДНАНУ. – 2011. – Ч. 1, Тематичний вип. – С. 184-188.

Bibliography (transliterated): 1. Domnin I. F., Kaida E. A. Mnogokonturnaya sistema upravleniya filtrokompensiruyushim ustroystvom // Tekhnicheskaya elektrodinamika. – 2010. – Part 2. – P. 44–47. (Rus.) 2. Domnin I. F. Fuzzy logic based control system of converter for powerful sounding pulses generator / I. F. Domnin, O. O. Levon, V. V. Varyanskaya // Visnyk NTU "KhPI" – 2014. – № 47 (1089). – P. 22–27. 3. Kaida E. A. Nechetkoe regulirovanie ustroystvom kompensatii neaktivnykh sostavlyayushih polnoi moshnosti // Tekhnicheskaya elektrodinamika. – 2011. – Part 1. – P. 184 – 188. (Rus.)

Поступила (received) 05.07.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Левон Олена Олександрівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач; тел.: (057) 707-62-15; e-mail: elena_levon@ukr.net

Левон Елена Александровна – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель; тел.: (057) 707-62-15; e-mail: elena_levon@ukr.net

Levon Olena Oleksandrivna – candidate of technical science, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», senior lecturer; tel.: (057) 707-62-15; e-mail: elena_levon@ukr.net

Домнин Игорь Феликсович – доктор технічних наук, професор, директор Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@mail.ru

Домнин Игорь Феликсович – доктор технических наук, профессор, директор Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@mail.ru

Domnin Igor Feliksovich – doctor of technical sciences, professor, director of the Institute of ionosphere NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; tel.: (057) 706-25-99; e-mail: domninpro@mail.ru

УДК 550.388.2

С. В. ГРИНЧЕНКО

РАЗРЫВЫ НЕПРЕРЫВНОСТИ СУТОЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, ВЫЧИСЛЕННОЙ ПО МОДЕЛИ NEQUICK

Модель NeQuick позволяет вычислять высотные профили электронной концентрации для любой точки земного шара в широком диапазоне высот в любое время суток. При построении профиля электронной концентрации областей E, F1, F2 применяются аналитические формулы, включающие в себя выражения для описания отдельных слоёв. В качестве параметров этих формул используются предварительно вычисляемые значения электронной концентрации и высот вершин слоёв. Недостаточная корректность алгоритмизации построения профиля электронной концентрации в областях E, F1 приводит к некоторым неточностям. Например, при расчёте суточного хода электронной концентрации в моменты времени, соответствующие появлению или исчезновению слоя F1, происходит разрыв непрерывности зависимости электронной концентрации от времени.

Ключевые слова: ионосфера, электронная концентрация, NeQuick, IRI.

Общие сведения об ионосферных моделях NeQuick и IRI. Ионосферные модели позволяют рассчитывать параметры ионосферной плазмы в широком высотном диапазоне вокруг земного шара. Наиболее широко используются многими научными группами эмпирические ионосферные модели NeQuick и IRI. Исходные коды этих моделей, написанные на языке Фортран, являются открытыми для доступа на некоторых сайтах. Нынешние компиляторы Фортрана, ориентированные на объектно-ориентированное программирование, поддерживают всевозможные коды, написанные в течение всей 60-летней истории Фортрана. Поэтому имеется возможность на базе фортрановских кодов любых версий создавать современные приложения с использованием графических и сетевых технологий.

При расчёте электронной концентрации вблизи максимума F2 принципиальной разницы между моделями NeQuick и IRI нет, так как критическая частота f_0F2 слоя F2 и высота h_mF2 вершины слоя рассчитываются по одной и той же модели CCIR [1]. Полное электронное содержание в обеих моделях вычисляется интегрированием модельного профиля электронной концентрации.

Ряд исследователей проводят сопоставления расчётов по моделям NeQuick и IRI, сравнения со спутниковыми данными и данными различных наземных радиофизических методов [2-6]. Отмечается хорошее согласие в максимуме слоя F2 и несколько худшее соответствие в остальных частях профиля электронной концентрации. Наибольшие расхождения отмечаются в области экваториальной аномалии.

Европейская модель NeQuick позволяет рассчитывать как вертикальный, так и наклонный профили концентрации электронов в ионосфере. При расчёте вертикального высотного профиля электронной концентрации программа NeQuick использует в качестве входных данных географические координаты точки расчёта, номер месяца в году, местное время и индекс $F_{10.7}$ уровня солнечной активности. При расчёте наклонного профиля задаются координаты концов наклонного отрезка расчётов.

Модель NeQuick является продуктом нескольких европейских научных организаций, занимающихся ионосферными исследованиями. Головной по разработке модели NeQuick является лаборатория связи в Международном центре теоретической физики (Италия, г. Триест). Международный союз электросвязи рекомендует использовать модель NeQuick рекомендуется для расчёта линий связи.

В Европейском научном сообществе ионосферной модели NeQuick уделяется значительное внимание. Ежегодно в Международном Центре теоретической физики проходят семинары, ассамблеи, конференции, посвящённые развитию и применению модели NeQuick.

Постановка проблемы разрыва непрерывности суточных вариаций электронной концентрации согласно расчётам по модели NeQuick. При расчёте электронной концентрации в течение суток в утренние и вечерние моменты времени, соответствующие появлению и исчезновению слоя F1, происходит разрыв временной непрерывности вычисления электронной концентрации. На рис. 1 представлено суточное изменение электронной концентрации, рассчитанной по модели NeQuick в точке с координатами Харьковского радара некогерентного рассеяния. Расчётный месяц – июнь, индекс $F_{10.7}=100$. Десятичный логарифм значения электронной концентрации представлен соответствующим серым цветом. Сама электронная концентрация измеряется в см^{-3} .

Для черно-белой печати данного издания рисунок выполнен в серых цветах. Серые цвета представляют комбинации одинаково насыщенных красного, зелёного и синего цветов система. RGB-значения серых цветов равны AABVCC₁₆. Чёрный цвет имеет RGB-значение 000000₁₆, белый цвет определяется RGB-значением FFFFFFF₁₆. Количество серых цветов равно 256. Естественно, данный рисунок может быть выполнен и «в цвете». Количество цветов в этом случае равно $16^6=256^3=16777216$.

© С. В. Гринченко, 2015

В моменты появления и исчезновения слоя F1 наблюдается разрыв цветности рисунка, т.е. разрыв в непрерывности зависимости значения электронной концентрации от местного времени.

На рис. 2 изображены высотные профили электронной концентрации соответствующие утреннему разрыву непрерывности. Крестиками

обозначены вершины слоёв E, F1, F2, предварительно вычисляемые в модели NeQuick при построении высотного профиля. Как видно из рисунка, при наличии слоя F1 точка, соответствующая вычисляемым параметрам вершины слоя F1, не лежит на профиле электронной концентрации.

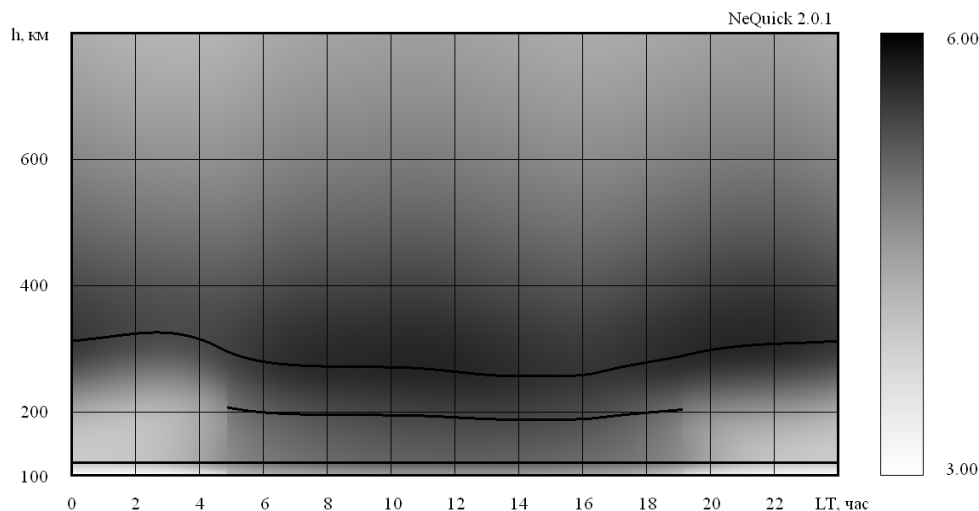


Рис. 1 – Разрыв в непрерывности зависимости значения электронной концентрации от местного времени в моменты появления и исчезновения слоя F1: июнь, индекс $F_{10.7}=100$

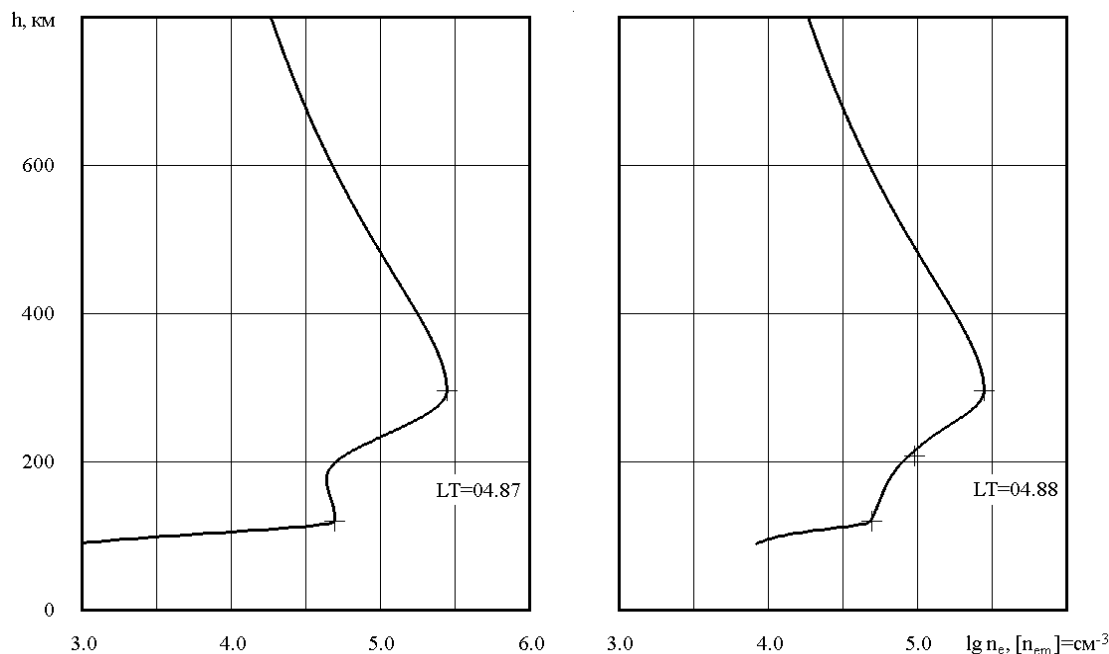


Рис. 2 – Скачок в изменении электронной концентрации модели NeQuick в момент появления слоя F1

В модели NeQuick высота слоя E является фиксированной и равной 120 км. Высота слоя F1 вычисляется по приближённой формуле (высота слоя F1 равна полусумме высот слоёв E и F2).

Расчёты показывают, что по модели NeQuick слой F1 существует в дневное время и летом, и зимой;

причём с ростом солнечной активности временной интервал существования слоя F1 расширяется. Это противоречит общепринятым представлениям о вариациях слоя F1, согласно которым слой F1 проявляется преимущественно в летнее дневное время при низкой солнечной активности.

Хотя вопрос о разрыве непрерывности суточных вариаций значений электронной концентрации, вычисляемых по модели NeQuick, кажется автору статьи не только естественным, но и актуальным [7], в литературе эта проблема никогда не обсуждалась. Тем более, эффект дискретного изменения профиля электронной концентрации в моменты появления и исчезновения слоя F1 присутствует и в модели IRI. В модели IRI этот разрыв количественно менее выражен.

Задачей, решаемой автором статьи, является выяснение особенностей алгоритма программы модели NeQuick, вызывающих нарушение непрерывности зависимости от местного времени в моменты появления и исчезновения слоя F1.

Базовые формулы, используемые в модели NeQuick при построении профиля электронной концентрации ниже области F2. Модель NeQuick базируется на использовании функции Эпштейна

$$f(x, y, z, w) = \frac{x}{\left(1 + e^{\frac{w-y}{z}}\right)^2} e^{\frac{(w-y)}{z}} \quad \text{при описании}$$

отдельных слоёв электронной концентрации [8-11]. Для каждого из слоёв E, F1, F2 электронная концентрация задаётся формулой:

$$n_e(h) = n_e(h; h_m, n_{em}, B) = \frac{4n_{em}}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m}{B}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m}{B}},$$

где h – высота расчёта электронной концентрации; h_m – высота максимума электронной концентрации слоя; n_{em} – максимальное значение электронной концентрации слоя; B – параметр, описывающий толщину слоя.

$$\text{Как видно, } n_e(h_m) = \frac{4n_{em}}{(1+1)^2} \cdot 1 = n_{em}.$$

Высотный профиль электронной концентрации областей E, F1, F2 описывается формулой:

$$n_e(h) = n_e^E(h) + n_e^{F1}(h) + n_e^{F2}(h),$$

где:

$$n_e^E(h) = n_e^E(h; h_m^E, n_{em}^E, B^E) = \frac{4n_{em}^E}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m^E}{B^E}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m^E}{B^E}},$$

$$n_e^{F1}(h) = n_e^{F1}(h; h_m^{F1}, n_{em}^{F1}, B^{F1}) = \frac{4n_{em}^{F1}}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m^{F1}}{B^{F1}}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m^{F1}}{B^{F1}}},$$

$$n_e^{F2}(h) = n_e^{F2}(h; h_m^{F2}, n_{em}^{F2}, B^{F2}) = \frac{4n_{em}^{F2}}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m^{F2}}{B^{F2}}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m^{F2}}{B^{F2}}}.$$

Анализ аналитического описания слоя электронной концентрации модели NeQuick.

Электронная концентрация слоя

$$n_e(h) = n_e(h; h_m, n_{em}, B) = \frac{4n_{em}}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m}{B}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m}{B}}.$$

Для выяснения физического смысла параметра B

вычислим отношения $\frac{n_{em}}{n_e(h_m - B)}$ и $\frac{n_{em}}{n_e(h_m + B)}$:

$$\frac{n_{em}}{n_e(h_m - B)} = \frac{n_{em}}{\frac{4n_{em}}{(1+e^{-1})^2} e^{-1}} = \frac{(e+1)^2}{4e},$$

$$\frac{n_{em}}{n_e(h_m + B)} = \frac{n_{em}}{\frac{4n_{em}}{(1+e)^2} e} = \frac{(e+1)^2}{4e}.$$

Таким образом, параметр B – это полутолщина слоя, при которой значение электронной концентрации уменьшается в $\frac{(e+1)^2}{4e} \approx 1.2715$ раза.

При этом $\lg n_{em} - \lg n_e(h_m - B) = \lg n_{em} - \lg n_e(h_m + B) =$

$$= \lg \frac{(e+1)^2}{4e}, \text{ т.е. десятичный логарифм электронной}$$

концентрации уменьшается на $\lg \frac{(e+1)^2}{4e} \approx 0.10433$.

Кривая $n_e(h)$ симметрична относительно прямой (оси симметрии) $h=h_m$. Это видно из следующих соотношений:

$$n_e(h_m + \Delta h) = \frac{4n_{em}}{\left(1 + e^{\frac{\Delta h}{B}}\right)^2} e^{\frac{\Delta h}{B}},$$

$$n_e(h_m - \Delta h) = \frac{4n_{em}}{\left(1 + e^{-\frac{\Delta h}{B}}\right)^2} e^{-\frac{\Delta h}{B}} =$$

$$= \frac{4n_{em}}{\left(e^{\frac{\Delta h}{B}} + 1\right)^2} e^{\frac{\Delta h}{B}} = n_e(h_m + \Delta h).$$

Понятно, что и кривая $\lg n_e(h)$ симметрична относительно прямой $h=h_m$.

На рис. 3 приведены примеры слоя F1 с параметрами $h_m=180$ км, $\lg n_{em}=5.3$ ($[n_{em}]=\text{см}^{-3}$), $B=10$ км и слоя F2 с параметрами $h_m=260$ км, $\lg n_{em}=5.8$, $B=25$ км.

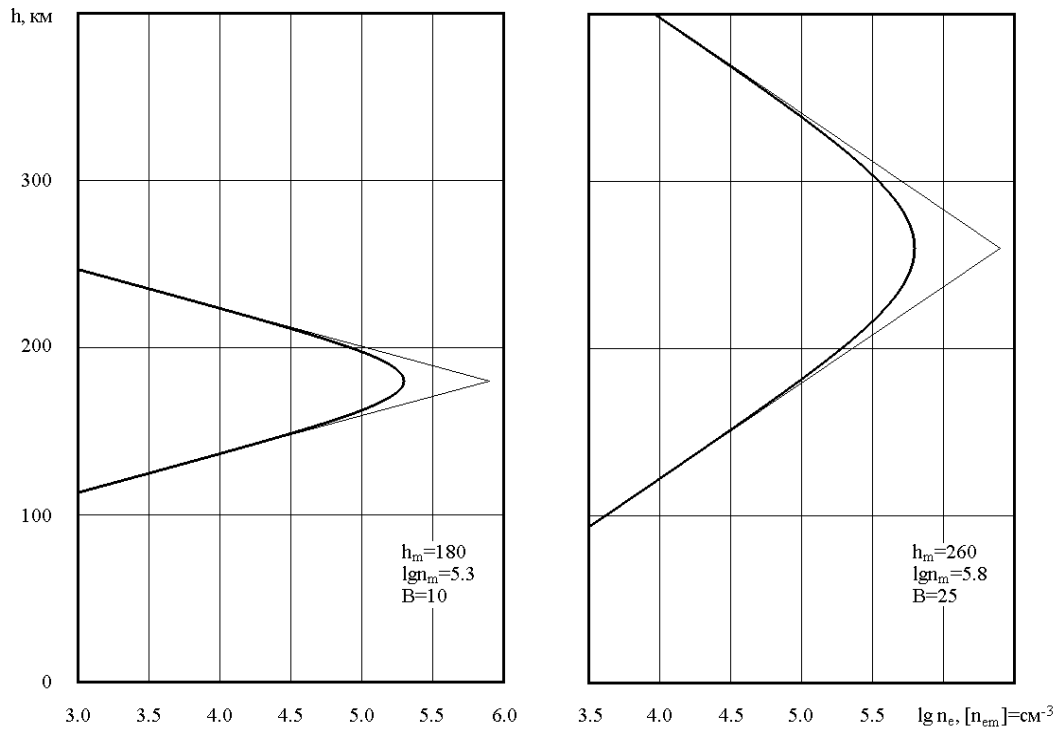


Рис. 3 – Примеры графиков слоёв F1, F2 и их асимптотических прямых

Проведём элементарный анализ кривой $\lg n_e(h)$ на предмет пригодности её для описания слоя электронной концентрации:

$$\ln n_e(h) = \ln 4 + \ln n_{em} - 2 \ln \left(1 + e^{\frac{h-h_m}{B}} \right) + \frac{h-h_m}{B},$$

$$\begin{aligned} (\ln n_e(h))' &= \frac{-2}{1+e^{\frac{h-h_m}{B}}} e^{\frac{h-h_m}{B}} \cdot \frac{1}{B} + \frac{1}{B} = \\ &= \frac{1}{B} \cdot \frac{1-e^{\frac{h-h_m}{B}}}{1+e^{\frac{h-h_m}{B}}} \end{aligned}$$

Производная $(\lg n_e(h))' = \frac{1}{\ln 10} (\ln n_e(h))' = 0$ при $h = h_m$; при $h > h_m$ производная $(\lg n_e(h))' < 0$; при $h < h_m$ производная $(\lg n_e(h))' > 0$. Следовательно, точка $h = h_m$ является точкой максимума функции $\lg n_e(h)$.

В силу наличия оси симметрии $h = h_m$ графика слоя электронной концентрации значения производной $(\lg n_e(h))'$ должны отличаться знаком в точках высоты h , равноудалённых от значения $h = h_m$:

$$(\lg n_e(h_m + \Delta h))' = \frac{1}{\ln 10 \cdot B} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\Delta h}{B}}}{1 + e^{-\frac{\Delta h}{B}}},$$

$$\begin{aligned} (\lg n_e(h_m - \Delta h))' &= \frac{1}{\ln 10 \cdot B} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{\Delta h}{B}}}{1 + e^{-\frac{\Delta h}{B}}} = \\ &= \frac{1}{\ln 10 \cdot B} \cdot \frac{e^{\frac{\Delta h}{B}} - 1}{e^{\frac{\Delta h}{B}} + 1} = -(\lg n_e(h_m + \Delta h))'. \end{aligned}$$

Вторая производная

$$\begin{aligned} (\ln n_e(h))'' &= \frac{1}{B} \left(\frac{-2e^{-\frac{h-h_m}{B}}}{1+e^{-\frac{h-h_m}{B}}} + 1 \right)' = \\ &= -\frac{2}{B} \cdot \frac{1 \cdot \left(1 + e^{-\frac{h-h_m}{B}} \right) - e^{-\frac{h-h_m}{B}} \cdot 1}{\left(1 + e^{-\frac{h-h_m}{B}} \right)^2} \cdot e^{-\frac{h-h_m}{B}} \cdot \frac{1}{B} = \\ &= -\frac{2}{B^2} \frac{e^{-\frac{h-h_m}{B}}}{\left(1 + e^{-\frac{h-h_m}{B}} \right)^2}. \end{aligned}$$

Производная второго порядка $(\lg n_e(h))'' = \frac{1}{\ln 10} (\ln n_e(h))'' < 0$ при всех значения аргумента h . Следовательно, кривая $\lg n_e(h)$ является выпуклой.

Так как график слоя электронной концентрации симметричен относительно прямой $h = h_m$, значения второй производной $(\lg n_e(h))''$ в точках высоты h , равноудалённых от $h = h_m$, равны друг другу:

$$\begin{aligned} (\lg n_e(h_m + \Delta h))'' &= -\frac{2}{\ln 10 \cdot B^2} \frac{e^{\frac{\Delta h}{B}}}{\left(1 + e^{\frac{\Delta h}{B}}\right)^2}, \\ (\lg n_e(h_m - \Delta h))'' &= -\frac{2}{\ln 10 \cdot B^2} \frac{e^{-\frac{\Delta h}{B}}}{\left(1 + e^{-\frac{\Delta h}{B}}\right)^2} = \\ &= \frac{2}{\ln 10 \cdot B^2} \frac{e^{\frac{\Delta h}{B}}}{\left(e^{\frac{\Delta h}{B}} + 1\right)^2} = (\lg n_e(h_m + \Delta h))''. \end{aligned}$$

Исследуем наличие асимптот кривой $n_e(h)$:

$$\begin{aligned} n_e(h) &= \frac{4n_{em}}{\left(1 + e^{\frac{h-h_m}{B}}\right)^2} e^{\frac{h-h_m}{B}} = \frac{4n_{em}}{\left(e^{-\frac{h-h_m}{B}} + 1\right)^2} e^{\frac{h-h_m}{B}} = \\ &= \frac{4n_{em}}{\left(\frac{1}{e^{\frac{h-h_m}{B}}} + \frac{2}{e^{\frac{h-h_m}{B}}} + 1\right)^2} e^{\frac{h-h_m}{B}} = \frac{4n_{em}}{e^{\frac{h-h_m}{B}} + 2 + e^{-\frac{h-h_m}{B}}}. \end{aligned}$$

При значениях высоты h , значительно превышающих высоту максимума слоя ($h \gg h_m$), формула для аналитического описания электронной концентрации слоя принимает вид: $n_e(h) \approx \frac{4n_{em}}{e^{\frac{h-h_m}{B}}}$. При значениях высоты h , меньших высоты максимума слоя, электронная концентрация слоя $n_e(h) \approx 4n_{em} e^{\frac{h-h_m}{B}}$. Обе асимптотические экспоненты имеют большие значения, чем $n_e(h)$.

Из асимптотических приближений $n_e(h)$ получаются асимптоты $\lg n_e(h)$. При $h \gg h_m$ логарифм $\lg n_e(h) \approx \lg 4 + \lg n_{em} - \frac{h-h_m}{B} \lg e$. При $h \ll h_m$ логарифм $\lg n_e(h) \approx \lg 4 + \lg n_{em} + \frac{h-h_m}{B} \lg e$.

Прямая $\lg n_e(h) \approx \lg 4 + \lg n_{em} - \frac{h-h_m}{B} \lg e$ является наклонной асимптотой десятичного логарифма электронной концентрации слоя выше максимума слоя.

Прямая $\lg n_e(h) \approx \lg 4 + \lg n_{em} - \frac{h-h_m}{B} \lg e$ является наклонной асимптотой ниже максимума слоя. Обе прямые пересекаются в точке $(h_m; \lg 4 + \lg n_{em})$.

Моделирование высотного профиля электронной концентрации как суммы профилей отдельных слоёв. Если слои E и F2 существуют в течение всех суток, то слой F1 существует только днём. Поэтому в дневное время электронная концентрация областей $n_e(h) = n_e^E(h) + n_e^{F1}(h) + n_e^{F2}(h)$, а в остальное время – $n_e(h) = n_e^E(h) + n_e^{F2}(h)$. В моменты появления или исчезновения слоя F1 профиль электронной концентрации терпит скачок (см. рис. 4).

В результате сложения слоёв вершины слоёв E, F1 суммарного профиля электронной концентрации смещаются от первоначального положения вершин отдельных слоёв.

Анализ кода программы показывают, что в программе присутствует алгоритмы, препятствующие смещению вершин слоёв. Если вершина слоя E практически не смещается, то вычисляемые вершины слоя F1 по-прежнему не лежат на самих профилях электронной концентрации. Побочным эффектом этих алгоритмов оказывается также то, что на профиле электронной концентрации модели NeQuick практически не прорисовываются слои E, F1. На рис. 5 показан пример несовпадения вычисляемой по модели NeQuick точки слоя F1 с линией профиля электронной концентрации. Входные данные расчётов: $\varphi=49.7$; $\lambda=36.3$; $mth=12$; $F_{10.7}=100$. То, что предварительно вычисляемая вершина слоя F1 не лежит на профиле электронной концентрации, наблюдается и на рис. 2.

Для проверки работоспособности фортрановского кода модели NeQuick версии 2.0.1, скачанного с открытых для доступа сайтов, было проведено сравнение расчётов, выполненных с помощью кода программы, с результатами вычисления профиля электронной концентрации в режиме on-line. На рис. 5 изображены высотные профили электронной концентрации, вычисленные по модели NeQuick для одних и тех же входных данных: один – по реальной программе, проект которой сделан из имеющегося фортрановского текста, а другой профиль электронной концентрации вычислен в режиме «он-лайн» через Интернет. Рис. 5 иллюстрирует идентичность расчётов.

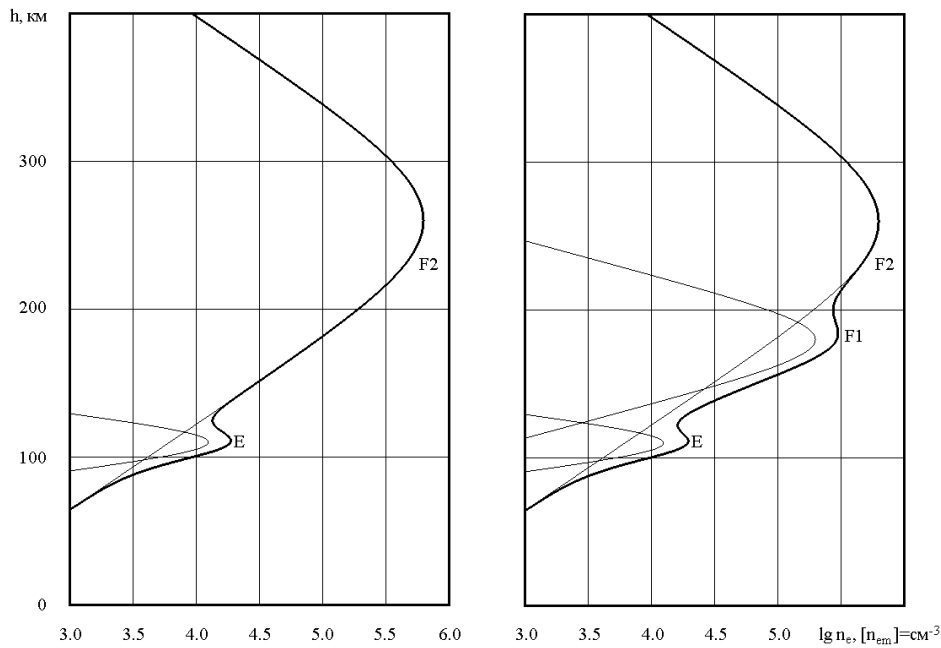


Рис. 4 – Дискретное изменение профиля электронной концентрации в моменты появления или исчезновения слоя F1

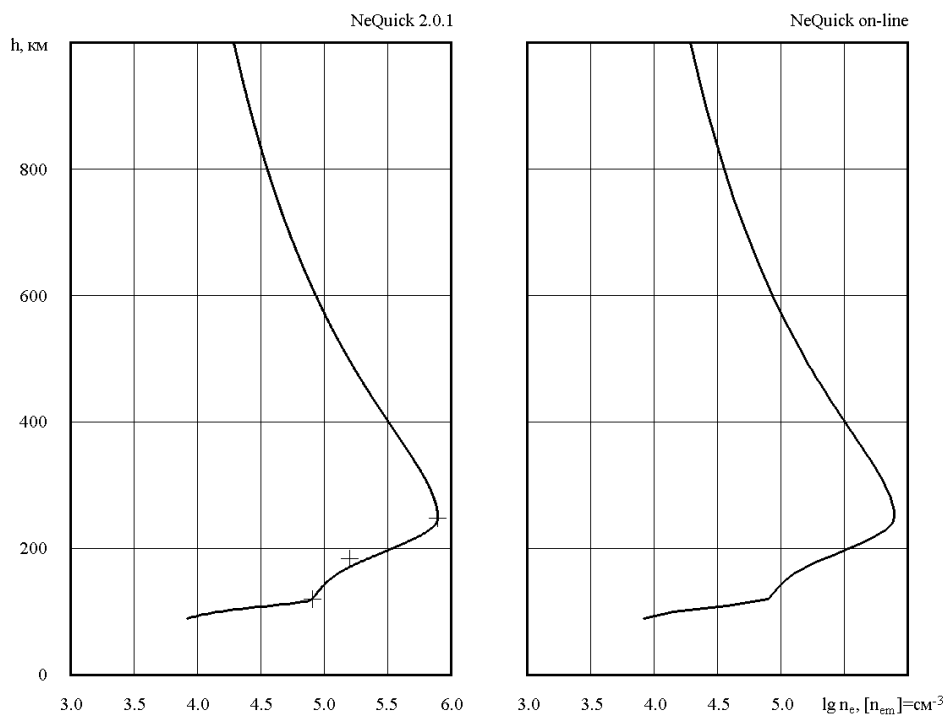


Рис. 5 – Сравнение результатов расчётов по модели NeQuick, проведенных автономно и в режиме on-line

Выводы. При вычислении по модели NeQuick электронной концентрации в течение суток в утренние моменты появления слоя F1 и вечерние моменты его исчезновения наблюдаются разрывы непрерывности изменения электронной концентрации. На профиле электронной концентрации модели NeQuick практически не проявляются слои E, F1. Кроме того,

часто вычисляемые вершины слоя F1 не лежат на самих профилях электронной концентрации. Причиной этого является недостаточная корректность алгоритмизации построения профиля электронной концентрации в областях E, F1.

К менее значимым некорректностям можно отнести то, в модели NeQuick высота слоя E является

фіксованою і рівною 120 км, а висота слоя F1 вивчається по приблизній формулі як полусума висот слоїв E і F2. Згідно моделі NeQuick слой F1 існує в денне час і літом, і зимою; причём з ростом сонячної активності часовий інтервал існування слоя F1 розширюється, що суперечить загальноприйнятими представленнями про варіації слоя F1.

Список літератури: 1. *Grinchenko S.V.* Seasonal anomaly in variations of global distributions of F2-layer electron density according to CCIR model / *S.V. Grinchenko* // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Радіофізика та іоносфера. – 2014. – № 47 (1089). – С. 74–91. 2. *Radicella S.M.* The evolution of the DGR approach to model electron density profiles / *S.M. Radicella, R. Leitinger* // Adv. Space. Res. – 2001. – Vol. 27, No. 1. – P. 35–40. 3. *Leitinger R.* An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick / *R. Leitinger, M.–L. Zhang, S.M. Radicella* // Annals of Geophysics. – 2005. – Vol. 48, No. 3. – P. 525–534. 4. *Coisson P.* Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations / *P. Coisson, S.M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava* // Adv. Space. Res. – 2006. – Vol. 37, No. 5. – P. 937–942. 5. *Nava B.A.* New version of the NeQuick ionosphere electron density model / *B. Nava, P. Coisson, S.M. Radicella* // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2008. – Vol. 70, No. 15. – P. 1856–1862. 6. *Buresova D.* Data ingestion and assimilation in ionospheric models / *D. Buresova, B. Nava, I. Galkin, et al.* // Annals of Geophysics. – 2009. – Vol. 52, No. 3/4. – P. 235–253. 7. *Грінченко С.В.* Некоректності моделі NeQuick при розрахунок електронної концентрації нижче головного максимуму / *С.В. Грінченко* // 15th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts. Odesa, Ukraine, August 24–28, 2015. Kyiv. – 2015. – 226 p. – P. 130. 8. *Giovanni G.Di.* An analytical model of the electron density profile in the ionosphere / *G.Di. Giovanni, S.M. Radicella* // Adv. Space. Res. – 1990. – Vol. 10, No. 11. – P. 27–30. 9. *Radicella S.M.* The improved DGR analytical model of electron density profile and total content in the ionosphere / *S.M. Radicella, M.–L. Zhang* // Annals of Geophysics. – 1995. – Vol. 38, No. 1. – P. 35–41. 10. *Radicella S.M.* The NeQuick model genesis, uses and evolution / *S.M. Radicella* // Annals of Geophysics. – 2009. – Vol. 52, No. 3/4. – P. 417–422. 11. *Radicella S.M.* NeQuick model: origin and evolution /

S.M. Radicella, B. Nava // Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. – 2010. – P. 422–425.

Bibliography (transliterated): 1. Grinchenko, S. V. Seasonal anomaly in variations of global distributions of F2-layer electron density according to CCIR model / S. V. Grinchenko // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. Scientific Papers. Series: Radiophysics and ionosphere. – 2014. – No 47 (1089). – P. 74–91. 2. Radicella, S. M. The evolution of the DGR approach to model electron density profiles / S. M. Radicella, R. Leitinger // Adv. Space. Res. – 2001. – Vol. 27, No. 1. – P. 35–40. 3. Leitinger, R. An improved bottomside for the ionospheric electron density model NeQuick / R. Leitinger, M.–L. Zhang, S. M. Radicella // Annals of Geophysics. – 2005. – Vol. 48, No. 3. – P. 525–534. 4. Coisson, P. Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations / P. Coisson, S. M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava // Adv. Space. Res. – 2006. – Vol. 37, No. 5. – P. 937–942. 5. Nava, B. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model / B. Nava, P. Coisson, S. M. Radicella // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2008. – Vol. 70, No. 15. – P. 1856–1862. 6. Buresova, D. Data ingestion and assimilation in ionospheric models / D. Buresova, B. Nava, I. Galkin, et al. // Annals of Geophysics. – 2009. – Vol. 52, No. 3/4. – P. 235–253. 7. Grinchenko, S. V. Some incorrectnesses of NeQuick model at electron density calculation below the main maximum / S. V. Grinchenko // 15th Ukrainian Conference on Space Research. Abstracts. Odesa, Ukraine, August 24–28, 2015. Kyiv. – 2015. – 226 p. – P. 130. 8. Giovanni, G. Di. An analytical model of the electron density profile in the ionosphere / G. Di. Giovanni, S. M. Radicella // Adv. Space. Res. – 1990. – Vol. 10, No. 11. – P. 27–30. 9. Radicella, S. M. The improved DGR analytical model of electron density profile and total content in the ionosphere / S. M. Radicella, M.–L. Zhang // Annals of Geophysics. – 1995. – Vol. 38, No. 1. – P. 35–41. 10. Radicella, S. M. The NeQuick model genesis, uses and evolution / S. M. Radicella // Annals of Geophysics. – 2009. – Vol. 52, No. 3/4. – P. 417–422. 11. Radicella, S. M. NeQuick model: origin and evolution / S. M. Radicella, B. Nava // Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. – 2010. – P. 422–425.

Поступила (received) 03.08.2015

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.

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

УДК 621.372

В. П. СЕВЕРИН, О. М. НІКУЛІНА, М. І. АХТИРЦЕВ

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОСТУПЕНЕВИХ ГЕНЕРАТОРІВ ІМПУЛЬСІВ НАПРУГИ

З використанням базової моделі одноступеневого генератора імпульсів напруги розроблена математична модель багатоступеневого генератора в режимі розряду з довільною кількістю каскадів. На основі створеної математичної моделі запропоноване програмне забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів, що протікають у генераторі. Проведений аналіз перехідних процесів в багатоступеневому генераторі показує його здатність формувати імпульси високої напруги з короткою тривалістю фронту.

Ключові слова: генератор імпульсів напруги, математична модель, диференціальні рівняння, системний метод інтегрування, імітаційне моделювання, програмне забезпечення.

Вступ. Дослідження процесів, які мають місце в радіоелектронних схемах, що призначені для генерації потужних короткострокових електричних імпульсів, є актуальним [1, 2]. В таких схемах перехідні процеси протікають занадто швидко і зареєструвати їх фізичними інструментами та дослідити практично неможливо [3]. Доцільність методів математичного моделювання також викликається великими матеріальними затратами на проведення натурних експериментів з потужними електричними генераторами [4]. Найбільш поширеними серед потужних електричних генераторів є багатокаскадні генератори імпульсів напруги (ГІН) – генератори Маркса [1, 2]. В генераторах Маркса з'єднані паралельно конденсатори поступово заряджаються електричним струмом. Після заряду ці конденсатори за допомогою швидких комутуючих пристроїв, наприклад, газових розрядників, миттєво з'єднуються послідовно. В результаті розряду конденсаторів на вихідному навантаженні генерується електричний короткостроковий імпульс високої напруги.

Удосконалена схема генератора Маркса, що включає суттєві паразитні електричні елементи, які впливають на формування швидкоплинних потужних імпульсів напруги, запропонована Г. Г. Губаревим [5]. Ця схема є досить складною, тому спочатку відокремлено один каскад і отримана його модель а також проміжні результати для створення багатоступеневої моделі [6]. Оскільки потужні генератори електричних імпульсів є досить складними радіоелектронними приладами з багатьма електричними елементами, їх математичні моделі представляють жорсткі системи диференціальних рівнянь (СДР) високого порядку. Одним з ефективних методів для розв'язання жорстких СДР є системний метод інтегрування, заснований на обчисленні матричної експоненти та її інтегралу, з нескладним алгоритмом реалізації [7, 8].

Мета статті полягає в представленні математичної моделі та програмного забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів в потужних багатоступеневих генераторів імпульсів напруги.

Математична модель багатоступеневого генератора імпульсів напруги. Для розробки математичної моделі багатоступеневого ГІН як базова вибрана удосконалена одноступенева модель ГІН [6].

Загальна схема генератора з n каскадами при $n \geq 3$ зображена на рис. 1 [5].

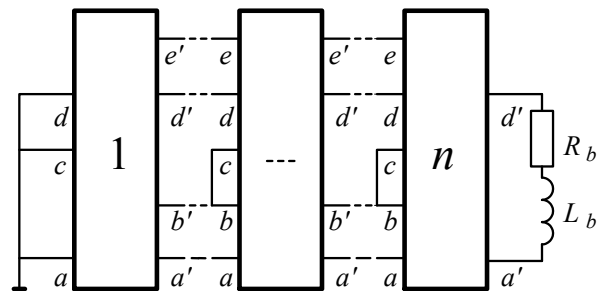


Рис. 1 – Схема багатоступеневого генератора

Кожен каскад є багатополосником, електрична схема якого показана на рис. 2.

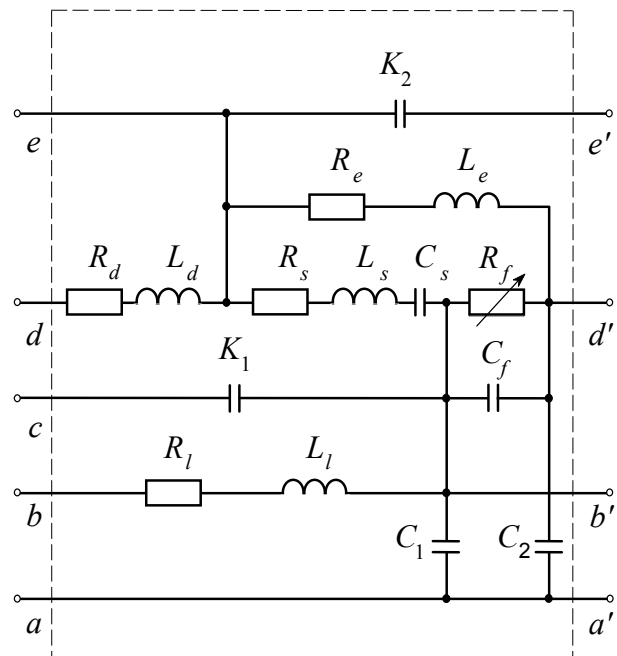


Рис. 2 – Електрична схема каскаду

На цій схемі позначені еквівалентні параметри генератора: R_s, L_s, C_s – параметри розрядного конденсатора; R_f, C_f – параметри розрядника; R_d, L_d – параметри демпфуючого опору; R_l, L_l –

параметри зарядного опору; R_e, L_e – параметри розрядного опору; C_1 – ємність елемента, що має зарядний потенціал під час заряду; C_2 – ємність елемента, що має нульовий потенціал під час розряду; K_1 – ємність елемента між ступенями, що мають зарядний потенціал під час заряду; K_2 – ємність

електричних елементів між сусідніми ступенями ГН, які мають нульовий потенціал під час розряду; R_b і L_b – еквівалентні параметри навантаження.

Як приклад на рис. 3 представлена схема генератора імпульсів напруги з трьома каскадами.

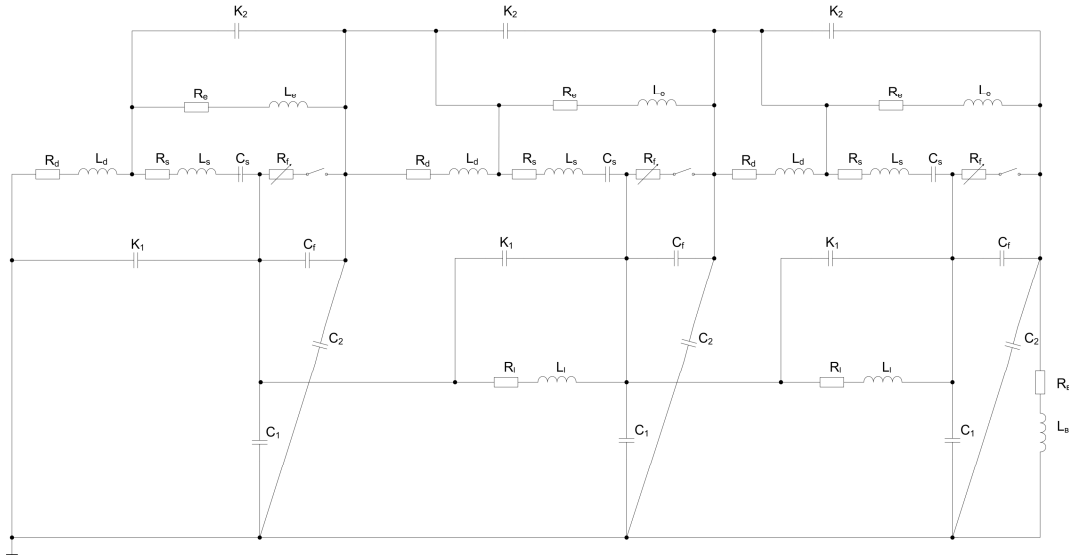


Рис. 3 – Електрична схема генератора з трьома каскадами

За законами Кірхгофа, а також на основі резистивної моделі розрядника та моделі одноступеневого генератора складена математична модель у вигляді алгоритму, де індекси струму i та напруги U відповідають елементам схеми на рис. 2.

Крок 1. Задати значення параметрів і початкові умови: $C_s, C_f, C_1, C_2, K_1, K_2, L_s, L_d, L_e, L_l, L_b, R_s, R_d, R_e, R_l, R_b, R_{min}, d, K_T, U_s, K_{Q0}, i_s = i_d = i_e = i_b = i_l = 0, U_{C_s} = U_{C_f} = U_s, U_{K_2} = 0, U_{C_1} = -U_s, Q = 0, V_b = 1$.

Крок 2. Обчислити значення допоміжних параметрів: $C_{si} = 1/C_s, K_{2i} = 1/K_2, L_{bi} = 1/L_b, L_{di} = 1/L_d, L_{ei} = 1/L_e, L_{si} = 1/L_s, K_{di} = 1/(K_T \cdot d), U_{f_{max}} = 1,2 \cdot U_s, Q_0 = K_{Q0} \cdot C_s \cdot U_s, Q^{(1)} = Q_0, G_{max} = 1/R_{min}, C_{11} = -K_1 - C_1, C_c = C_2 + C_f, C_k = C_{11} - K_{11}$.

Крок 3. Обчислити провідність розрядника $G = Q \cdot K_{di}$ і якщо $G > G_{max}$, то покласти $G = G_{max}$; обчислити $i_f = -U_{C_f} \cdot G$ і скласти рівняння $dQ/dt = |i_f|$. Середня і остання ступінь: для $(V_b = 1) \cap (|U| > U_{f_{max}})$, то присвоїти $V_b = 0, Q = Q_0$, для $V_b = 1$, присвоїти $i = 0, dQ/dt = 0$. Інакше присвоїти: $G = Q \cdot K_{di}$, а для $G > G_{max}$, то покласти $G = G_{max}$; обчислити $i_f = U_{C_f} \cdot G, dQ/dt = |i_f|$.

Крок 4. Сформувати рівняння струмів:
Остання ступінь:

$$U_{C_2} = U_{C_f} + U_{C_1}, U_{s_f} = U_{K_2}, U_d = U_{C_2} + U_{s_f} - U_{C_2},$$

$$\begin{cases} di_s/dt = (U_{C_f} - U_{K_2} - U_{s_f} - U_{C_s} - R_s \cdot i_s) \cdot L_{si}, \\ di_d/dt = (U_d - R_d \cdot i_d) \cdot L_{di}, \\ di_e/dt = (U_{s_f} - R_e \cdot i_e) \cdot L_{ei}, \\ di_l/dt = (U_{C_1} - U_{C_1} - R_l \cdot i_l) \cdot L_{li}, \\ di_b/dt = (U_{C_2} - R_b \cdot i_b) \cdot L_{bi}. \end{cases}$$

Середні ступені:

$$U_{C_2} = U_{C_f} + U_{C_1}, U_{s_f} = U_{K_2} + U_d^+,$$

$$U_d = U_{C_2} + U_{s_f} - U_{C_2},$$

$$\begin{cases} di_d/dt = (U_d - R_d \cdot i_d) \cdot L_{di}, \\ di_e/dt = (U_{s_f} - R_e \cdot i_e) \cdot L_{ei}, \\ di_l/dt = (U_{C_1} - U_{C_1} - R_l \cdot i_l) \cdot L_{li} \end{cases}$$

Перша ступінь:

$$U_{C_2} = U_{C_f} + U_{C_1}, U_{s_f} = U_{K_2} + U_d^+,$$

$$\begin{cases} di_s/dt = (U_{C_f} - U_{s_f} - U_{C_s} - R_s \cdot i_s) \cdot L_{si}, \\ di_d/dt = (U_{s_f} - U_{C_2} - R_d \cdot i_d) \cdot L_{di}, \\ di_e/dt = (U_{s_f} - R_e \cdot i_e) \cdot L_{ei}. \end{cases}$$

Крок 5. Скласти рівняння напруг:

Перша ступінь:

$$i_{K_2} = i_s - i_d - i_e, \begin{cases} dU_{C_s}/dt = i_s \cdot C_{si}, \\ dU_{K_2}/dt = i_{K_2} \cdot K_{2i}. \end{cases}$$

Середня та остання ступені:

$$i_{K2} = i_s - i_d - i_e - i_{K2}^-, \quad \begin{cases} dU_{Cs}/dt = i_s \cdot C_{si}, \\ dU_{K2}/dt = i_{K2} \cdot K_{2i}. \end{cases}$$

Крок 6. Сформувати матрицю ємностей, де $C_{11} = -C_1 - K_1$, $C_K = C_{11} - K_{11}$, $C_C = C_2 + C_f$,

$$A = \begin{bmatrix} C_f & C_K & 0 & K_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ C_C & C_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & K_1 & C_f & C_K & 0 & K_1 & \dots \\ 0 & \dots & 0 & C_C & C_2 & 0 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & K_1 & C_f & C_{11} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & C_C & C_2 \end{bmatrix}.$$

Крок 7. Скласти рівняння напруг, що не розв'язані відносно похідних:

$$A \cdot y = b,$$

$$y = \begin{bmatrix} U_{Cf}^{(1)} \\ U_{C1}^{(1)} \\ \dots \\ U_{Cf}^{(i)} \\ U_{C1}^{(i)} \\ \dots \\ U_{Cf}^{(n)} \\ U_{C1}^{(n)} \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} i_f^{(1)} - i_s^{(1)} + i_l^{(2)} \\ i_f^{(1)} - i_e^{(1)} + i_d^{(2)} \\ \dots \\ i_f^{(i)} - i_s^{(i)} + i_l^{(i+1)} - i_l^{(i)} \\ i_f^{(i)} - i_e^{(i)} - i_d^{(i+1)} \\ \dots \\ i_f^{(n)} - i_s^{(n)} - i_l^{(n)} \\ i_f^{(n)} - i_e^{(n)} - i_{K2}^{(n)} - i_b \end{bmatrix}.$$

Унаслідок нелінійностей рівнянь газових розрядників модель генератора є нелінійною.

Програмне забезпечення для моделювання процесів у багатоступеневому генераторі. Для Алгоритмізація імітаційного моделювання електричних процесів в потужних багатоступеневих генераторах імпульсів напруги є складною задачею, тому спеціалізоване програмне забезпечення моделювання генератора розкладено на окремі взаємопов'язані блоки [6]. Кожен блок виконує відповідний етап обробки даних, створює умови для подальшого виконання загального алгоритму програми. Робота програми розпочинається з блоку введення і початкової обробки інформації. Підпрограма читання та запису виконує зчитування та контрольний запис значень параметрів генератора і масштабних коефіцієнтів, масштабує параметри для зниження жорсткості СДР, задає початкові умови [6].

Чотири блоки виконують основні розрахунки: формування вектору змінних, формування СДР, формування матриці ємностей, розв'язання СДР. Блок формування вектору змінних формує набір змінних для розрахунків і графічного відображення. Блок формування СДР виконує формування рівнянь розрядника, рівнянь струмів та рівнянь напруг. Вхідними параметрами блоку розв'язання СДР, у

якому реалізовано системний метод першого ступеня, є файл запису результату, а також посилання на процедури формування СДР і вектору змінних.

Графічне відображення процесу розряду в ГН реалізовано в головному тілі програми, а також в графічному модулі. При цьому формується матриця, де в першому рядку записані моменти часу, а в стовпцях – відповідні значення графічних змінних.

Інтерфейс користувача для дослідження багатоступеневого ГН створений для зручної, швидкої й точної роботи дослідника на основі базового користувацького інтерфейсу моделі [6]. При завантаженні програми з'являється розгорнуте на весь екран вікно (рис. 4), яке включає пункти меню «Дані», «Розрахувати», «Вихід». У вікні представлена частина схеми генератора імпульсів напруги, що включає один каскад з позначенням електричних параметрів, та панель вибору типу моделі генератора. Користувач може задати самостійно кількість каскадів для моделювання чи вибрати одну з простих моделей. Після зазначення кількості каскадів моделі відображається спосіб введення інформації в програму. При введенні всієї інформації та натисканні на кнопку «Розрахувати» перед початком розрахунків перевіряється правильність всіх введених даних: відсутність зайвих символів, друкарські помилки та відповідність значень допустимим інтервалам. Коли всі умови введення даних вірні, починаються розрахунки з імітаційного моделювання процесу розряду конденсаторів і виводиться масив точок, що описують значення змінних СДР. Цей масив зберігає значення перехідних процесів в певний період часу, тому користувацький інтерфейс включає форму з графіками перехідного процесу та списком редагування графіків, а також з текстовим полем координат. Дана форма представлена на рис. 4 з перехідним процесом, що відбувається в генераторі з трьома каскадами, а також назви змінних з легенди. Програмне забезпечення дозволяє переглянути всі точки будь-якого графіка в числовому форматі.

Процес розряду в генераторі з $n = 10$ каскадами з параметрами, які представлені в таблиці, показаний на рис. 6.

Таблиця 1 – Параметри ГН

Параметр	Значення	Параметр	Значення
C_s , нФ	120	R_s , Ом	0,05
C_f , пФ	12	R_d , Ом	0,001
C_1 , пФ	9	R_e , Ом	75
C_2 , пФ	7,7	R_l , Ом	600
K_1 , пФ	58	R_b , Ом	390
K_2 , пФ	3,8	u_s , кВ	100
L_s , нГ	10,2	k_T , В с/м	0,005
L_d , нГ	5	d , мм	8
L_e , нГ	6,5	$imax$, кВ	1200
L_l , нГ	100	$imax$, кА	4,6
L_b , нГ	600	τ , нс	10

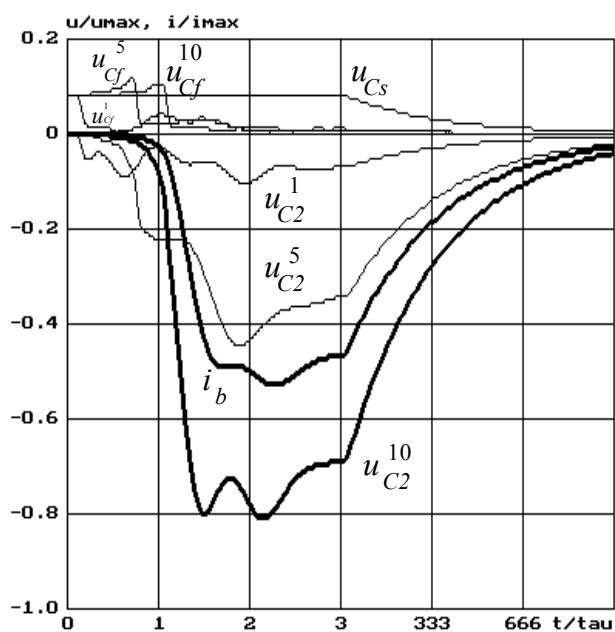


Рис. 6 – Процес розряду в десятикаскадному генераторі

Висновки. З використанням законів Кірхгофа на основі одноступінчатої моделі генератора імпульсів напруги та нелінійної математичної моделі газового розрядника розроблена математична модель багатоступеневого генератора імпульсів напруги в режимі розряду у вигляді алгоритму для формування жорсткої системи диференціальних рівнянь. Для розв'язання створеної системи диференціальних рівнянь використано системний метод першого ступеня. Представлене програмне забезпечення, яке дозволяє проводити імітаційне моделювання багатокаскадного генератора імпульсів напруги. Конструктивно розроблені складові частини програми – підпрограми початкової обробки інформації, операцій матричної алгебри, методів розрахунку матричної експоненти та її інтегралу, системного методу першого ступеня та інші. Розроблений

користувацький інтерфейс, що дозволяє значно спростити роботу дослідника в проведенні моделювання роботи генераторів. Аналіз перехідних процесів в багатоступеному генераторі показує його здатність формувати імпульси високої напруги з короткою тривалістю фронту.

Список літератури: 1. Смирнов С. М. Генераторы импульсов высокого напряжения / С. М. Смирнов, П. В. Терентьев. – М. : Энергия, 1964. – 239 с. 2. Альбертинский Б. И. Каскадные генераторы / Б. И. Альбертинский, М. П. Свиньин. – М. : Атомиздат, 1980. – 195 с. 3. Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм / Г. Е. Зильберман. – М. : Интеллект, 2008. – 376 с. 4. Губарев Г. Г. Оптимизация импульсных источников питания / Г. Г. Губарев, В. П. Северин // Электричество. – 1983. – № 1. – С. 64–65. 5. Gubarev G. G. Simulating of high voltage cascade pulse generators / V. P. Severin, D. E. Grozenok // Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. August 28 – September 1, 1995, Graz Convention Center, Austria, Europe. Vol. 4. P. 4556-1-4556-4. 6. Северин В. П. Математичне та програмне забезпечення для моделювання одноступеневого генератора імпульсів напруги / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, М. І. Ахтирцев // Вісник НТУ «ХПИ». – 2013. – № 33(1066). – С. 19-24. 7. Ракитский Ю. В. Численные методы решения жестких систем / Ю. В. Ракитский, С. М. Устинов, И. Г. Черноуцкий. – М. : Наука, 1979. – 421 с. 8. Домнин И. Ф. Численные методы анализа и синтеза в радиоэлектронике / И. Ф. Домнин, В. П. Северин, Е. Н. Никулина. – Х. : НТУ «ХПИ», 2014. – 164 с.

Bibliography (transliterated): 1. Smirnov, S. M., and P. V. Terent'ev. *Generatory impul'sov vysokogo naprjazhenija*. Moscow: Energija, 1964. Print. 2. Al'bertinskij, B. I., and M. P. Svin'in. *Kaskadnye generatory*. Moscow : Atomizdat, 1980. Print. 3. Zil'berman, G. E. *Elektrichestvo i magnetizm*. Moscow : Intellekt, 2008. Print. 4. Gubarev, G. G., and V. P. Severin. "Optimizacija impul'snyh istochnikov pitaniya." *Elektrichestvo*. No. 1. 1983. 64–65. Print. 5. Gubarev, G. G., V. P. Severin, and D. E. Grozenok "Simulating of high voltage cascade pulse generators." *Ninth International Symposium on High Voltage Engineering. Graz Convention Center, Austria, Europe* Vol. 4. 1995, 4556-1-4556-4. Print. 6. Severin, V. P., O. M. Nikulina, and M. I. Ahtyrtsev. "Matematychno ta programne zabezpechenn'a dl'a model'uvann'a odnostupenevogo generator impul'siv naprugy." *Visnyk NTU "KhPI"*. No. 33(1066). 2013. 19–24. Print. 7. Rakitskij, J. V., S. M. Ustinov and I. G. Chernorytskij. *Chislennye metody reshenija zhestkih sistem*. Moscow: Nauka, 1979. Print. 8. Domnin, I. Ph., V. P. Severin and E. N. Nikulina. *Chislennye metody analiza i sinteza v radioelektronike*. Kharkiv: NTU "KhPI". Print.

Надійшла (received) 05.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Северин Валерій Петрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу і управління; тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

Северин Валерій Петрович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и управления г. Харьков; тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

Severin Valeriy Petrovych – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of System analysis and control; tel.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

Нікуліна Олена Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніки; тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78_02@inbox.ru.

Никulina Елена Николаевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры радиоэлектроники тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78_02@inbox.ru.

Nikulina Olena Mykolaivna – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Radioelektronika; tel.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78_02@inbox.ru.

Ахтирцев Микола Іванович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістр; тел.: (066) 130-42-77; e-mail: ahtyrtsev@gmail.com.

Ахтирцев Николай Иванович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», магистр; тел.: (066) 130-42-77; e-mail: ahtyrtsev@gmail.com.

Ahtyrtsev Mykola Ivanovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", master; tel.: (066) 130-42-77; e-mail: ahtyrtsev@gmail.com.

УДК 550.388

С. В. КАЦКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ БУРЬ НА ИОНОСФЕРНЫЕ КАНАЛЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЯ НА ХАРЬКОВСКОМ РАДАРЕ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Оценено влияние ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн. Подтверждено, что вариации параметров ионосферы во время ионосферных бурь вызывают существенную перестройку каналов распространения радиоволн, а основные характеристики радиоволн (фаза, амплитуда и др.) при этом значительно изменяются. Проведен расчет изменения частоты соударений электронов с ионами, показателя поглощения радиоволн и частотной емкости ионосферного канала для отрицательных и положительных ионосферных возмущений во время магнитных бурь 1998–2012 гг.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферная буря, канал распространения радиоволн, коэффициент поглощения, частота соударения, частотная емкость.

Введение. Возмущения околоземной среды могут существенно сказываться на параметрах ионосферного канала распространения радиоволн. До настоящего времени величина этих возмущений и степень их влияния на распространение радиоволн различных диапазонов остаются мало изученными. Известно [1], что в процессе бури больше всего изменяется энергетика ионосферы и электрического поля.

Исследование среднеширотной ионосферы в периоды ионосферных бурь в течение 1998–2012 гг. [2–4] показало, что параметры плазмы при этом значительно возмущаются: концентрация электронов N_e и полное электронное содержание в течение отрицательных ионосферных бурь уменьшается до 10 и 2 раз соответственно; высота z_m слоя F2 ионосферы увеличивается на 150–300 км, температура электронов и ионов в ночное время увеличивается до 2–3 раз, относительная концентрация ионов водорода уменьшается до 3–4 раз [5]. В течение положительных ионосферных бурь в области F наблюдается увеличение концентрации электронов на 20–30 %, увеличение высоты максимума z_m достигает 50–70 км [2].

Уменьшение концентрации N_e во время отрицательных ионосферных бурь в 10 раз приводит к уменьшению максимально применимых частот примерно в 3 раза. Частотная емкость канала распространения F , равная по определению f_{\max}/f_{\min} , за счет уменьшения максимально применимых частот уменьшается также примерно в 3 раза [4, 6, 7]. Рост поглощения радиоволн в нижней ионосфере приводит к увеличению f_{\min} в 1.5–2 раза, в результате чего частотная емкость канала распространения радиоволн дополнительно уменьшается в 1.5–2 раза [4, 6, 7]. Общее уменьшение F достигает 4.5–6 раз. Возможности радиосвязи и радиолокации в диапазоне высоких частот существенно снижаются, многие радиолинии на трассах Земля – ионосфера – Земля фактически перестают функционировать.

Из-за значительного роста относительной интенсивности неоднородной структуры и усиления мерцаний уровня радиосигналов ОВЧ и УВЧ диапазонов ухудшается и даже нарушается

радиосвязь и функционирование радионавигационных систем на трассах Земля – космос и космос – Земля. Относительная плотность сбоев фазовых измерений систем GPS и ГЛОНАСС увеличивается в 10–100 раз. Резко возрастают (до 100–300 м) ошибки позиционирования. Продолжительность сбоев достигает 20–40 мин [5].

Результаты экспериментальных исследований [2] показали, что во время положительных ионосферных бурь электронная концентрация на высотах F-области ионосферы увеличивается до 2–3 раз. Отрицательная ионосферная буря сопровождается уменьшением концентрации электронов на тех же высотах на порядок. Также значительно (примерно до 1.5–2 раз) увеличивается температура ионов и электронов.

Установлено, что в течение сильных ионосферных бурь среднеширотная ионосфера может приобретать свойства высокоширотной ионосферы. Например, усиливается неоднородная структура ионосферной плазмы, что приводит к усилению рассеяния радиоволн, уменьшению их интенсивности и отношения сигнал/шум.

Указанные изменения существенно влияют на работу навигационных, радиолокационных и телекоммуникационных систем.

Рассмотрим влияние положительных и отрицательных ионосферных бурь 1998–2012 гг. на характеристики канала рассеяния.

Влияние ионосферных бурь на поглощение радиоволн различных диапазонов. Как известно, вдали от области отражения радиоволн показатель поглощения радиоволн к при их квазипродольном по отношению к геомагнитному полю распространении дается соотношением [8]:

$$\kappa = \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega(\omega \pm \omega_L)^2 + \nu^2}, \quad (1)$$

где $\omega_p = 2\pi f_p$, f_p – плазменная частота электронов, ν – частота соударений электронов с тяжелыми частицами,

© С. В. Кацко, Л. Ф. Черногор, 2015

$\omega = 2\pi f$, f – частота радиоволны, $\omega_L = 2\pi f_L$, f_L – продольная составляющая гирочастоты электронов, знаки «±» относятся к обыкновенной и необыкновенной волнам.

Изменение амплитуды радиоволн определяется интегральным коэффициентом поглощения

$$K = \frac{\omega}{c} \int_s \kappa(s) ds, \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме, s – траектория радиоволн. Тогда амплитуда радиоволн дается следующим соотношением:

$$A = A_0 e^{-K}, \quad (3)$$

где A_0 – амплитуда радиоволн в отсутствие поглощения.

Поглощение радиоволн – эффект интегральный. Известно, что примерно половину вклада в интегральный коэффициент поглощения дает нижняя ионосфера (D- и E-области), а вторую половину дает F-область ионосферы [8, 9].

В F-области ионосферы (при $z \geq 250$ км) значение ν в основном определяется частотой соударений электронов с ионами ν_{ei} [9]. Используя зависимость частоты ν_{ei} от концентрации N_e и температуры электронов T_e , можно записать, что

$$\nu_{ei} \approx \nu_{ei0} \frac{N_e}{N_{e0}} \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2}, \quad (4)$$

где индекс «0» здесь и далее относится к невозмущенным условиям.

В F-области ионосферы частота радиоволны ω значительно больше частоты ν и продольной составляющей ω_L . Тогда из (1) следует, что

$$\kappa \approx \frac{\omega_p^2 \nu}{2\omega^3}. \quad (5)$$

Поскольку

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 m}, \quad (6)$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, ϵ_0 – электрическая постоянная,

$$\kappa = \kappa_0 \frac{N_e}{N_{e0}} \frac{\nu_{ei}}{\nu_{ei0}} = \kappa_0 \left(\frac{N_e}{N_{e0}} \right)^2 \left(\frac{T_{e0}}{T_e} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены результаты расчета отношений ν_{ei}/ν_{ei0} и κ/κ_0 на высотах F-области ионосферы в зависимости от значений N_e/N_{e0} и T_e/T_{e0} во время ионосферных бурь в период 1998–2012 гг.

Таблица 1 – Результаты расчета отношений ν_{ei}/ν_{ei0} и κ/κ_0 во время ионосферных бурь 1998–2012 гг.

Ионосферная буря	Фаза бури	T_e/T_{e0}	N_e/N_{e0}	ν_{ei}/ν_{ei0}	κ/κ_0
25 сентября 1998 г.	Отрицательная	1.2	0.29	0.22	0.06
20–21 марта 2003 г.	Положительная	0.8	1.43	2.00	2.86
	Отрицательная	1.4	0.2	0.12	0.02
29–30 мая 2003 г.	Отрицательная	4	0.25	0.03	0.01
7–10 ноября 2004 г.	Отрицательная	2.6	0.14	0.14	0.005
4–6 апреля 2006 г.	Положительная	1.1	1.67	1.45	2.42
	Отрицательная	1.2	0.71	0.54	0.38
	Положительная	0.83	1.67	2.00	3.35
20–21 января 2010 г.	Отрицательная	1.2	0.77	0.56	0.45
5–6 августа 2011 г.	Отрицательная	2.6	0.29	0.07	0.02
13–14 ноября 2012 г.	Положительная	1.3	3.13	2.11	6.6
	Отрицательная	1.2	0.19	0.14	0.03
	Положительная	1.2	2.86	2.17	6.22

Из табл. 1 видно, что значение ν_{ei} во время положительной фазы существенно больше. Во время отрицательной фазы при $T_e/T_{e0} = \text{const}$ с ростом N_e/N_{e0} отношение ν_{ei}/ν_{ei0} увеличивается. Видно, что по мере уменьшения N_e/N_{e0} и роста T_e/T_{e0} отношение ν_{ei}/ν_{ei0} убывает. Минимальное изменение частоты наблюдалось во время магнитной бури 29 – 30 мая 2003 г.

Во время положительных ионосферных бурь, как следует из (4), с ростом отношения T_e/T_{e0} и N_e/N_{e0} , а также $N_e/N_{e0} = \text{const}$ и уменьшении T_e/T_{e0}

относительная частота соударений ν_{ei}/ν_{ei0} увеличивается.

Что касается показателя поглощения, то в соответствии с (7) во время положительных ионосферных бурь он также существенно больше, чем во время отрицательных, при этом увеличивается с уменьшением T_e/T_{e0} и $N_e/N_{e0} = \text{const}$. Во время отрицательных ионосферных бурь с ростом T_e/T_{e0} и уменьшением N_e/N_{e0} отношение κ/κ_0 увеличивается. Максимальное увеличение κ/κ_0 наблюдалось во время ионосферной бури 13–14 ноября 2012 г.

Если считать, что отношения T_e/T_{e0} и N_e/N_{e0} в

пределах F области слабо зависят от высоты, тогда

$$\frac{K}{K_0} \approx \frac{\kappa}{\kappa_0}. \quad (8)$$

Это означает, что во время отрицательных ионосферных бурь уменьшение относительного показателя поглощения в пределах 0.005–0.45 (см. таблицу 1) приводит к уменьшению интегрального коэффициента поглощения K в 200–2.2 раза соответственно. Увеличение κ/κ_0 во время положительных ионосферных бурь в 2.4–6.6 раз приводит к такому же (см. табл. 1) увеличению K .

Изменение частотной емкости ионосферного канала связи ВЧ диапазона. Частотной емкостью ионосферного канала связи называется безразмерный параметр [4]

$$F = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}, \quad (9)$$

где f_{\max} и f_{\min} – максимальное и минимальное значения рабочей частоты радиосигнала, определяющие дальнюю радиосвязь на трассах Земля – ионосфера – Земля в ВЧ диапазоне радиоволн.

Значение f_{\max} , называемое максимально применимой частотой, при наклонном падении на сферическую ионосферу дается известным приближенным соотношением (см., например, [8])

$$f_{\max} \approx \sqrt{\frac{R_e}{2h_r}} \cdot f_{cr}, \quad (10)$$

где R_e – радиус Земли, h_r – высота отражения радиоволны. При $R_e \approx 6370$ км, $h_r \approx 300$ –400 км множитель $\sqrt{R_e/2h_r} \approx 3.3$ –2.8 для дневного и ночного времени соответственно. Далее примем, что в среднем этот множитель равен 3. Тогда

$$f_{\max} \approx 3f_{cr}, \quad (11)$$

где f_{cr} – критическая частота области F ионосферы. Обычно в средних широтах значение $f_{cr} \approx 3$ и 10 МГц для ночного и дневного времени соответственно.

Величина f_{\min} определяется значением интегрального коэффициента поглощения K вдоль радиотрассы, относительно слабо зависит от солнечной активности [7, 9] и в невозмущенных условиях $f_{\min 0}$ в среднем составляет 1 и 3 МГц для ночного и дневного времени соответственно.

В условиях высокой активности Солнца $f_{\max} \approx 15$ –30 МГц максимальное значение $F_0 \approx 15$ и 10 в ночное и дневное время соответственно. При низкой активности $f_{\max} \approx 10$ и 20 МГц и $f_{\min 0} \approx 1$ и 2 МГц в ночное и дневное время соответственно, а $F_0 \approx 10$.

В возмущенных условиях

$$F = F_0 \frac{f_{\max}}{f_{\max 0}} \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}}. \quad (12)$$

Учтем, что f_{\min} определяется в основном поглощением радиоволн в нижней ионосфере и увеличивается в результате роста концентрации N_e на высотах D- и E-областей ионосферы, например, под действием потоков высокоэнергичных высыпающихся частиц или рентгеновского излучения. При увеличении N_e в D-области ионосферы на 1–2 порядка, как показывают наши оценки, f_{\min} может увеличиваться до 3–10 МГц.

Значение $f_{\max}/f_{\max 0} = f_0 F^2 / (f_0 F^2)_0 = (N_e/N_{e0})^{1/2}$ определяется возмущением N_e в F-области ионосферы. При слабом возмущении N_e в F-области ионосферы

$$F \approx F_0 \frac{f_{\min 0}}{f_{\min}} \approx 0.3F_0 \approx 3, \quad (13)$$

т. е. уменьшается примерно в 3 раза.

При сильном возмущении N_e в области ионосферы параметр F изменяется также значительно (см. табл. 2). При расчетах учтено, что

$$\frac{F_0}{F} = \left(\frac{N_{e0}}{N_e} \right)^{1/2} \frac{f_{\min}}{f_{\min 0}}. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены значения F_0/F при различных уровнях возмущенности ионосферы. Большие значения отношения F_0/F (от 3.4 до 8) во время отрицательных ионосферных бурь свидетельствуют о том, что частотная емкость канала значительно уменьшилась. Во время положительных ионосферных бурь изменения значения отношения $F_0/F = 1.7$ –2.5, были приемлемыми для распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля. Значения $F_0/F \geq 10$, когда связь во всем декаметровом диапазоне радиоволн на этих трассах становилась невозможной, не наблюдались.

Во время положительных ионосферных бурь для увеличения отношения сигнал/шум и более эффективного использования частотной емкости ионосферного канала связи рекомендуется увеличение рабочих частот на трассах Земля – ионосфера – Земля до $0.9f_{\max} \approx 2.7f_0 F^2$.

Выводы. 1. Продемонстрировано, что как сильные, так и умеренные ионосферные бури могут приводить к значительному возмущению параметров околоземной среды в целом и среднеширотной ионосферы в частности. Вариации параметров ионосферы во время ионосферных бурь вызывают существенную перестройку каналов распространения радиоволн. При этом значительно изменяются основные характеристики радиоволн: фаза, амплитуда и др.

2. Установлено, что в средних широтах во время отрицательных ионосферных бурь частотная ёмкость канала распространения радиоволн на трассах Земля – ионосфера – Земля уменьшалась в 3.4–8 раз. При этом нарушалось функционирование многих радиолиний ВЧ диапазона.

Таблица 2 – Значение частотной емкости F при различных уровнях возмущенности во время ионосферных бурь 1998–2012 гг. для $f_{\min}/f_{\min 0} \approx 3$

Ионосферная буря	Фаза бури	N_e/N_{e0}	F_0/F
25 сентября 1998 г.	Отрицательная	0.29	5.6
20–21 марта 2003 г.	Положительная	1.43	2.5
	Отрицательная	0.2	6.7
29–30 мая 2003 г.	Отрицательная	0.25	6
7–10 ноября 2004 г.	Отрицательная	0.14	8
4–6 апреля 2006 г.	Положительная	1.67	2.4
	Отрицательная	0.71	3.6
	Положительная	1.67	2.4
20–21 января 2010 г.	Отрицательная	0.77	3.4
5–6 августа 2011 г.	Отрицательная	0.29	5.6
13–14 ноября 2012 г.	Положительная	3.13	1.7
	Отрицательная	0.19	6.9
	Положительная	2.86	1.8

Для устойчивой дальней радиосвязи в декаметровом диапазоне радиоволн во время отрицательных ионосферных бурь рекомендуется уменьшать частоту радиосредств различного назначения в 2–3 раза, так как в противном случае связь на трассах Земля – ионосфера – Земля нарушится.

Во время положительных ионосферных бурь, напротив, рекомендуется увеличивать рабочую частоту на трассах Земля – ионосфера – Земля до $2.7f_oF_2$.

3. Показано, что во время положительных ионосферных бурь интегральный коэффициент поглощения радиоволн с длиной радиоволны, равной 0.1–100 м, увеличивался на десятки процентов, а во время отрицательных ионосферных бурь уменьшался в 2–200 раз. Важно, что при этом частотная емкость ионосферных каналов заметно сужалась (во время положительных бурь в 1.7–2.5 раза, а во время отрицательных бурь – в 3–8 раз).

4. Показано, что в результате значительного роста электронной концентрации в нижней ионосфере интегральный коэффициент поглощения увеличивался в 3–6.6 раз, приводя к существенному снижению отношения сигнал/шум на радиолиниях ОНЧ, НЧ, СЧ и ВЧ диапазонов.

Список литературы: 1. Chernogor L.F. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System / L.F. Chernogor, V.T. Rozumenko // Radio Physics and Radio Astronomy. – 2008. – V. 13, N. 2. – P. 120–137. 2. Черногор Л.Ф. Физика геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, И.Ф. Домнин – Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2014. – 407 с. 3. Домнин И.Ф. Ионосферные эффекты геокосмической бури 13–14 ноября 2012 г. / И.Ф. Домнин, Л.Я. Емельянов, С.В. Кацко, Л.Ф. Черногор // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 170–180. 4. Черногор Л.Ф. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, С.В. Кацко // Вестник Поволжского государственного технологического университета «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2013. – Т. 3, № 19. – С. 5–17. 5. Chen Z. Evaluation of

Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network / Z. Chen, Y. Gao, Z.Z. Liu // Radio Science. – 2005. – V. 40. – RS3012, doi:10.1029/2004RS003066. 6. Черногор Л.Ф. Влияние геокосмических бурь на ионосферные каналы радиолокации, навигации и связи / Л.Ф. Черногор, В.А. Иванов, С.В. Кацко // Радиолокация, навигация, связь: XX международная научно-техническая конференция RLNC-2014, 15–17 апреля 2014 г.: сб. докл. – Воронеж, Россия, 2014. – С. 30–42. 7. Черногор Л.Ф. Искажения параметров ионосферного радиоканала в период геокосмических бурь / Л.Ф. Черногор, В.А. Иванов, С.В. Кацко // IV Всероссийские Арmandовские чтения: VI Всероссийская научная конференция, 27–29 мая 2014 г.: сб. докл. – Муром, Россия, 2014. – С. 64–69. 8. Davies K. Ionospheric Radio / K. Davies. – Peter Peregrinus, London, 1990. – 587 p. 9. Ляшенко М.В. Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности / М.В. Ляшенко, В.А. Пуляев, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2006. – Т. 12, № 5/6. – С. 58–68.

Bibliography (transliterated): 1. Chernogor L. F., Rozumenko V. T. Earth – Atmosphere – Geospace as an Open Nonlinear Dynamical System. *Radio Physics and Radio Astronomy*. 2008. V. 13, N. 2. P. 120–137. 2. Chernogor L. F., Domnin I. F. Fizika geokosmicheskikh bur'. H.: HNU imeni V. N. Karazina, 2014. 407. Print. 3. Domnin I. F., Emel'janov L. Ia., Kacko S. V., Chernogor L. F. Ionosfernye jefekty geokosmicheskoi buri 13–14 nojabrja 2012 g. *Radiophysika i radioastronomija*. No. 19.2. 2014. 170–180. Print. 4. Chernogor L. F., Kacko S. V. Возмущение параметров ионосферного канала распространения радиоволн в течение геокосмических бурь. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta "Radiofizicheskie i infokommunikacionnye sistemy."* No. 3.19. 2013. 5–17. Print. 5. Chen Z., Y. Gao, Z. Z. Liu. Evaluation of Solar Radio Burst's Effect on GPS Receiver Signal Tracking within IGS Network. *Radio Science*. No. 40. 2005. RS3012, doi:10.1029/2004RS003066. 6. Chernogor L. F., Ivanov V. A., Kacko S. V. Vlijanie geokosmicheskikh bur' na ionosfernye kanaly radiolokacii, navigacii i svjazi. Radiolokacija, navigacija, svjaz': XX mezhduнародnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija RLNC-2014, 15–17 aprelja 2014 g.: sb. dokl. Voronezh, Rossija, 2014. 30–42. Print. 7. Chernogor L. F., Ivanov V. A., Kacko S. V. Iskazhenija parametrov ionosfernogo radiokanala v period geokosmicheskikh bur'. IV Vserossijskie Armandovskie chtenija: VI Vserossijskaja nauchnaja konferencija, 27–29 maja 2014 g.: sb. dokl. Murom, Rossija, 2014. 64–69. Print. 8. Davies K. Ionospheric Radio. Peter Peregrinus, London, 1990. 587. Print. 9. Ljashenko M. V., Pyljaev V. A., Chernogor L. F. Sutochnyje i sezonnye variacii parametrov ionosfernoj plazmy v period rosta solnečnoj aktivnosti. *Kosmichna nauka i tehnologija*. No. 12.5/6. 2006. 58–68. Print.

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

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

Черногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, професор кафедри космічна радіофізика, м. Харків; 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 621.39, 004.457

С. С. КОЗЛОВ, А. А. ЛУКАШЕНКО

СЕТЕВОЕ ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ

Рассмотрена возможность построения локальной сети на территории комплекса некогерентного рассеяния. Представлен анализ объемов, время образования и внутренних структур файлов, содержащих исходные данные ионосферных измерений. Сформулированы основные требования к клиент-серверному приложению для передачи данных на сервер. Рассмотрена реализация сетевого приложения для автоматической передачи результатов измерений. Реализована сетевая библиотека динамической компоновки DLL.

Ключевые слова: сетевое приложение, клиент, сервер, электронная библиотека, передача данных, алгоритм.

Введение. Необходимость автоматизации процесса зондирования и обработки в методе некогерентного рассеяния требует внедрения пакетов прикладных программ, ориентированных не только на решение специализированных задач в условиях все возрастающего объема входной информации [1], но и на обеспечение взаимодействия радиотехнических систем и средств обработки данных. Данные, получаемые в обсерватории Института ионосферы в процессе функционирования радара некогерентного рассеяния и ионосферной автоматической станции, сохраняются на жестких дисках компьютеров, которые территориально разнесены. С целью контроля состояния аппаратуры, экономии энергоресурсов, уменьшения количества кадрового состава, необходимого для обслуживания комплекса во время измерений, целесообразно иметь доступ в режиме реального времени к результирующим данным [2].

Целью является разработка сетевого приложения для автоматической передачи данных на сервер, расположенный в помещении с пультом управления передатчиком антенны. Последующая предварительная обработка полученных данных позволит оператору контролировать состояние как передающей, так и приёмной аппаратуры.

Данная работа посвящена задачам создания клиент-серверного приложения для приёма и передачи данных, а также определения необходимой топологии для локальной сети комплекса некогерентного рассеяния Института ионосферы.

Анализ средств и методов решения задачи. Современные компьютерные сети объединяют компьютеры и периферийные устройства в целостную информационную систему с распределенной обработкой данных. Локальные компьютерные сети различаются по назначению и своей архитектуре. Одной из важнейших составляющих архитектуры является топология локальной сети [3]. Наиболее распространенными топологиями являются: звезда, кольцо, шина, дерево и комбинированная. Топология «звезда» наиболее удовлетворяет требованиям, поскольку к серверу происходят одновременно обращения с нескольких компьютеров-клиентов (см. рис. 1). Сеть в виде звезды содержит центральный узел коммутации, к которому посылаются все сообщения из узлов.

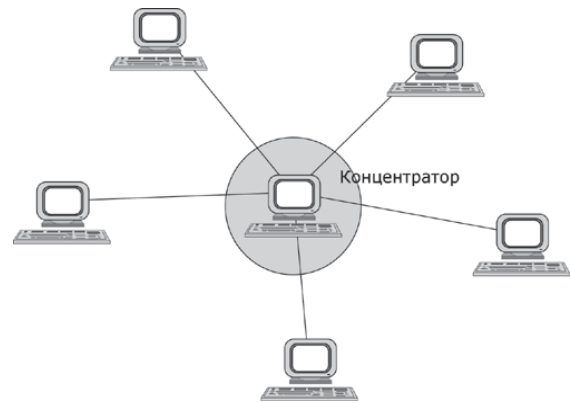


Рис. 1 – Топология «звезда»

Архитектура клиент-сервер является одним из архитектурных шаблонов программного обеспечения и является доминирующей концепцией в создании распределенных сетевых приложений и предусматривает взаимодействие и обмен данными между ними. Она предусматривает следующие основные компоненты: набор серверов, предоставляющих информацию или другие услуги программам, которые обращаются к ним; набор клиентов, которые используют сервисы, предоставляемые серверами; сеть, которая обеспечивает взаимодействие между клиентами и серверами.

Программно-аппаратные средства. Согласно проанализированной информации было принято решение разработать программу типа клиент-сервер. Для реализации проекта была выбрана топология локальной сети «звезда», как наиболее централизованная и ориентированная на программы такого типа. Для построения сетевого приложения необходимо построить клиент, который как в автоматическом, так и в ручном режиме находит и передает необходимые файлы на сервер.

Исходные данные, которые образуются на выходе системы первичной обработки, различаются по типу, объёму, структуре и времени образования. Эти данные представляют собой набор S-файлов, содержащих результат корреляционной обработки сигнала рассеяния, набор информации – в виде V- и C-файлов, формируемых в чуть отличающемся формате [4] при функционировании двух корреляционных систем предыдущего поколения. Файлы в процессе статистического усреднения информации

© С. С. Козлов, А. А. Лукашенко, 2015

формируются, как правило, в течение одной минуты, записываются в двоичном коде и имеют объемы от 0,02 Мб до 0,2 Мб. К исходным данным также относятся ионограммы, получаемые с помощью автоматической ионосферной станции. С использованием своего формата они образуются каждые 15 мин и представляют собой файлы объемами по 12 Мб [5].

Учитывая вышеприведенную информацию, очевидно, что разрабатываемое сетевое приложение должно быть гибким и легко подвергаться редактированию. Также должна быть предусмотрена возможность интерактивной смены настроек и критериев автоматического поиска новых файлов на удаленных компьютерах. Заложены алгоритмы проверки целостности и резервного копирования информации.

Среди многообразия средств разработки для автоматизированной системы передачи данных была выбрана платформа VisualStudio 2013 под управлением операционной системы Windows 8 SP1.

В качестве среды программирования для решения поставленной задачи был выбран Visual C#.

Visual C# - инструмент для создания приложений и систем, функционирующих на платформе Windows. В основе его лежит объектно-ориентированный язык высокого уровня C [6].

Преимуществами среды разработки являются:

- удобный интерфейс,
- простота разработки,
- большое количество встроенных библиотек,
- встроенные комментарии XML-документации,
- LINQ предлагает встроенные возможности запросов в разных источниках данных,
- независимость от языка программирования.

Реализация. Для поиска файлов клиентом был разработан алгоритм сортировки и поиска файлов. Для удобства программа клиента имеет меню настроек (см. рис. 2).

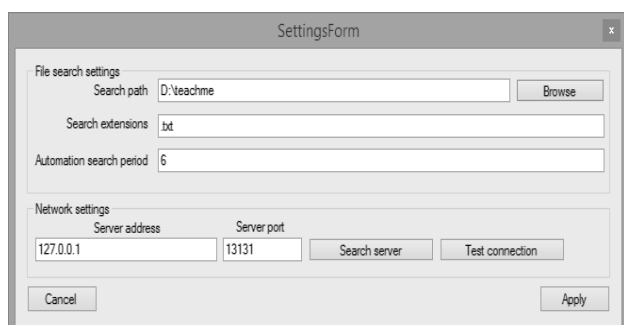


Рис. 2 – Меню настроек

Меню имеет основные поля для ввода. Оператор в диалоговом окне имеет возможность заполнить поля с выбором каталога, заполнить поле с названием расширения, и записать число автоматических повторений поиска, с помощью которого программа определяет период обновления автоматического поиска и отправки продукта.

Настройки сети состоят из адреса сервера и номера порта, с помощью которых осуществляется

подключение к серверу. Аналогичные номер порта и адрес должны быть прописаны и в сервере и остаются неизменными на нем. Форма имеет кнопки поиска сервера и тестирующего соединения, результатом работы этих кнопок является информационное диалоговое окно.

Общие настройки сохраняются в XML файле и вызываются в программу с помощью кода :

```
public void LoadSettings(string filepath)
{
    //TODO: implement loading fields from xml file by
    path in argument
    XmlDocument xmlDoc = new XmlDocument();
    xmlDoc.Load("setting.xml");
    XmlNode searchnode =
xmlDoc.DocumentElement.SelectSingleNode("/item/SearchParth");
    SearchPath = searchnode.InnerText;
    XmlNode extnode =
xmlDoc.DocumentElement.SelectSingleNode("/item/Extensions");
    SearchExtensions = extnode.InnerText;
    XmlNode periodnode =
xmlDoc.DocumentElement.SelectSingleNode("/item/Period");
    AutomationSearchPeriod =
string.IsNullOrEmpty(periodnode.InnerText) ? 60 *
5 : int.Parse(periodnode.InnerText) * 60;
    XmlNode portnode =
xmlDoc.DocumentElement.SelectSingleNode("/item/Port");
    ServerPort = portnode.InnerText;
    XmlNode addrnode =
xmlDoc.DocumentElement.SelectSingleNode("/item/Address");
    ServerAddress = addrnode.InnerText;
} }
```

Согласно с кодировкой XML [7] мы получаем нужные переменные из файла, а потом работаем с ними, сохраненная информация в файле выглядит следующим образом (см. рис. 3).

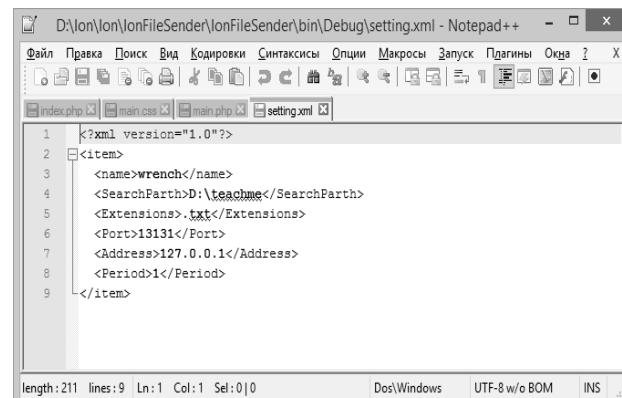


Рис. 3 – Представление в XML

После выбора необходимых настроек оператор может начать поиск файлов в определенном каталоге с

выбранным расширением. Программа предлагает пользователю все файлы, которые совпадают с критериями настроек поиска. Пример диалогового окна представлен на рис. 4. Существенным преимуществом клиента является автоматизированность. После поиска файла приложение в автоматическом режиме начинает передавать последний созданный файл, если он еще не был использован.

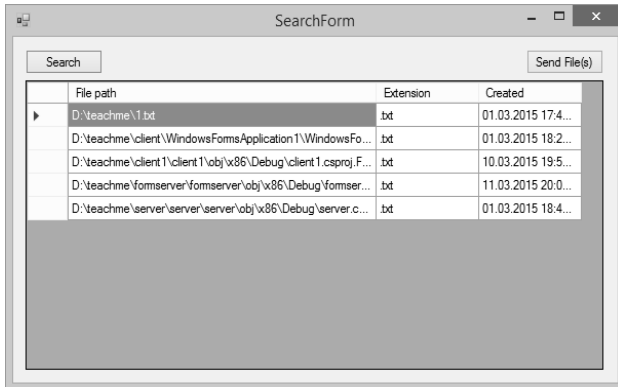


Рис. 4 – Поиск файлов

Для того, чтобы приложение повторно не передавало уже отработанные файлы на сервер и проверяло качество передачи, был разработан алгоритм для проверки контрольных сумм и записи истории передачи файлов. Он позволяет корректно работать программе [8]. Алгоритм был записан в таком же формате, как и настройки пользователя и имеет следующий вид (см. рис. 5).

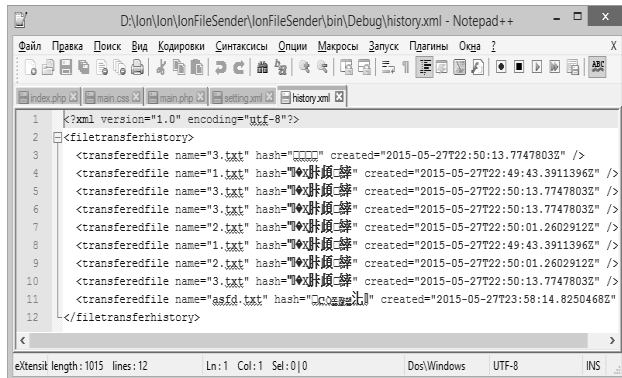


Рис. 5 – История передачи файлов

Хеширования файлов происходит по алгоритму MD5, с помощью которого сверяются контрольные суммы до, и после, передачи файлов. Если контрольные суммы не сходятся, то файл не обрабатывается. Сервер выдаёт сообщение о неудачной передаче файла и тогда клиент повторно, автоматически или в пользовательском ручном режиме, повторяет отправку.

Файлы, которые отправляет клиент, поступают на сервер и хранятся с настройками сервера. Сервер не имеет интерфейса и реализован в качестве Windows сервиса, что значительно облегчает работу программы и не требует лишних действий пользователя [9].

Код сервера выглядит следующим образом:

```

Program.cs:
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.ServiceProcess;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;

namespace IonFileServer
{
    static class Program
    {
        /// <summary>
        /// Главная точка входа для приложения.
        /// </summary>
        static void Main()
        {
            ServiceBase[] ServicesToRun;
            ServicesToRun = new ServiceBase[]
            {
                new IonFileServerSvc()
            };
            ServiceBase.Run(ServicesToRun);
        }
    }
}

```

Код не имеет основных частей и настроек, его рабочая часть закодирована в библиотеке сети, и представляет подключение сервиса и библиотеки.

Для хранения переданных файлов на сервере разработана сетевая библиотека динамической компоновки DLL, которая связывается с программой во время выполнения.

Среди преимуществ использования DLL можно выделить следующие:

1. Сетевая электронная библиотека представляет из себя упорядоченную коллекцию разнородных электронных документов, снабженных средствами навигации и поиска.

2. Каждый элемент библиотеки может в любой момент быть востребован оператором.

3. Поддержка многоязычных программ. Программы, написанные на разных языках программирования, могут вызывать ту же самую функцию библиотеки DLL.

4. Увеличение данных библиотеки построено на принципе сетевого взаимодействия.

5. Экономия места на диске. Многие приложения совместно используют одну копию библиотеки DLL на диске. В каждом приложении, построенном на основе статически компоуемой библиотеки, код библиотеки компоуется в исполняемый образ в виде отдельной копии.

Выводы. В результате проведённых исследований по выбору электронной базы данных для хранения сведений о параметрах ионосферы, рассчитываемых при работе радиолокационных систем, использующих метод некогерентного рассеяния радиоволн, получены следующие результаты:

1. Проведен аналіз об'ємів, время образования и внутренних структур файлов, содержащих исходные данные, в процессе функционирования устройств комплекса некогерентного рассеяния.

2. Рассмотрена возможность построения локальной сети на территории обсерватории Института ионосферы и выбрана её.

3. Сформулированы основные требования к клиент-серверному приложению для передачи данных на сервер.

4. Реализовано сетевое приложение на платформе VisualStudio 2013, среда программирования Visual C#.

5. Реализован автоматический поиск новых файлов по пользовательским критериям, с последующей передачей на сервер. Предусмотрена процедура проверки целостности файлов.

6. Разработана сетевая библиотека динамической компоновки DLL для хранения и предоставления доступа к исходным данным.

Список литературы: 1. Пуляев В.А. Определение параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн: монография / В.А. Пуляев, Д.А. Дзюбанов, И.Ф. Домнин – Х.: НТУ “ХПИ”. – 2011. – 240 с. 2. Пуляев В.А. Программное обеспечение автоматизированной системы радара некогерентного рассеяния / В.А. Пуляев // Вестн. НТУ “ХПИ” : сборн. науч. тр. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2003. – № 26. – С. 91–94. 3. Андреев А.Г. Microsoft Windows 2000 Professional. / А.Г. Андреев, А.Н. Чекарцева, Д.Б. Вишнякова. – СПб.: БХВ - Петербург, 2002. – 752 с. 4. Богомаз А.В. Особенности процедуры накопления ионосферных данных, полученных с помощью многоканального коррелятора / А.В. Богомаз // Програма XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». Секція 17. Навколоземний простір. Радіофізика та іоносфера. – 2011. – С. 184. 5. Козлов С.С. Выбор структуры базы данных для хранения информации Харьковского радара некогерентного рассеяния / С.С. Козлов, В.А. Пуляев // Всеукраинский межведомственный

научно-технический сборник «Радиотехника». – 2012. – № 169. – С. 110-116. 6. Ликнесс Дж. Приложения для Windows 8 на C# и XAML / Дж. Ликнесс. – СПб.: Питер, – 2013, 368 с. 7. Козлов С.С. Хранение данных радара некогерентного рассеяния в формате XML / С.С. Козлов // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. Серия: “Радиофизика и ионосфера”.–2010.–№ 48. – С. 96–101. 8. Троелсен Эн. Язык программирования C# 2010 и платформа .NET / Эн. Троелсен. – Изд-во: «Вильямс», – 2011, 1392 с. 9. Рихтер Дж. CLR via C#. Программирование на платформе Microsoft .NET Framework 2.0 на языке C# / Дж. Рихтер. – СПб.: Питер, – 2007, 656 с.

Bibliography (transliterated): 1. Puljaev V.A., Dzjubanov D.A., Domnin I.F. Opredelenie parametrov ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija radiovoln: monografija – Har'kov: NTU “HPI”. – 2011. – 240 p. 2. Puljaev V.A. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannoj sistemy radara nekogerentnogo rassejanija // Vestn. NTU “HPI” : sborn. nauch. tr. – Har'kov : NTU “HPI”, 2003. – № 26. – P. 91–94. 3. Andreev A.G. i dr. Microsoft Windows 2000 Professional. / A.G. Andreev A.N. Chekmareva, D.B. Vishnjakova. – Spb.: BHV - Peterburg, 2002. – 752 p. 4. Bogomaz A.V. Osobennosti procedury nakoplenija ionosfernyh dannyh, poluchennyh s pomoshh'ju mnogokanal'nogo korrelyatora. – Programa XIX Mizhnarodnoj naukovopraktichnoj konferencii «Informacijni tehnologii: nauka, tehnika, tehnologija, osvita, zdorov'ja». Sekcija 17. Navkolozemnij prostir. Radiofizika ta ionosfera. – 2011. – P. 184. 5. Kozlov S.S., Puljaev V.A. Vybory struktury bazy dannyh dlja hranenija informacii Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejanija // Vseukrainskij mezhdvedomstvennij nauchno-tehnicheskij sbornik «Radiotehnika» № 169, 2012, P. 110-116. 6. Likness Dzh. Prilozhenija dlja Windows 8 na C# i XAML, Izd-vo: «Piter», - 2013. – P. 368. 7. Kozlov S.S. Hranenie dannyh radara nekogerentnogo rassejanija v формате XML // Vestnik Nacional'nogo tehnicheskogo universiteta “Har'kovskij politehnicheskij institut”. Serija: “Radiofizika i ionosfera”.–2010.–№ 48.–P. 96 – 101. 8. Troelsen Jen. Jazyk programmirovanija C# 2010 i platforma .NET, Izd-vo: «Vil'jams», 2011. – 1392 p. 9. Rihter Dzh. CLR via C#. Programirovanie na platforme Microsoft .NET Framework 2.0 na jazyke C# Izd-vo: «Piter», 2007. – 656 p.

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Козлов Сергій Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Радіоелектроніка»; тел.: (097) 715-84-61; e-mail: kss300@mail.ru.

Козлов Сергей Сергеевич – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», старший преподаватель кафедры «Радиоэлектроника»; тел.: (097) 715-84-61; e-mail: kss300@mail.ru.

Kozlov Sergii Sergeevich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior lecturer at the Department of "Radioelectronics"; tel.: (097) 715-84-61; e-mail: kss300@mail.ru.

Лукашенко Андрій Олександрович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (099) 114-49-32; e-mail: A_r_k_a_n@bk.ru.

Лукашенко Андрей Александрович – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; тел.: (099) 114-49-32; e-mail: A_r_k_a_n@bk.ru.

Lukashenko Andrey Aleksandrovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student; tel.: (099) 114-49-32; e-mail: A_r_k_a_n@bk.ru.

УДК 53.088.6:53.088.228:550.388

Т. А. СКВОРЦОВ, Л. Я. ЕМЕЛЬЯНОВ, А. В. ФИСУН

СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ МЕТОДОМ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ И СПОСОБ ИХ КОМПЕНСАЦИИ

Рассматривается способ измерения концентрации электронов в ионосфере радаром некогерентного рассеяния с использованием эффекта Фарадея. Исследуются систематические ошибки измерения, которые возникают из-за неточной поляризационной настройки приемной антенны. Получена формула для оценки указанных ошибок и предложен способ, который позволяет их скомпенсировать даже при неточной поляризационной настройке. Способ позволяет также контролировать точность поляризационной настройки приемной антенны.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, концентрация электронов, эффект Фарадея, поляризационный эллипс, ошибки измерения, способ компенсации ошибок.

Введение. В радаров некогерентного рассеяния (НР) для измерения концентрации электронов (КЭ) в ионосфере в основном применяется «метод профиля мощности» [1]. При этом используется тот факт, что мощность НР сигнала прямо пропорциональна КЭ.

Однако указанная мощность зависит также от отношения температур электронов и ионов, которые изменяются с высотой. Для измерения температур требуется использование зондирующих импульсов большой длительности (600–1000 мс), так что метод не обеспечивает высокую разрешающую способность.

Альтернативным методом измерения КЭ является «метод фарадеевского вращения», в основу которого положено наблюдение эффекта Фарадея.

Однако «простота и изящество этого метода до известной степени омрачаются рядом практических трудностей» [1]. При этом речь идет о статистических и систематических ошибках измерения.

Как показали экспериментальные и теоретические исследования, статистические ошибки, порождаемые шумами и шумовым характером полезного сигнала, оказываются достаточно малыми (единицы процентов) в пределах высот плотной ионосферы (области F) [2].

Основной причиной систематических ошибок является погрешность поляризационной настройки приемной антенны.

До настоящего времени единственным способом уменьшения указанных систематических ошибок представлялось повышение точности поляризационной настройки.

Поскольку фазовые характеристики антенны и электрические длины трактов СВЧ не контролируются, а возможности расположения в дальней зоне излучателей для контроля настройки антенны отсутствуют, единственная возможность поляризационной настройки это настройка по НР сигналу. Погрешности такой настройки весьма заметны, несмотря на всю ее сложность и трудоемкость.

Наконец, отметим отсутствие в известной литературе формул для оценки влияния погрешностей поляризационной настройки приемной антенны на ошибки измерения высотного профиля КЭ методом фарадеевского вращения.

Целью данной статьи является:

1. Разработка способа измерения, который даже при плохом качестве поляризационной настройки позволяет исключить или значительно уменьшить систематическую погрешность оценки КЭ методом фарадеевского вращения.

2. Получение формулы для оценки влияния погрешности поляризационной настройки на ошибки измерения КЭ методом фарадеевского вращения.

3. Разработка новых способов контроля качества поляризационной настройки приемной антенны.

1. Метод фарадеевского вращения. Известно, что при прохождении волн через ионосферу от радара до данной высоты h и обратно поляризационный эллипс (ПЭ) поворачивается на угол

$$\Phi(h) = kH \int_0^h N_e(l) dl, \quad (1)$$

где $k = 0,0594 \cdot f_0^{-2}$, f_0 – рабочая частота, H – вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли. $N_e(h)$ – высотный профиль КЭ.

Принцип формирования оценки КЭ основывается на формуле

$$N_e(h) = \frac{1}{kH} \frac{d\Phi(h)}{dh}, \quad (2)$$

которая следует из (1).

Для измерения угла Φ излучаются радиопульсы с круговой поляризацией и противоположным направлением вращения [1], либо один импульс с поляризацией, близкой к линейной [3].

При этом приемная антенна имеет два выхода, настроенных на круговую поляризацию с противоположными направлениями вращения. В частности, в радаре НР Института ионосферы для этого в облучателе антенны имеется два ортогональных вибратора, подключенных через фазовращатель к волноводному мосту [4].

Оценка параметра Φ формируется следующим образом. Известно, что поле с любой поляризацией можно представить в круговом поляризационном базисе. При идеальной настройке фазовращателя

сигналы на выходе вибраторов можно представить в виде

$$I_1 = \dot{U}e^{i\Psi} + \dot{V}e^{-i\Psi},$$

$$I_2 = i\dot{U}e^{i\Psi} - i\dot{V}e^{-i\Psi},$$

где $\dot{U} = Ue^{iu}$, $\dot{V} = Ve^{iv}$ – стохастические НР сигналы, наводимые в первом вибраторе компонентами поля с правым и левым направлениями вращения, соответственно,

$$\Psi(h) = \Phi(h) + \alpha,$$

где α – угол наклона поляризационного эллипса (ПЭ) зондирующего сигнала до входа в ионосферу.

Сигналы от вибраторов суммируют со сдвигом фазы $\pi/2$ в волноводном мосте так, что сигналы на выходах идеально настроенного волноводного моста

$$\dot{s}_+ = I_1 - iI_2 = 2\dot{U}e^{i\Psi},$$

$$\dot{s}_- = I_1 + iI_2 = 2\dot{V}e^{-i\Psi}.$$

Для каждой высоты вычисляют взаимную ковариацию

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \langle UV^* \rangle e^{i2\Psi}, \quad (3)$$

а затем оценку искомого угла по формуле [5]

$$\hat{\Psi}(h) = \frac{1}{2} \arctg \frac{\text{Im} \{ \langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle \}}{\text{Re} \{ \langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle \}}. \quad (4)$$

Как видно из (3), (4) в результате получаем

$$\hat{\Psi}(h) = \Phi(h) + \alpha. \quad (5)$$

Далее в соответствии с (2) определяется производная функции $\hat{\Psi}(h)$, которая, как видно из (5), в точности равна искомой производной угла $\Phi(h)$ (статистические ошибки здесь не рассматриваются).

2. Влияние погрешностей поляризационной настройки на оценку КЭ. Поскольку фазовые характеристики антенны и электрические длины трактов СВЧ не контролируются, а возможности расположения в дальней зоне излучателей для контроля настройки антенны отсутствуют, то поляризационная настройка осуществляется по НР сигналу. При этом сдвиг фазы на $\pi/2$ осуществляется с погрешностью ε и на выходах моста получаем

$$\dot{s}_+ = I_1 e^{i\frac{\varepsilon}{2}} - iI_2 e^{-i\frac{\varepsilon}{2}} = 2\dot{U}e^{i\Psi} \cos \frac{\varepsilon}{2} - i2\dot{V}e^{-i\Psi} \sin \frac{\varepsilon}{2},$$

$$\dot{s}_- = I_1 e^{i\frac{\varepsilon}{2}} + iI_2 e^{-i\frac{\varepsilon}{2}} = i2\dot{U}e^{i\Psi} \sin \frac{\varepsilon}{2} + 2\dot{V}e^{-i\Psi} \cos \frac{\varepsilon}{2}. \quad (6)$$

Вычисляя ковариацию сигналов (6), получим

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \left\{ \langle UV^* \rangle e^{i2\Psi} \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle VU^* \rangle e^{-i2\Psi} \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - i \sin \frac{\varepsilon}{2} \cos \frac{\varepsilon}{2} \left(\langle U^2 \rangle + \langle V^2 \rangle \right) \right\}. \quad (7)$$

С учетом того, что $\langle UV^* \rangle = \langle VU^* \rangle$ выражение (7) приводится к виду

$$\langle \dot{s}_+ \dot{s}_-^* \rangle = 4 \langle UV^* \rangle \cos \varepsilon \left\{ e^{i2\Psi} - idtg \varepsilon \right\}, \quad (8)$$

где

$$d = \frac{\langle U^2 \rangle + \langle V^2 \rangle}{2 \langle UV^* \rangle}.$$

Отметим, что при $\langle U^2 \rangle = \langle V^2 \rangle$ получаем

$$d = \frac{1}{\rho},$$

где ρ – коэффициент взаимной корреляции компонент НР сигнала с противоположными направлениями вращения.

В соответствии с (4) и (8) при наличии ошибок настройки получаем оценку

$$\hat{\Psi}(h) = \frac{1}{2} \arctg \left\{ tg 2\Psi(h) - tg \varepsilon \frac{d}{\cos 2\Psi(h)} \right\}. \quad (9)$$

При вычислении производной (9) в соответствии с (2) получаем

$$\frac{d\hat{\Psi}}{dh} = B(h) \frac{d\Phi}{dh}, \quad (10)$$

где

$$B(h) = \frac{1 - tg \varepsilon d \sin 2\Psi(h)}{1 - 2d \sin 2\Psi(h) tg \varepsilon + d^2 tg^2 \varepsilon}. \quad (11)$$

При этом оценка КЭ

$$\hat{N}_e(h) = B(h) N_e(h). \quad (12)$$

Практически выполняется условие $\varepsilon \ll \pi/2$ так, что из (11) получаем

$$B(h) \approx 1 + \varepsilon d \sin 2\Psi(h).$$

Для наглядного представления о характере искажений профиля КЭ было проведено вычисление оценки по формулам (1), (11), (12).

При интегрировании использовалась модель формы нормированного профиля КЭ вида

$$F(h) = \frac{N_e(h)}{N_{e\max}} = \frac{1}{1 + b^2(h - h_0)^2}$$

так, что

$$2\Phi(h) = kN_{e\max} \int_0^h F(h) dh = kHN_{eM} \left\{ \frac{1}{b} \arctg[b(h - h_0)] + \frac{1}{b} \arctg(bh_0) \right\}. \quad (13)$$

Примеры результатов расчета для $\varepsilon = 0,1$ и $d = 1$ приведены на рис. 1 и рис. 2. Пунктирной линией показан модельный высотный профиль КЭ, а сплошной линией – оценка данного профиля, вычисленная по формулам (10), (11), (13).

Рис. 1 построен для $N_{e\max} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$, а рис. 2 – для $N_{e\max} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рисунках видны характерные квазигармонические искажения, частота и амплитуда которых увеличиваются при увеличении КЭ.

3. Способ компенсации влияния погрешностей поляризационной настройки на оценку КЭ. Пусть

при некоторых условиях измерения и при некотором произвольном угле наклона ПЭ на передающей стороне α_1 получена оценка

$$\hat{N}_{e1}(h) \approx N_e(h) [1 + \varepsilon d \sin 2\Psi_1(h)] .$$

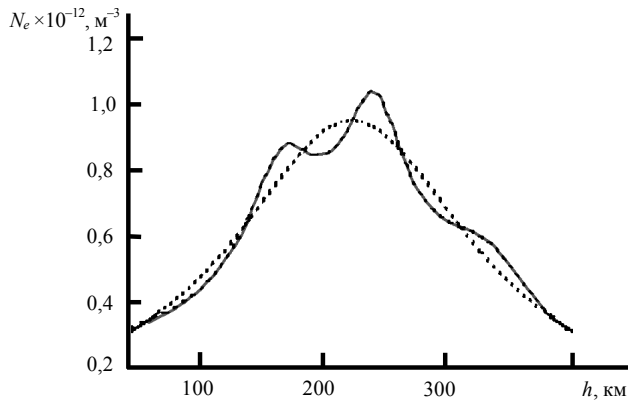


Рис. 1 – Результат расчета высотного профиля КЭ для $\varepsilon = 0,1, d = 1$ и $N_{e\max} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (сплошная линия) и исходный (модельный) профиль КЭ (пунктир)

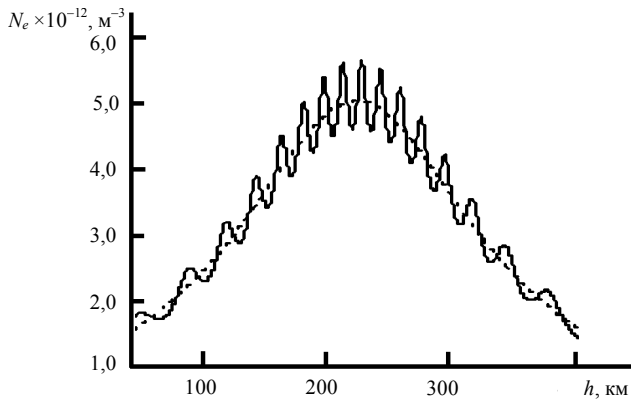


Рис. 2 – Результат расчета КЭ для $\varepsilon = 0,1, d = 1$ и $N_{e\max} = 5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ (сплошная линия) и исходный (модельный) профиль КЭ (пунктир)

Если провести измерения в тех же условиях, но при угле $\alpha_2 = \alpha_1 + \pi/2$, получим

$$\begin{aligned} \hat{N}_{e2}(h) &\approx N_e(h) [1 + \varepsilon d \sin 2\Psi_2(h)] = \\ &= N_e(h) [1 - \varepsilon d \sin 2\Psi_1(h)] . \end{aligned}$$

Таким образом, искажения высотного профиля КЭ в двух экспериментах в приближении малости ошибок настройки одинаковы по величине и противоположны по знаку.

Пример профилей КЭ, вычисленных по точным формулам (10), (11), (13) приведен на рис. 3. Пунктирной линией показан модельный профиль, сплошной линией – оценка профиля, полученная в первом эксперименте, а точками – оценка во втором эксперименте, т.е. с поворотом ПЭ.

Таким образом, можно получить оценку

$$\hat{N}_e(h) = \frac{1}{2} (\hat{N}_{e1}(h) + \hat{N}_{e2}(h)) = N_e(h) , \quad (14)$$

в которой ошибки, вызванные неточной поляризационной настройкой приемной антенны, в

приближении малости ошибок настройки будут полностью скомпенсированы.

В частности, результат суммирования искаженных профилей КЭ, показанных на рис. 3, в соответствии с выражением (14) приведен на рис. 4.

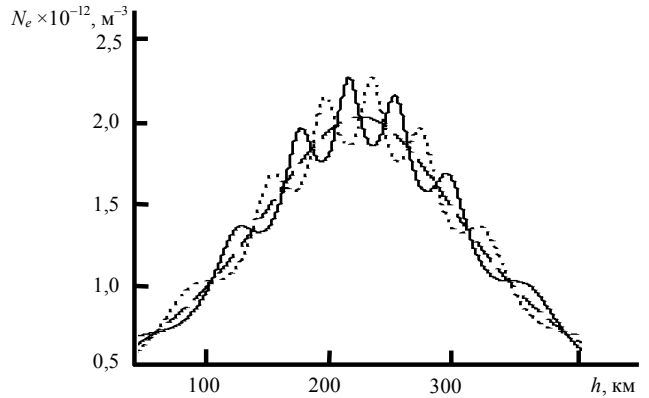


Рис. 3 – Профили КЭ, вычисленные по точным формулам (10), (11), (13). Пунктирной линией показан модельный профиль, сплошной линией и точками – оценки профиля, полученные в первом и втором экспериментах соответственно

Точками показан модельный профиль, а сплошной линией – результат суммирования искаженных профилей. Как видно, при данных ошибках настройки ($\varepsilon = 0,1$) результат суммирования практически совпадает с модельным профилем.

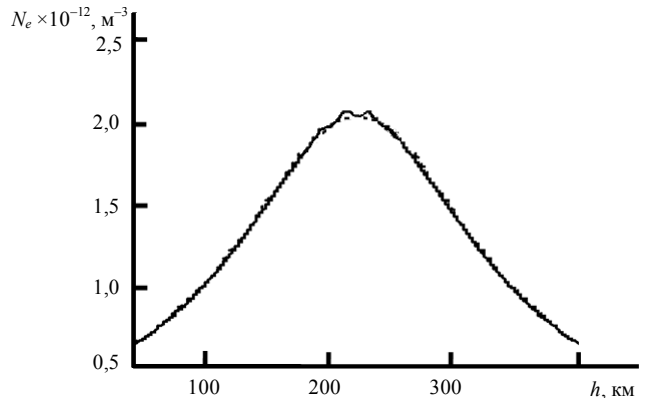


Рис. 4 – Результат суммирования искаженных профилей КЭ, показанных на рис. 3 (сплошная линия) и модельный профиль КЭ (точки)

Отметим, что технические возможности изменения угла α на $\pi/2$ существуют. Наиболее простой способ изменения указанного угла заключается в том, чтобы использовать при излучении разные вибраторы. Другой способ основывается на том, что угол наклона ПЭ определяется формулой [6]

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \frac{\dot{p} + \dot{p}^*}{1 - |p|^2} , \quad (15)$$

где $\dot{p} = \frac{\dot{E}_2}{E_1} = |p| e^{i\theta}$ представляет собой отношение комплексных амплитуд излучаемого поля в линейном

поляризационном базисе. Выражение (15) можно записать в виде

$$\beta = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{2 \cos \Phi}{\frac{1}{|p|} - |p|}. \quad (16)$$

Из (15) и (16) видно, что если установить $|p| = 1$, то $\beta = \pm \pi/4$, причем знак зависит от знака косинуса. Таким образом, если при $|E_1| = |E_2|$ на одном из ортогональных вибраторов изменить фазу на π , то ПЭ развернется на $\pi/2$.

4. Возможности контроля качества настройки.

При описанном зондировании с поворотом ПЭ появляются дополнительные возможности контроля качества поляризационной настройки приемной антенны. Первая возможность основана на анализе функции

$$a(h) = \frac{\hat{N}_{e1(h)} - \hat{N}_{e2(h)}}{\hat{N}_{e1(h)} + \hat{N}_{e2(h)}} = \varepsilon d \sin 2\Psi(h). \quad (17)$$

Функция (17) в максимуме равна $a_{max} = \varepsilon d$, откуда при известном d получаем величину ε . Так, например, при линейной поляризации зондирующего сигнала $\langle U^2 \rangle \approx \langle V^2 \rangle$. Если, к тому же, используется короткий зондирующий импульс, то $\langle UV^* \rangle \approx \langle U^2 \rangle \approx \langle V^2 \rangle$, так что $d \approx 1$.

Вторая возможность контроля основана на анализе высотного профиля мощности НР сигнала или КЭ, измеренной методом профиля мощности. Действительно, исходя из (6) получаем, что средние мощности сигналов на выходе моста

$$P_+ = \langle \dot{s}_+ \dot{s}_+^* \rangle = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}, \quad (18)$$

$$P_- = \langle \dot{s}_- \dot{s}_-^* \rangle = 4 \left\{ \langle V^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle U^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}. \quad (19)$$

Таким образом, наблюдая, например, мощность (18) в указанных двух экспериментах с разной поляризацией зондирующего сигнала, получим

$$P_{+1} = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} - \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\},$$

$$P_{+2} = 4 \left\{ \langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi \right\}.$$

Откуда получаем

$$\gamma = \frac{P_{+2} - P_{+1}}{P_{+2} + P_{+1}} = \frac{\langle UV^* \rangle \sin \varepsilon \sin 2\Psi}{\langle U^2 \rangle \cos^2 \frac{\varepsilon}{2} + \langle V^2 \rangle \sin^2 \frac{\varepsilon}{2}}, \quad (20)$$

В экстремальных точках при линейной поляризации сигнала и малости ошибок настройки (20) имеет вид

$$\gamma \approx \varepsilon \rho \quad (21)$$

или, при высокой корреляции, наблюдаемой при коротком зондирующем импульсе,

$$\varepsilon \approx \gamma = \frac{P_{+2} - P_{+1}}{P_{+2} + P_{+1}}. \quad (22)$$

Если же в соответствии с методом профиля мощности вычислены высотные профили КЭ по формулам

$$N_{e1}(h) = P_{+1}(h)C(h, \beta),$$

$$N_{e2}(h) \approx P_{+2}(h)C(h, \beta),$$

где $C(h, \beta)$ – функция, зависящая от высоты и отношения температур электронов и ионов $\beta = T_e/T_i$, то ошибка ε вычисляется на основании соотношения (17) так же, как и при использовании метода фарадеевского вращения.

Так, например, в проведенном на харьковском радаре эксперименте в двух 10 минутных сеансах измерений с разным наклоном ПЭ в излучаемой волне методом профиля мощности были получены КЭ, которые показаны на рис. 5. Пунктирная кривая отображает высотный профиль, измеренный в первом сеансе, точки – во втором сеансе.

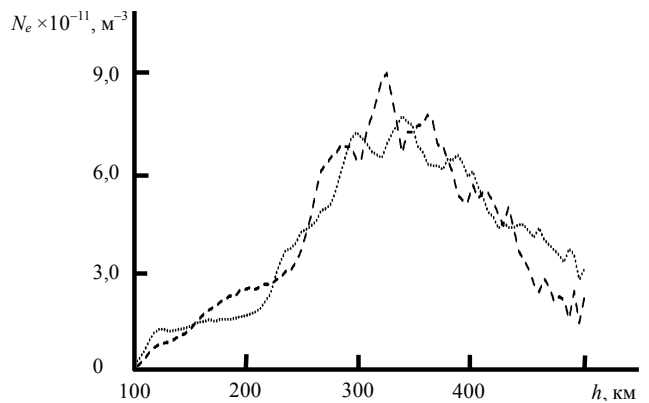


Рис. 5 – Измеренные с помощью радара НР профили КЭ с разным наклоном ПЭ в излучаемой волне. Пунктирная кривая отображает высотный профиль, измеренный в первом сеансе, точки – во втором сеансе

Пользуясь рис. 5 и формулой (21), можно определить, что погрешность поляризационной настройки ε в данном случае составляет около 0,14 рад.

Заключение. При измерении КЭ в плотной ионосфере использование метода фарадеевского вращения является альтернативой использованию метода профиля мощности. При этом метод фарадеевского вращения не требует измерения температур ионов и электронов и обеспечивает лучшую разрешающую способность. Кроме того, совместное использование метода профиля мощности и метода фарадеевского вращения позволяет измерять напряженность магнитного поля Земли в плотной ионосфере [2, 7].

Качество поляризационной настройки приемной антенны является практически единственным фактором, порождающим систематические ошибки измерения КЭ методом фарадеевского вращения. В то же время повышение точности поляризационной

настройки антенны представляет трудную техническую задачу.

Предложенный и рассмотренный в статье способ позволяет исключить указанные ошибки даже при существенных погрешностях поляризационной настройки антенны. Кроме того, предложенная поляризационная манипуляция позволяет контролировать качество поляризационной настройки.

Таким образом, актуальным является экспериментальное исследование, а также использование данного способа при проведении ионосферных измерений на радаре НР.

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. Скворцов Т. А. Радиолокационный метод измерения геомагнитного поля в ионосфере / Т. А. Скворцов, Л. Я. Емельянов, А. В. Фисун // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2014. Вып. 179. – С. 10-17. 3. Пат. № 68436, Украина, МПК⁷ G01S 13/95. Спосіб визначення концентрації електронів в іоносфері / Скворцов Т. О., Емельянов Л. Я., Фисун А. В., Рогожкін С. В. – У 2011 10688; заявл. 05.09.2011; опубл. 26.03.2012, Бюл. №6. – 5 с. 4. Domnin, I. F. Kharkiv Incoherent Scatter Facility / I. F. Domnin, Ya. M. Chepurnyu, L. Ya. Emelyanov et al. // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2014. – No 47 (1089). – P. 28-42. 5. Ткачев Г. Н. Измерение разности фаз между флуктуирующими сигналами, принятыми на ортогонально поляризованные антенны / Г. Н. Ткачев, Т. А. Скворцов, В. Д. Карлов

// Радиотехника. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1982. – Вып. 60. – С. 57-67. 6. Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин – М.: Советское радио. – 1966. – 440 с. 7. Пат. № 71162, Україна, МПК⁷ G01S 13/95. Спосіб вимірювання параметрів іоносфери і магнітосфери / Емельянов Л. Я., Скворцов Т. О., Склярів І. Б., Фисун А. В. – № U201113371; заявл. 14.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13. – 4 с.

Bibliography (transliterated): 1. Evans, J. V. *Theory and practice of ionosphere study by Thomson scatter radar*, Proc. IEEE, 57, 496–530, 1969. 2. Skvortsov, T. A., L. Ya. Emelyanov, and A. V. Fesun. "Radiolokatsionnyj metod izmerenija geomagnitnogo polja v ionosfere" Radiotekhnika. No 179. 2014. 10–17. Print. 3. Patent No 68436, Ukraine, G01S 13/95. *Sposib viznachennya kontsentratsiyi elektroniv v ionosferi* / Skvortsov, T. A., L. Ya. Emelyanov, A. V. Fesun, and E. V. Rogozhkin; patented 05.09.2011; published 26.03.2012, Bulletin No 6. (Print). 4. Domnin, I. F., Ya. M. Chepurnyu, L. Ya. Emelyanov et al. *Kharkiv Incoherent Scatter Facility* // Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Politechnic Institute”. Scientific papers. Issue: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU “KhPI”. No 47 (1089). 2014. 28–42. 5. Tkachev, G. N., T. A. Skvortsov, and V. D. Karlov. "Izmerenie raznosti faz mezhdru fluktuiruyuschimi signalami, primyatymi na ortogonalno polyarizovannyye anteny." Radiotekhnika. No 60. 1982. 57–67. Print. 6. Kanareykin, D. B., N. F. Pavlov, and V. A. Potehin. *Polyarizatsiya radiolokatsionnyih signalov*. Moscow: Sovetskoe radio, 1966. Print. 7. Patent No 71162. Ukraine, G01S 13/95. *Sposib vimiryuvannya parametriv ionosferi i magnitosferi* / Emelyanov, L. Ya., T. A. Skvortsov, I. B. Sklyarov, and A. V. Fesun.; patented 14.11.2011; published 10.07.2012, Bulletin No 13 (Print).

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Скворцов Тарас Олександрович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Скворцов Тарас Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Skvortsov Taras Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv; tel.: (063) 611-83-50; e-mail: skvortsov_ta@mail.ru.

Емельянов Леонід Якович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, Інститут іоносфери, завідувач відділу, м. Харків; тел.: 706-22-87, (096) 036-28-39; 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, (096) 036-28-39; 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, (096) 036-28-39; e-mail: leonid.ya.emelyanov@gmail.com.

Фисун Андрій Васильович – аспірант кафедри «Радіоелектроніка»; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.

Фисун Андрей Васильевич – аспирант кафедры «Радиоэлектроника»; Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», тел.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.

Fesun Andrey Vasilyevich – Postgraduated Student at the Department of “Radioelectronics”; National Technical University “Kharkiv Polytechnical Institute”, Kharkiv; tel.: (068) 954-61-55; e-mail: av_fesun@mail.ru.

УДК 621.396

В. В. БАРАБАШ, А. И. ЛЯЛЮК, Г. М. ТИНЯКОВ**МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ «БАЗИС»**

Представлены результаты изменения программного обеспечения обработки файлов содержащих экспериментальные данные полученные при помощи станции вертикального зондирования входящей в состав измерительного комплекса Института ионосферы. Изложены причины для модернизации программного обеспечения. Описаны преимущества и особенности разработанного программного обеспечения для обработки экспериментальных данных. Приведены описание функций нового программного обеспечения и их внешний вид. Сделаны выводы о снижении ошибок при обработке ионограмм, увеличении скорости с которой осуществляется обработка, и частичной автоматизации сохранения значений критической частоте.

Ключевые слова: обработка, экспериментальные данные, программное обеспечение, вертикальное зондирование, программа, профиль.

Введение. Наиболее распространенным методом исследования ионосферы является метод вертикального зондирования. При исследований ионосферы методом вертикального зондирования Институт ионосферы использует станцию «Базис». Формат данных в данный момент не позволяет отслеживать переключение пределов измерений. Рабочий диапазон станции 10 МГц что, при больших колебаниях значений критической частоты f_0F2 в ночное и дневное время не позволяет работать на одном частотном диапазоне весь цикл измерений. В периоды повышенной солнечной активности величина критической частоты ночью примерно 1,5 МГц, тогда как днем – 13 МГц, что требует перехода в другой частотный диапазон на протяжении суток. При обработке результатов измерений требуются данные о переключении в другой частотной диапазон и записи данного параметра в файл данных. Для устранения этого недостатка разработано программное обеспечение записи и обработки полученных результатов.

Анализ литературы. В [1, 6] рассмотрена автоматическая ионосферная станция (АИС) «Базис» после доработки оборудования для режима хранения данных в цифровом виде. При составлении общей структуры программы были учтены основные требования предъявляемые к системам виртуальных измерительных комплексов [2]. Были рассмотрены подобные программы для программно-аппаратного комплекса обсерватории «ПАРАТУНКА» [3], а также программы станций «Парус», «Бизон» и «Digisonde DPS-4» [4] с целью максимальной информативности и удобства программы предварительной обработки.

Цель статьи – рассмотреть модернизацию программного обеспечения используемого при записи и первичной обработке АИС «Базис», для эффективной работы в обычных и возмущенных геомагнитных условиях.

Модернизация программного обеспечения. Техническая часть преобразования данных из аналогового вида в цифровой, была решена при помощи внедрения блока цифрового преобразования [1]. Блок представляет собой систему, состоящую из персонального компьютера, устройства синхронизации и аналого-цифрового преобразователя. Устройство синхронизации позволяет подключить аналого-цифровой преобразователь к персональному

компьютеру посредством шины ISA и обеспечить работу блока цифрового преобразования в соответствии с рабочим режимом АИС «Базис» [6]. Программное обеспечение комплекса состоит из *двух частей*. *Первая* – осуществляет преобразование данных из аналогового вида в цифровой и их запись на магнитный носитель, а также позволяет производить визуальный контроль преобразованных данных. *Вторая* – дает возможность производить предварительную автоматическую или ручную обработку преобразованных данных.

Рассмотрим первую часть. Процесс цифрового преобразования контролируется персональным компьютером посредством программного обеспечения функционирующего в среде программирования языка Turbo Pascal. В связи с работой в реальном режиме времени программа работает в среде DOS и позволяет программными средствами осуществлять прямой доступ к памяти, что способствует уменьшению времени преобразования полученных данных в цифровой вид и увеличить скорость обработки рабочих сигналов АИС «Базис». Это обеспечивает корректное формирование файла с данными.

При преобразовании и обработке данных полученных при высокой геомагнитной активности возникла необходимость получать дополнительную информацию о рабочем режиме станции вертикального зондирования (СВЗ). Поскольку формат данных, использовавшийся, до модернизации не позволял хранить информацию о текущем частотном диапазоне, шаге по частоте, количестве рабочих частот. Для устранения этого недостатка был разработан новый формат данных.

Внедрение нового формата повлекло за собой доработку программы записи данных. В файл данных производится запись режимов работы аппаратуры таких как:

- 1) *число высотных интервалов* – фиксированное число запусков АЦП;
- 2) *начальная частота* (МГц) – нижняя частота частотного диапазона;
- 3) *количество отчетов* – число замеров проведенных на одной частоте, для улучшения статистических характеристик;

4) количество рабочих частот – количество частот, которые используются для работы в ходе измерений;

5) шаг частоты (кГц) – шаг по частоте, используемый для дискретного переключения частоты в ходе измерений;

6) интервал измерений (мин) – временной интервал между сеансами измерений, изменяется дискретно и может принимать значения: 1мин, 5мин, 15мин, 60мин.

Наличие данных о параметрах работы аппаратуры в дальнейшем позволит реализовать для данной станции алгоритмы автоматического

определения критической частоты, а также построения суточного хода критической частоты.

Рассмотрим вторую часть. Обработка данных производится не в режиме реального времени, это позволило снизить требования к быстродействию. Поэтому для простоты модернизации программного обеспечения комплекса, вторая часть разработана с использованием языка программирования Delphi, что дает возможность использовать более совершенный программный алгоритм обработки (вид интерфейса) (рис. 1).

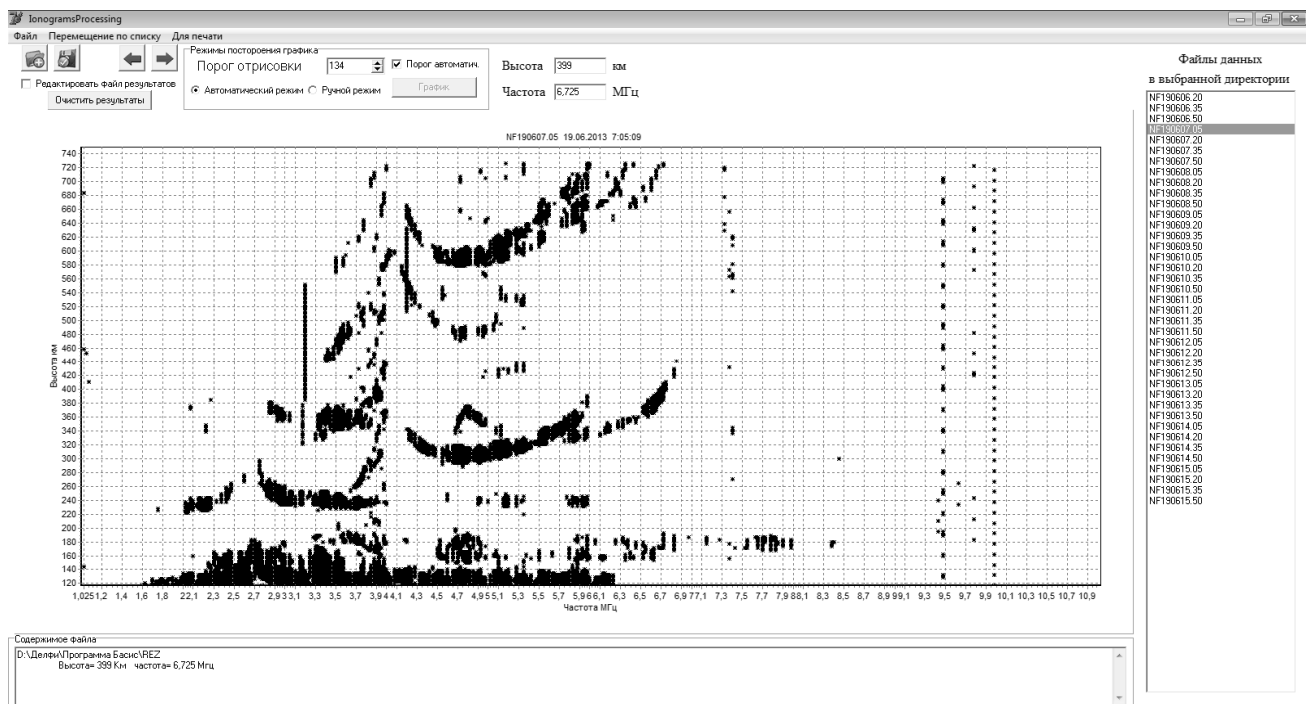


Рис. 1 – Интерфейс программы обработки ионограмм

Для поддержания файлов сформированных в предыдущем формате в программу была добавлена возможность выбора типа файла (рис. 2).

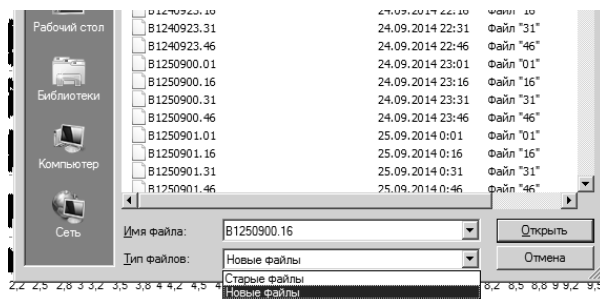


Рис. 2 – Выбор типа файлов

Программа первичной обработки данных производит коррекцию высотно-частотных характеристик (ВЧХ), позволяет производить выбор уровня значения

сигнал/шум – автоматически или в ручном режиме (рис. 3).

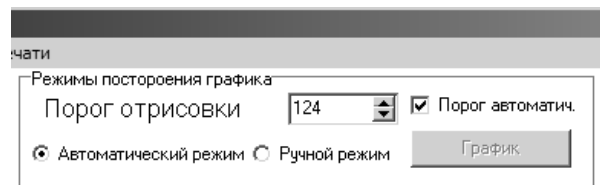


Рис. 3 – Выбор значения соотношения сигнал/шум

Это дает возможность, используя данные о режиме работы аппаратуры, значительно улучшить качество обрабатываемых ионограмм и более достоверно определить параметры ионосферы (см. рис. 4).

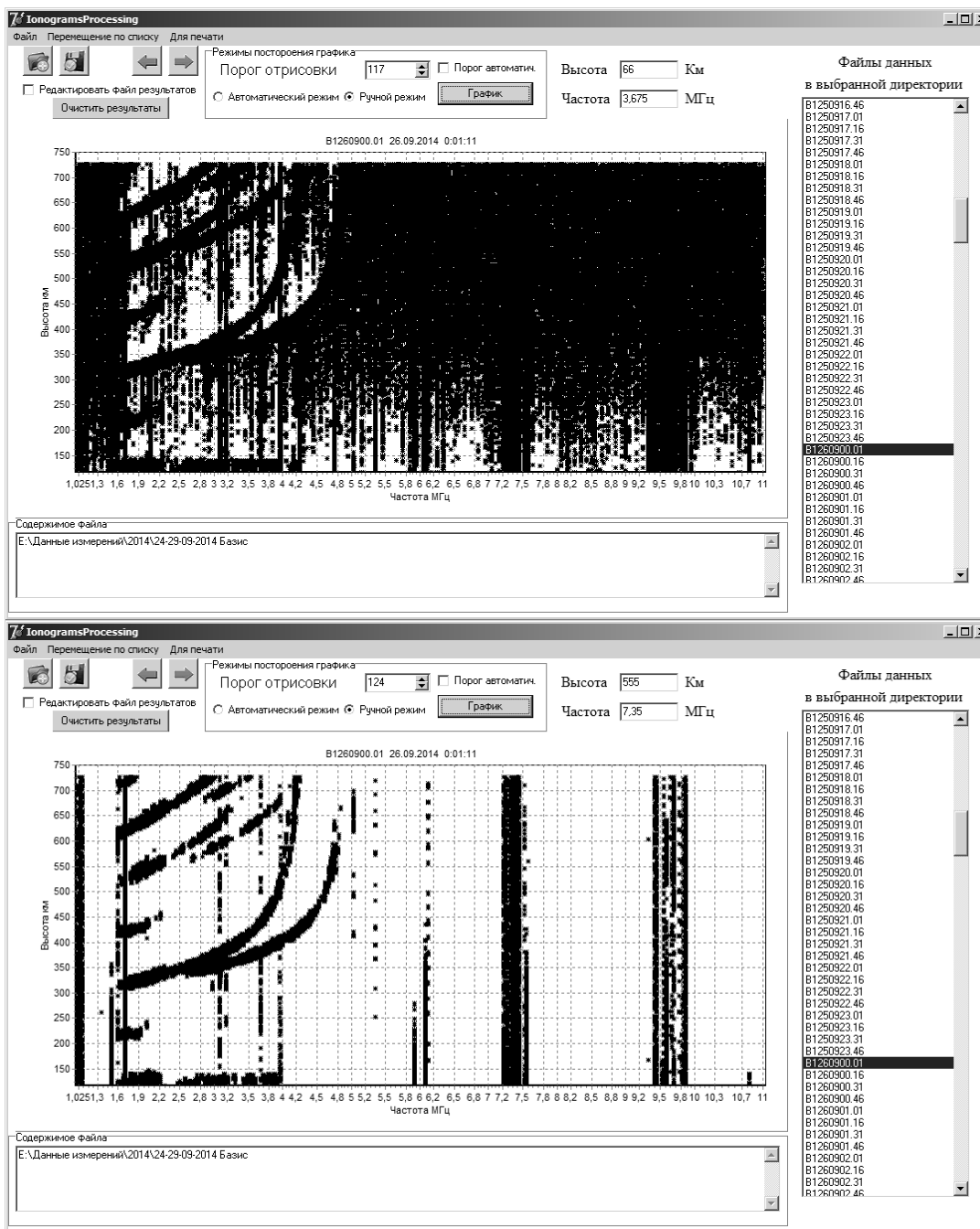


Рис. 4 – Пример ионограмм до обработки – верхняя панель и после обработки – нижняя панель

Также программа позволяет получить значения ВЧХ в табличном виде, сохраняемом в файле с расширением TXT (рис. 5), которые могут быть

использованы для восстановления ионного профиля при помощи внешних приложений.

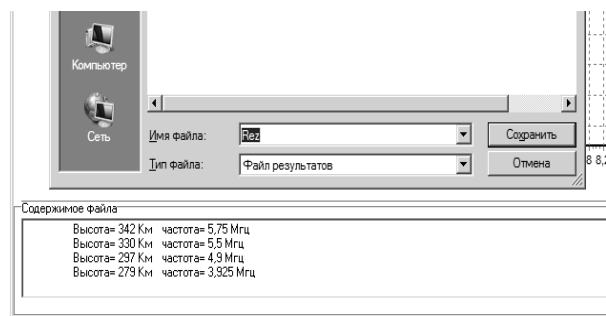


Рис. 5 – Запись данных в текстовый файл

Дальнейшей задачей развития программного комплекса, блока цифрового преобразования ионосферной станции, является написание модуля автоматической интерпретации ионограмм.

Было рассмотрено несколько вариантов решения данной задачи. В данное время основным методом обработки ионограмм применяемым системами станций вертикального зондирования (“Парус”, “Бизон”, “Digisonde”) является метод вращающихся, или трафаретных масок. Суть метода заключается в том, что на первом этапе составляется набор теоретически возможных вариантов, на втором сравнение теоретических решений с реальными

данными и выбор наиболее соответствующего варианта.[4]

Можно также выделить четыре метода восстановления высотного профиля электронной концентрации: метод Huang-Reinisch, используемый на дигизондах, методика Гуляевой, способ Михайлова, а также модель IRI которая позволяет восстановить $N(h)$ -профиль.

Сравнительный анализ этих методов не показал однозначного преимущества, какого либо метода перед другими. [5] Поэтому разработка модуля будет производиться с возможностью применения различных методов обработки, для достижения наилучших результатов и получения наиболее полной информации.

Выводы. Модернизация программного обеспечения, позволила устранить ошибки интерпретации ионограмм вызванные отсутствием данных о режиме работы аппаратуры и значительными, быстро изменяющимися значениями критической частоты при возмущенных геомагнитных условиях.

Кроме того появляется возможность восстановления профиля $N_e(h)$ по измеренным высотно-частотным характеристикам и автоматизации учета данных о критической частоте при обработке измерений методом некогерентного рассеяния.

Список литературы: 1. *Лысенко В.Н.* Перспективы применения ионозонда в составе радара некогерентного рассеяния Института ионосферы / *Лысенко В.Н., Скляр И.Б.* // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Сер.: Радиофизика и ионосфера. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – №23. – С. 63–68. 2. *Патрик Гёль* Как превратить персональный компьютер в измерительный комплекс // Перевод с французского Брандинского А.Э / ред. Куликова Г.В. – М.: ДМК. – 1999. – 144 с. 3. *Шушпанов Г.А.* Программа для анализа ионограмм

// Информатика и системы управления. – 2005. – №2(10). – С. 198–200. 4. *Зыков Е.Ю.* Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования / *Зыков Е.Ю., Акчури А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н.* // Электронный научный журнал «ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ». – 2007. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/005.pdf> 5. *Ким А.Г.* Сравнительный анализ различных способов восстановления высотного профиля электронной концентрации по данным вертикального зондирования в Иркутске / *Ким А.Г., Котович Г.В., Михайлов С.Я., Ратовский К.Г.* // Труды Международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике (БШФФ-2006). 6. *Барабаш В.В.* Разработка комплекса цифрового преобразования для автоматической станции вертикального зондирования «Базис» // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. Сер.: Радиофизика и ионосфера. – 2010. – № 48. – С. 83–86.

Bibliography (transliterated): 1. *Lysenko V.N.* Perspektivy primeneniya ionozonda v sostave radara nekogerentnogo rassejaniya Instituta ionosfery / *Lysenko V.N., Sklyarov I.B.* // Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Radiofizika i ionosfera. – Kharkov: NTU «HPI». – 2004. – № 23. – P. 63–68. 2. *Patrik Gjoll* Kak prevratit' personal'nyj komp'yuter v izmeritel'nyj kompleks // Perevod s francuzskogo *Brjandinskogo A. Je / red. Kulikova G.V.* – M.: DMK. – 1999. – 144 p. 3. *Shushpanov G.A.* Programma dlja analiza ionogramm / *G.A. Shushpanov* // Informatika i sistemy upravleniya. – 2005. – № 2 (10). – P. 198–200. 4. *Zykov E.Ju.* Avtomaticheskaja interpretacija ionogramm vertikal'nogo zondirovanija / *Zykov E.Ju., Akchurin A.D., Sapaev A.N., Sherstjukov O.N.* // Jelektronnyj nauchnyj zhurnal «ISSLEDOVANO V ROSSII». – 2007. – Rezhim dostupu: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/005.pdf> 5. *Kim A.G.* Sravnitel'nyj analiz razlichnyh sposobov vosstanovlenija vysotnogo profilja jelektronnoj koncentracii po dannym vertikal'nogo zondirovanija v Irkutske / *Kim A.G., Kotovich G.V., Mihajlov S.Ja., Rатовский K.G.* // Trudy Mezhdunarodnoj Bajkal'skoj molodezhnoj nauchnoj shkoly po fundamental'noj fizike (BShFF-2006). 6. *Barabash V.V.* Razrabotka kompleksa cifrovogo preobrazovanija dlja avtomaticheskoy stancii vertikal'nogo zondirovanija «Bazis» / *V.V. Barabash* // Vestn. Har'k. politehn. in-ta. Ser.: Radiofizika i ionosfera. – 2010. – № 48. – P. 83–86.

Поступила (received) 11.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Барабаш Володимир Володимирович – молодший науковий співробітник Інституту іоносфери, м. Харків; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Барабаш Владимир Владимирович – младший научный сотрудник Института ионосферы, г. Харьков; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Varabash Volodymyr Volodymyrovych – Junior Researcher of the Institute of the ionosphere, Kharkov; tel.: +38 (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Лялюк Олексій Іванович – молодший науковий співробітник Інституту іоносфери, м. Харків; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Лялюк Алексей Иванович – младший научный сотрудник Института ионосферы, г. Харьков; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Lialiuk Oleksii Ivanovich – Junior Researcher of the Institute of the ionosphere, Kharkov; tel.: +38 (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Тіняков Григорій Михайлович – провідний інженер електронік Інституту іоносфери, м. Харків; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Тиняков Григорий Михайлович – ведущий инженер-электроник Института ионосферы, г. Харьков; тел.: +38(057)707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua

Tinyakov Gregory Myhajlovych – Leading Electronics Engineer of the Institute of the ionosphere, Kharkov; tel.: +38 (057) 707-67-69; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

А. В. БОГОМАЗ, Д. В. КОТОВ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для модельных суточных вариаций параметров

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

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

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

R_p – АКФ огибающей зондирующего радиоимпульса;

R_F – АКФ импульсной характеристики приёмного тракта радара.

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

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

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

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

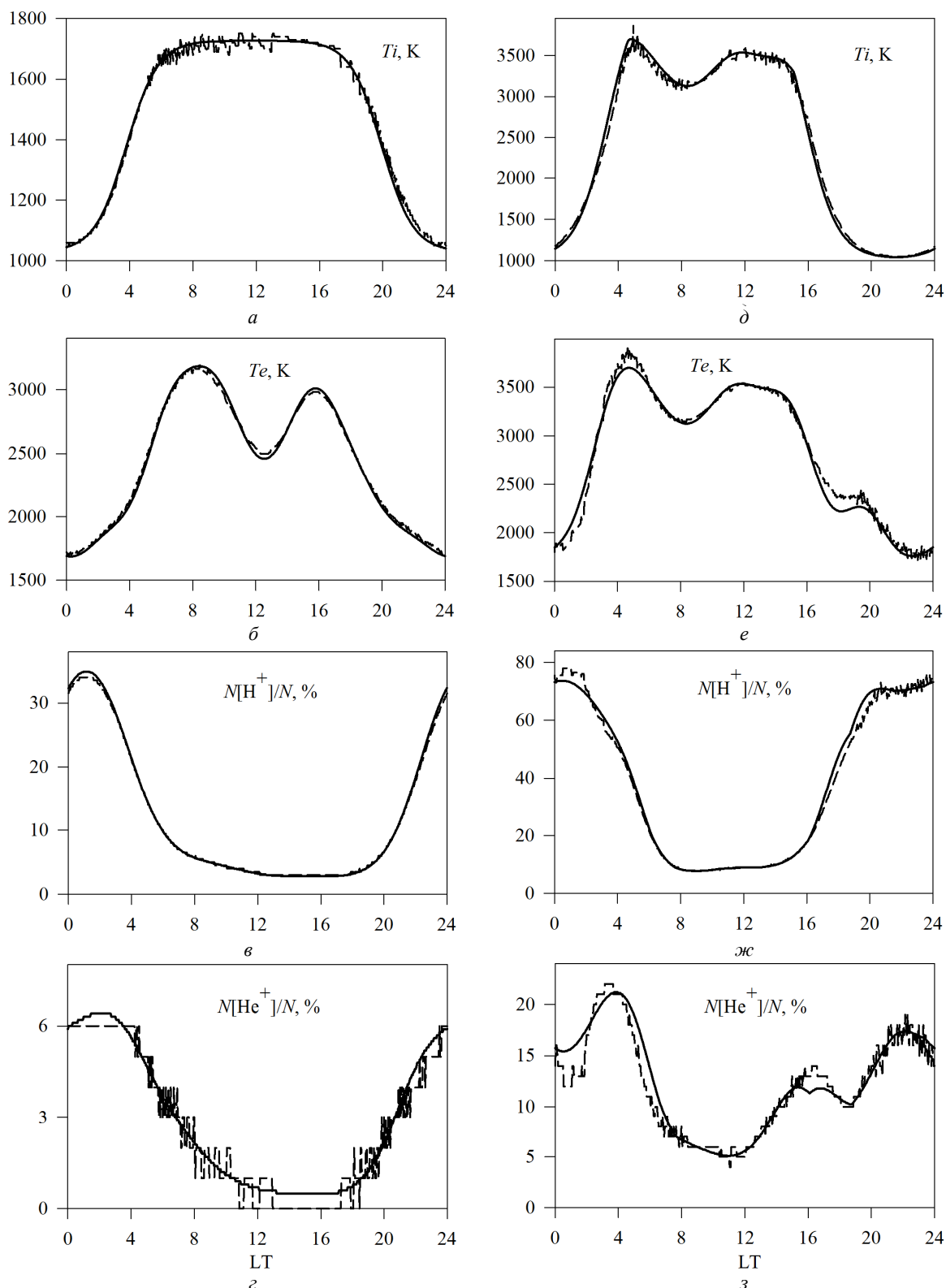


Рис. 1 – Используемые для синтеза вариаций АКФ модельные вариации параметров ионосферной плазмы: a – температура ионов T_i , $б$ – температура электронов T_e , $в$ – относительное содержание ионов атомарного водорода $N[H^+]/N$ и $д$ – относительное содержание ионов гелия $N[He^+]/N$ (сплошная линия);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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ДФН рассчитывается по формуле:

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

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

$p(s)$ – огибающая зондирующего радиоимпульса;

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

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

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

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

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

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

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

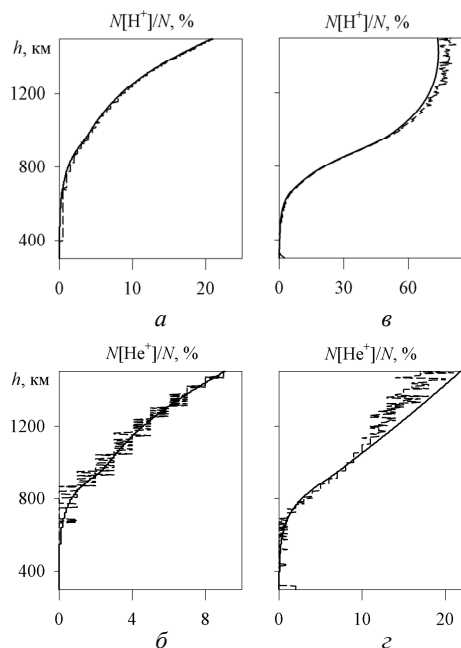


Рис. 2 – Модельные вариации параметров $N[\text{H}^+]/N$ и $N[\text{He}^+]/N$ (сплошная линия), использованные для синтеза вариаций АКФ с помощью ДФН с учётом высотного изменения параметров ионосферной плазмы, и результаты решения обратной радиофизической задачи, полученные без учёта высотных изменений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

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

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

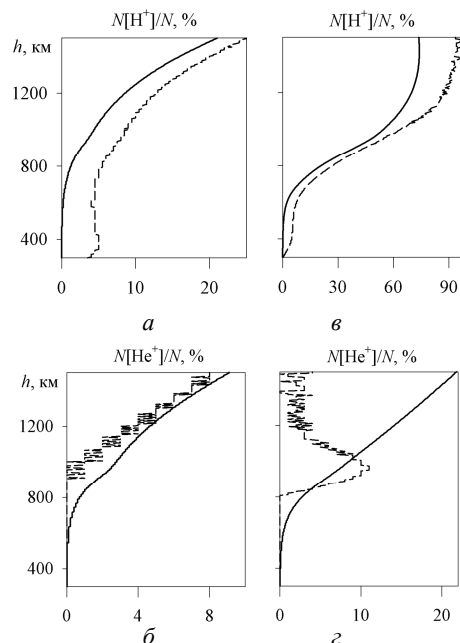


Рис. 3 – Модельные вариации параметров $N[\text{H}^+]/N$ и $N[\text{He}^+]/N$ (сплошная линия), использованные для синтеза вариаций АКФ с помощью ДФН с учётом высотного изменения параметров ионосферной плазмы при наличии дополнительного высотного усреднения АКФ (итоговая разрешающая способность 200 км),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

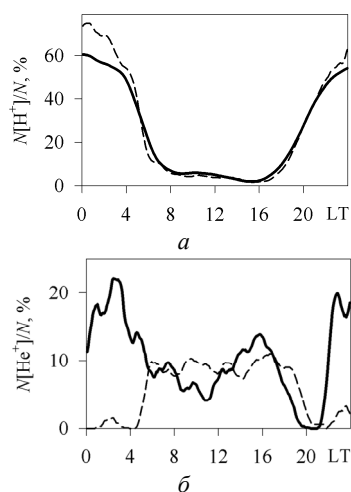


Рис. 4 – Результаты анализа данных харьковского радара НР при отсутствии дополнительного высотного усреднения АКФ (разрешающая способность около 100 км) (сплошная линия) и при использовании дополнительного высотного усреднения АКФ (итоговая разрешающая способность около 200 км) (пунктир). a – относительное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

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

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

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

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

Список литературы: 1. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж. В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т. 8, № 4. – С. 139–175. 2. Zhou Q. H., Q. N. Zhou, J. D. Mathews // Arithmetic average, geometric average, and ranking: Application to incoherent scatter radar data processing / Q. H. Zhou, Q. N. Zhou, J. D. Mathews // Radio Science. – 1999. – Vol. 34, № 5. – P. 1227–1237. 3. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new

parameters / D. Bilitza, B. W. Reinisch // Advances in Space Research. – 2008. – Vol. 42, Iss. 4. – P. 599–609. 4. Богомаз А. В. Пакет программ нового поколения для обработки данных радаров некогерентного рассеяния Unified Processing of the Results of Incoherent Scatter Experiments (UPRISE) / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – № 28 (1001). – С. 29–37. 5. Holt J. M. Optimal analysis of incoherent scatter radar data / J. M. Holt, D. A. Rhoda, D. Tetenbaum, A. P. Eyken // Radio Sci. – 1992. – V. 27. – № 3. – P. 435–447. 6. Hysell D. L. Full profile incoherent scatter analysis at Jicamarca / D. L. Hysell, F. S. Rodrigues, J. L. Chau, J. D. Huba // Ann. Geophys. – 2008. – № 26. – P. 59–75. 7. Сюсюк М. Н. Моделирование двумерной функции неопределенности радара некогерентного рассеяния / М. Н. Сюсюк, Д. В. Котов, А. В. Богомаз // Вестник НТУ «ХПИ». Радиофизика и ионосфера. – Харьков. – 2011. – № 44 – С. 81–84.

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

Поступила (received) 10.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

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

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

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

УДК 550.388.2

С. В. ГРИНЧЕНКО, Д. А. ДЗЮБАНОВ

ВЫСОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ДВИЖЕНИЯ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА НАД ХАРЬКОВОМ

Приводятся расчеты нейтрального ветра в интервале высот 110–300 км согласно модели HWM93. Показаны вариации величины и направления ветра в течение суток на различных высотах в условиях низкой и высокой солнечной активности.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ионосфера, ветер в ионосфере, модель горизонтальных ветров HWM93.

Введение. Увлечение ионосферной плазмы движущейся нейтральной атмосферой является основным фактором динамических процессов в геокосмосе. Поэтому исследование движения нейтральной компоненты является промежуточным звеном, которое помогает понять ряд процессов, происходящих с ионизированной частью газовой оболочки Земли. Здесь имеется в виду, что движение нейтральных частиц определяет, по меньшей мере, две из трех основных составляющих общей скорости движения заряженных частиц в средней атмосфере. А именно, общая скорость обусловлена процессами амбиполярной диффузии, увлечением плазмы нейтральным ветром и дрейфом частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. Движение нейтральной компоненты ответственно за увлечение заряженных частиц на высотах термосферы, а также за генерацию электрического поля в динамо-области на высоте около 110 км. Последнее же явление обусловлено движением плазмы в геомагнитном поле. Рассмотрим кратко эти процессы.

Увлечение атмосферой ионосферы и ионосферой атмосферы. Если заряженные и нейтральные частицы в верхней атмосфере движутся относительно друг друга, то столкновения между ними меняют их взаимное движение. При этом можно говорить, что атмосфера увлекает ионосферу, а ионосфера увлекает нейтральную атмосферу. Следует сразу отметить, что доминирующим должно быть влияние той компоненты, концентрация частиц в которой больше. В данном случае речь идет о соотношении концентраций ионизированной и нейтральной компонент. Такое соотношение называется степенью ионизации и на высотах F-области это соотношение составляет примерно 10^{-3} .

Рассмотрим случай, когда плазма дрейфует со скоростью v_p , а нейтральная компонента движется со скоростью v_a . Причем движение происходит в одном и том же направлении, а столкновения между ионами плазмы и молекулами воздуха стремятся уравнять их скорости. На единичные объемы заряженной и нейтральных компонент действуют равные и противоположно направленные силы [1]:

$$F_p = v_{pa} n_p \frac{2m_p m_a}{m_p + m_a} (v_a - v_p),$$

$$F_a = v_{ap} n_a \frac{2m_p m_a}{m_p + m_a} (v_p - v_a),$$

которые создают ускорения:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{F_p}{n_p m_p} = v_{pa} (v_a - v_p),$$

$$\frac{dv_a}{dt} = \frac{F_a}{n_a m_a} = v_{ap} (v_p - v_a).$$

Пусть под действием приложенного электрического поля заряженная компонента находится в движении с постоянной скоростью v_p , а нейтральная компонента сначала неподвижна. Очевидно, что если на атмосферу не действуют никакие другие силы, то её скорость будет изменяться во времени в соответствии с выражением $v_a = v_p [1 - \exp(-v_{ap} t)]$, с постоянной времени v_{ap}^{-1} , до тех пор, пока не сравняется со скоростью плазмы. Аналогичные рассуждения показывают, что если внешние силы приводят в движение атмосферы со скоростью v_a , то скорость плазмы будет приближаться к значению этой скорости с постоянной времени v_{pa}^{-1} . Оценки постоянной времени дают, что захват атмосферой ионосферы вызывает движение ионосферы вслед за движениями атмосферы с опозданием в 1 с или меньше, а увлечение ионосферой заставляет атмосферу следовать за движениями плазмы с запаздыванием примерно в 1 час. В целом, очевидно, что при увеличении высоты v_{ap}^{-1} уменьшается, в то время как v_{pa}^{-1} растет. Это различие вызвано тем, что значение v_{pa}^{-1} пропорционально концентрации ионов, которая растет с высотой, тогда как значение v_{ap}^{-1} пропорционально концентрации нейтральных частиц, которая уменьшается с высотой.

Термосферный ветер, увлекая ионизированную компоненту, направляет её вдоль силовых линий геомагнитного поля. В дневное время для Харькова это движение направлено вниз, а в ночное – вверх.

Вертикальная составляющая скорости плазмы, увлеченной нейтральным термосферным ветром [2], $w_{term} = -v_{nx} \sin I \cos I \cos D + v_{ny} \sin I \cos I \sin D$, где v_{nx} , v_{ny} – зональная и меридиональная компоненты термосферного ветра; I , D – углы наклона и склонения геомагнитного поля; B – индукция геомагнитного поля.

Склонение положительно, если магнитное поле направлено на восток относительно географического

меридиана, и отрицательно, если направлено на запад. При этом полагается, что оси координат ориентированы так, что x направлена на север, y – на восток.

Дрейф плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях. Третьей составляющей движения плазмы в F-области является дрейф в скрещенных электрическом и магнитном полях. В качестве магнитного поля выступает магнитное поле Земли. Что касается электрического поля, то оно генерируется в так называемой динамо-области, которая расположена на высоте примерно 110 км. На этой высоте существует проводящий слой, который ведет себя подобно якорю атмосферного динамо, приводя к регулярным геомагнитных вариаций связанных с солнечными и лунными сутками. Ведущий слой перемещается в поясицу магнитному полю Земли в результате воздействия Солнца и Луны. Солнце вызывает его движение, нагревая слой озона, а Луна влияет вследствие гравитационного притяжения. Поток тепла от Солнца меняется с периодом в солнечные сутки и имеется также интенсивная полусуточная гармоника. Над большей частью поверхности Земли возникает реакция атмосферы на полусуточную гармонику в виде горизонтальных движений с периодом 12 часов. Они называются полусуточным солнечным приливом. Притяжения Луны вызывает прилив, подобный притока в океанах. Однако интенсивность солнечных приливов гораздо больше интенсивности лунных [1].

Движение проводящего слоя поперек постоянного магнитного поля Земли создает электродвижущую силу, компонента которой в плоскости слоя имеет направление, перпендикулярное к горизонтальной компоненте скорости движения и величину, пропорциональную произведению этой компоненты на вертикальную компоненту геомагнитного поля. В подвижном слое возникает электродинамическое поле $\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$.

На основе такой упрощенной модели ионосферы, в которой предполагается, что атмосферное «динамо» локализовано в ограниченном сверху и снизу слое на высоте около 110 км. Далее, как правило, предполагается существование атмосферного «мотора» на больших высотах в области F. Этот мотор приводится в движение «динамо», расположенным ниже. Считается, что проводимость части ионосферы, расположенной выше «динамо», намного больше вдоль направления магнитного поля, чем поперек него. Поэтому электростатические поля, созданные в динамо-области, передаются вдоль наклонных силовых линий в области F на высоты около 250 км. Эти поля вместе с геомагнитным полем могут вызвать движение области F. Поскольку на таких высотах частота столкновений ионов и электронов много меньше, чем соответствующие гирочастоты, то

электрическое поле перемещает ионы совместно с электронами в направлении, перпендикулярном магнитному полю со скоростью $\vec{v} = (\vec{E} \times \vec{B}) / |\vec{B}|^2$.

Таким образом, суммируя изложенное выше, можно сказать, что нейтральный ветер оказывает влияние на движение плазмы в F – области ионосферы двумя путями. Во-первых, посредством увлечения плазмы вдоль магнитных силовых линий. Во-вторых, обеспечивает дрейф частиц в скрещенных электрическом и магнитном полях. При этом электрическое поле генерируется в динамо-области за счет движения плазмы, вызываемым нейтральным ветром. При этом, и теория и эксперимент [3] говорят о том, что влияние солнечного нагрева способствует возникновению ветра с суточной периодичностью на высотах термосферы и возникновению полусуточных гармоник на высотах области E. То есть, нейтральный ветер на разных высотах имеет различные механизмы воздействия на ионосферную плазму.

Поэтому, представляет интерес проанализировать результаты расчета скорости нейтрального ветра по модели HWM93 для разных высот и различных уровней солнечной активности.

В настоящее время для описания глобальной картины движения атмосферы успешно используется модели горизонтальных ветров нейтральной компоненты HWM93 [4] и HWM07 [5]. Главной причиной, вызывающей движение атмосферы, является нагрев нейтрального газа солнечным излучением [6–10]. При этом направление движения газа определяется положением подсолнечной точки и перемещением ее по поверхности Земли. Абсолютная величина скорости газа на высотах термосферы определяется также интенсивностью нагрева, зависящей от солнечной активности. Интересной особенностью является то, что, согласно модели, летним днём при низкой солнечной активности практически отсутствует движение газа в северном направлении. Расчёты показывают, что движение в сторону полюса возникает только при средней и высокой солнечной активности. Меридиональная компонента скорости нейтрального ветра определяет движение плазмы вдоль геомагнитных силовых линий и, в конечном счете, составляющую вертикальной скорости, которая измеряется методом некогерентного рассеяния.

На рис. 1–3 представлены годографы вектора скорости горизонтального ветра в периоды весеннего равноденствия, летнего и зимнего солнцестояния. Расчеты представлены для трех высот (300, 200 и 110 км). Высота 110 км выбрана потому, что на этой высоте расположена область ионосферного «динамо». Расчеты соответствуют низкой и высокой солнечной активности. Меридиональная составляющая $v_{mer} = v_{nx}$, зональная – $v_{zon} = v_{ny}$.

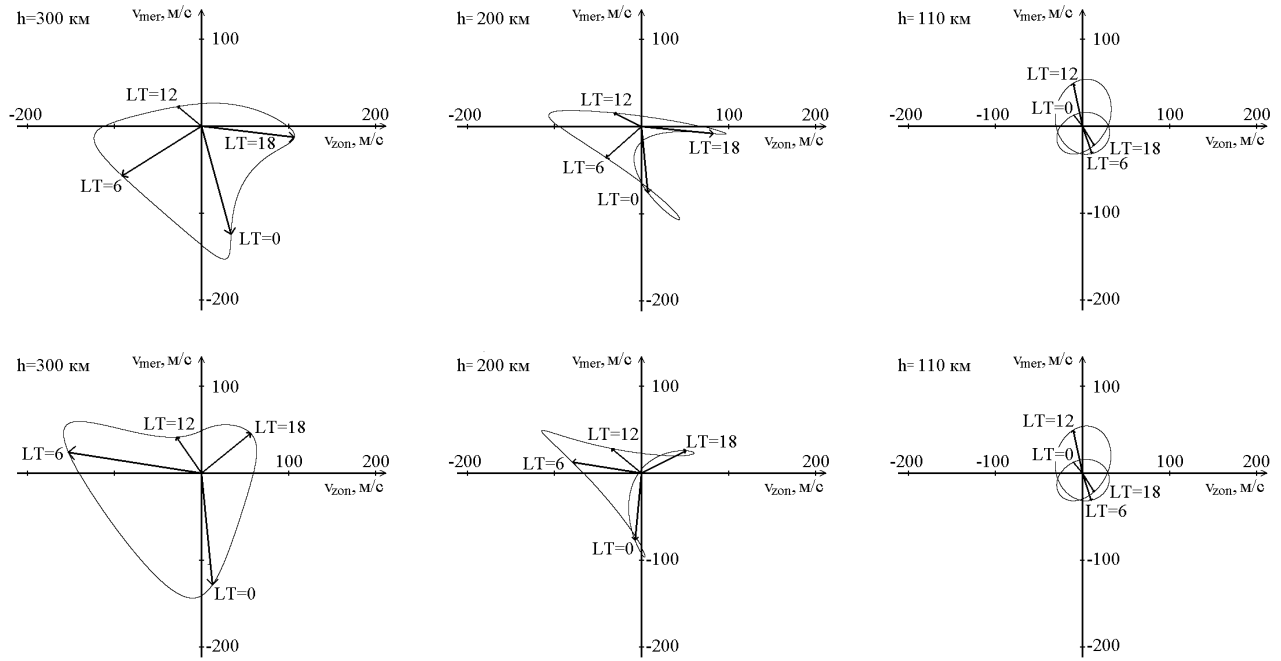


Рис. 1 – Суточные вариации величины и направления горизонтального ветра в период весеннего равноденствия высотами 300, 200 и 110 км (слева направо) при низкой ($F_{10.7} = 72$) (верхняя панель) и высокой ($F_{10.7} = 200$) солнечной активности (нижняя панель)

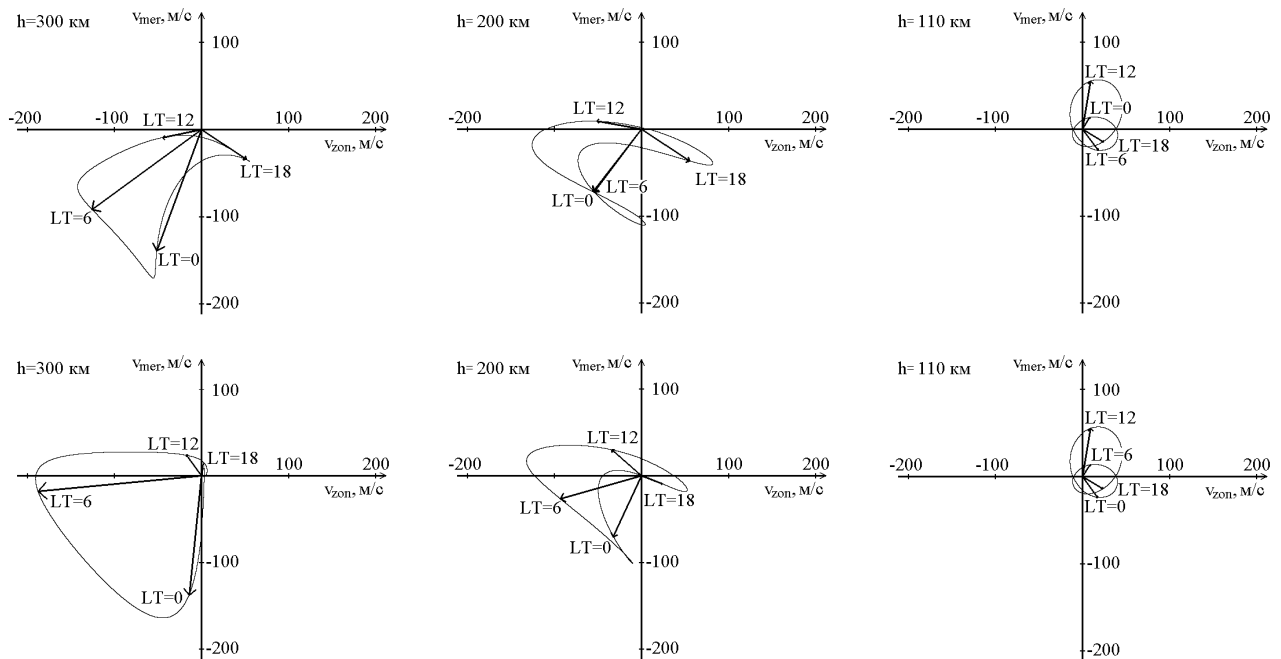


Рис. 2 – Суточные вариации величины и направления горизонтального ветра в период летнего солнцестояния на высотах 300, 200 и 110 км (слева направо) при низкой ($F_{10.7} = 72$) (верхняя панель) и высокой ($F_{10.7} = 200$) солнечной активности (нижняя панель)

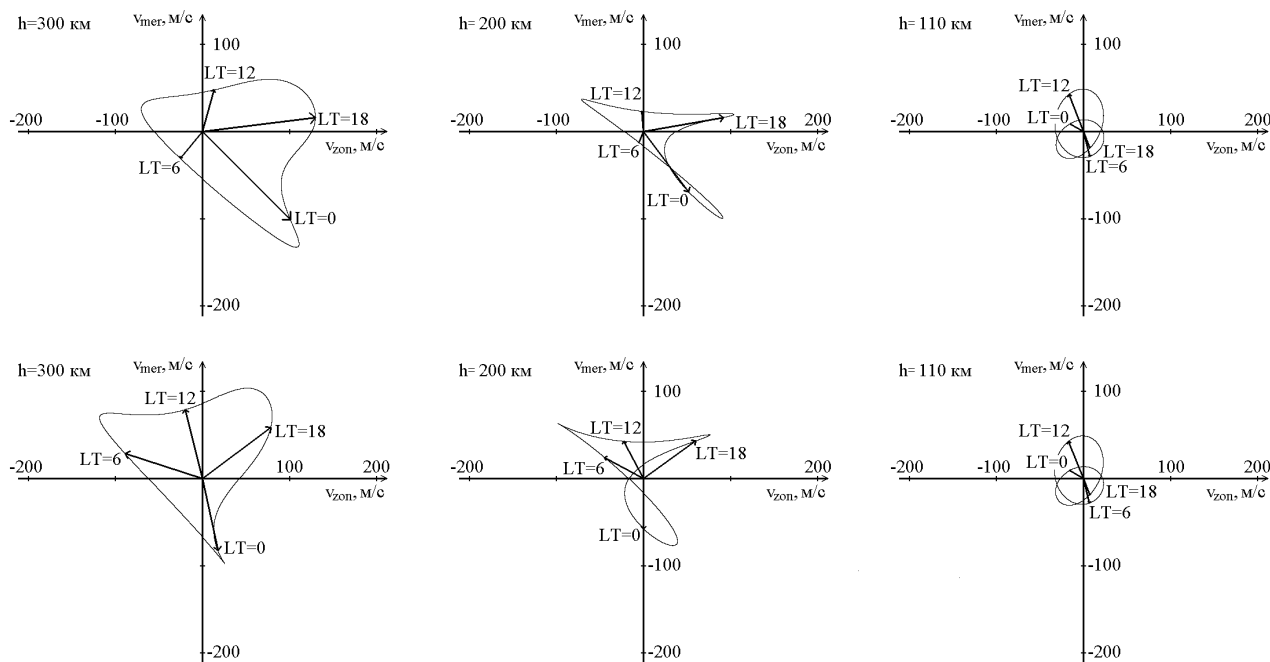


Рис. 3 – Суточные вариации величины и направления горизонтального ветра в период зимнего солнцестояния на высотах 300, 200 и 110 км (слева направо) при низкой ($F_{10.7} = 72$) (верхняя панель) и высокой ($F_{10.7} = 200$) солнечной активности (нижняя панель)

Заключение. Сравнивая полученные результаты, можно сделать несколько основных выводов. Во-первых, на высоте 110 км наглядно просматривается наличие полусуточной периодичности в направлении горизонтального ветра. Во-вторых, абсолютное значение скорости ветра растет с увеличением высоты. При этом происходит постепенная трансформация от преобладания полусуточной периодичности к суточной. Характер этой трансформации различен для разных сезонов и уровней солнечной активности. Уже на высоте 300 км полностью преобладает суточная периодичность. В-третьих, согласно модели, вариации скорости на высоте 110 км для каждого сезона практически не зависят от солнечной активности. Наконец, в-четвертых, следует обратить внимание, что только в одном случае, на высоте 300 км в течение всех суток, включая день, отсутствует ветер, направленный на север. Это имеет место летом в минимуме солнечной активности.

Приведенные расчеты в большой степени будут способствовать пониманию и интерпретации результатов измерений вертикальной скорости плазмы радаром некогерентного рассеяния в Харькове.

Список литературы: 1. Ratcliff J.A. An introduction to the ionosphere and magnetosphere Cambridge At the University Press, 1972. 2. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы, Гидрометеиздат, Ленинград, 1980. 3. Брунелли

Б.Е., Намгалдзе А.А. Физика ионосферы. Наука, Москва, 1988. 4. Hedin A. E. et al. Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere, J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 58, P. 1421-1447 – 1996. 5. Drob D.P., et al. An empirical model of the Earth’s horizontal wind fields: HWM07 // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – A12304, doi:10.1029/2008JA013668 – 18 p. 6. Hedin A.E., et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 1. N_2 density and temperature // J. Geoph. Res. – 1977. – Vol. 82, No 16. – P. 2139-2147. 7. Hedin A.E., et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 2. Composition // J. Geoph. Res. – 1977. – Vol. 82, No 16. – P. 2148-2156. 8. Hedin A.E. A revised thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data: MSIS-83 // J. Geoph. Res. – 1983. – Vol. 88, No A12. – P. 10170-10188. 9. Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geoph. Res. – 1987. – Vol. 92, No A5. – P. 4649-4662. 10. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96, No A2. Pages 1159-1172.

Bibliography (transliterated): 1. Ratcliff J.A. An introduction to the ionosphere and magnetosphere Cambridge At the University Press, 1972. 2. Ivanov-Kholodny G.S., Mikhailov A.V. Forecasting the state of the ionosphere, Gidrometeoizdat, Leningrad, 1980. 3. Brunelli B.Ye., Namgaladze A.A. Ionospheric physics. Nauka, Moscow, 1988. 4. Hedin A.E. et al. Empirical Wind Model for the Upper, Middle and Lower Atmosphere, J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 58, P. 1421-1447 – 1996. 5. Drob D.P., et al. An empirical model of the Earth’s horizontal wind fields: HWM07 // J. Geophys. Res. – 2008. – Vol. 113. – A12304, doi:10.1029/2008JA013668 – 18 p. 6. Hedin A.E. et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 1. N_2 density and temperature // J. Geoph. Res. – 1977. – Vol. 82, No 16. – P. 2139-2147. 7. Hedin A.E., et al. A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS. 2. Composition // J. Geoph. Res. – 1977. – Vol. 82, No 16. – P. 2148-2156. 8. Hedin A.E. A revised thermospheric model based on

mass spectrometer and incoherent scatter data: MSIS-83 // J. Geophys. Res. – 1983. – Vol. 88, No A12. – P. 10170-10188. 9. Hedin A.E. MSIS-86 thermospheric model // J. Geophys. Res. – 1987. – Vol. 92, No A5. – P. 4649-4662. 10. Hedin A.E. Extension of the MSIS Thermospheric

Model into the Middle and Lower Atmosphere // J. Geophys. Res. 1991. Vol. 96, No A2. Pages 1159-1172.

Поступила (received) 10.08.2015

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 – доцент Національного технічного університету «ХПИ», м. Харків, тел.: (050) 698-53-23; e-mail: dzyubanov@gmail.com.

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

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

УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, А. В. СИЛАДИ**РЕГИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ CERIM ION ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ: РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ**

Для разработки модельного блока региональной модели ионосферы CERIM ION, предназначенного для расчета температуры электронов и ионов, выполнен анализ экспериментальных данных харьковского радара некогерентного рассеяния в период с 1997 по 2013 гг. На основе экспериментальных данных построены регрессионные зависимости температуры электронов T_e и ионов T_i от индекса солнечной активности $F_{10.7}$ для местного полдня и полуночи на высотах 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 и 750 км. Выполнен анализ полученных зависимостей. Приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных высотных зависимостей температуры электронов и ионов с высотными зависимостями, рассчитанными по региональной модели ионосферы CERIM ION и глобальной модели ионосферы IRI-2007 для характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний для фазы минимума 23-го цикла солнечной активности.

Ключевые слова: региональная модель ионосферы, температура электронов и ионов, индекс солнечной активности

Введение. Моделирование вариаций параметров ионосферы в различных гелиогеофизических условиях является одной из актуальных задач современной геофизики. В настоящее время на практике довольно широко используют ряд современных глобальных моделей ионосферы и атмосферы [1 – 8]. Модельные расчеты используются для прогноза состояния околоземного космического пространства, моделирования каналов распространения радиоволн и других целей специального назначения. Глобальные модели ионосферы строятся на основе большого объема экспериментальных данных, полученных как наземными, так спутниковыми средствами дистанционного зондирования геокосмического пространства. Однако, наряду с преимуществами использования таких моделей, имеются и серьезные недостатки. Как показывает практика, современные глобальные модели ионосферы не всегда корректно отражают пространственно-временное распределение параметров среды в конкретном регионе при соответствующей гелиогеофизической обстановке. Этот факт обусловлен тем, что для построения глобальных моделей (так сложилось исторически) использовались экспериментальные данные, полученные в большем объеме в западном полушарии. Как известно, ионосфера Земли не является сферически симметричной, вследствие несовпадения положения географических и геомагнитных полюсов. По этой причине, использование экспериментальных данных, полученных в одном регионе для прогноза состояния ионосферной плазмы другого региона в сходных гелиогеофизических условиях не всегда корректно [9 – 13]. Выходом из данной ситуации может быть построение локальных (региональных) моделей ионосферы. Региональная модель, имея самостоятельную ценность при решении прикладных задач моделирования состояния околоземного космического пространства и условий распространения радиоволн, также может быть использована для верификации и коррекции результатов расчетов по глобальным моделям ионосферы. В настоящее время, на базе экспериментальных данных сети радаров

некогерентного рассеяния разработаны и успешно используются такие региональные модели ионосферной плазмы [2, 14, 15].

Ранее в Институте ионосферы разработана региональная модель ионосферы по данным харьковского радара некогерентного рассеяния [16 – 18]. С помощью разработанной региональной модели можно рассчитать количественные характеристики суточных и сезонных вариаций основных параметров геокосмоса и параметров динамических и тепловых процессов в ионосфере. Эмпирическая часть модели основана на экспериментальных данных, полученных на радаре НР в Харькове в период с 1997 по 2013 гг. Теоретическая часть модели для расчёта параметров среды, динамических и тепловых процессов включает в себя известные теоретические соотношения. Параметры нейтральной атмосферы задаются из термосферной эмпирической модели NRLMSISE-00 [3]. Результатами теоретического моделирования являются значения плотности полного потока частиц и потока частиц за счёт амбиоплярной диффузии; величины скоростей эквивалентного нейтрального ветра и меридиональной составляющей нейтрального ветра; плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу; величина энергии, подводимой к электронному газу. Также рассчитываются значения продольной составляющей тензоров амбиоплярной диффузии и теплопроводности электронного газа, частоты соударений заряженных и нейтральных частиц.

Результаты моделирования параметров ионосферной плазмы представлены в табличном виде. Каждая из таблиц представляет собой суточные вариации параметров ионосферы на фиксированных высотах для четырёх характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний. Зависимость параметров ионосферы от солнечной активности определяется фазами цикла SA – минимум, максимум, спад и рост SA.

Целью работы является построение и анализ регрессионных зависимостей температуры электронов

© М. В. Ляшенко, А. В. Силади, 2015

и ионов в ионосфере по данным харьковского радара некогерентного рассеяния от индекса солнечной активности.

Средства и методы. Для решения поставленной задачи использованы экспериментальные данные о температурах электронов и ионов, полученные на харьковском радаре некогерентного рассеяния в 1997 – 2013 гг.

Для выявления зависимости температуры электронов и ионов применялся метод регрессионного анализа.

Постановка задачи. Для построения регрессионных зависимостей температуры электронов T_e и ионов T_i в ионосферной плазме от индекса солнечной активности $F_{10.7}$ использованы экспериментальные данные, полученные в спокойных гелиогеофизических условиях (индекс геомагнитной активности для рассмотренных периодов $K_p \leq 3$) в диапазоне высот 200 – 750 км (шаг по высоте 50 км).

Для анализа были взяты экспериментальные

данные для четырех характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний в полуденные и полуночные часы.

Регрессионные зависимости температуры электронов и ионов от индекса солнечной активности имеют вид

$$T_e(F_{10.7}) = a_0 + a_1 \cdot F_{10.7},$$

$$T_i(F_{10.7}) = b_0 + b_1 \cdot F_{10.7}.$$

На рис. 1 – 4 представлены примеры регрессионных зависимостей T_e и T_i от индекса $F_{10.7}$, полученные для периода летнего солнцестояния для 00 и 12 EEST. Аналогичные графики строились для периодов зимнего солнцестояния, весеннего и осеннего равноденствий. Полученные коэффициенты регрессий заносились в сводные таблицы 1 – 4.

Таблица 1 – Выборка коэффициентов регрессий для периода весеннего равноденствия

z, км	T_e				T_i			
	00 EET		12 EET		00 EET		12 EET	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	461,72	1,55	–	–	457,70	1,59	492,19	3,13
250	303,05	3,58	–	–	316,49	3,41	592,67	3,32
300	463,89	2,83	–	–	427,70	3,06	698,82	3,11
350	669,62	1,79	–	–	564,44	2,48	842,47	2,58
400	829,66	1,18	–	–	657,48	2,23	959,77	2,14
450	–	–	–	–	740,50	1,93	1083,93	1,63
500	–	–	–	–	797,23	1,74	1206,92	1,19
550	–	–	–	–	819,52	1,78	1310,46	0,98
600	–	–	2354,53	1,05	707,23	3,20	1208,56	3,10
650	–	–	2433,57	0,71	670,54	3,67	1176,46	4,31
700	–	–	2348,16	1,30	693,79	3,20	–	–
750	–	–	2383,18	1,31	659,28	3,57	–	–

Таблица 2 – Выборка коэффициентов регрессий для периода летнего солнцестояния

z, км	T_e				T_i			
	00 EEST		12 EEST		00 EEST		12 EEST	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	454,31	1,94	1777,83	0,99	464,28	1,65	633,11	2,14
250	410,991	2,95	1778,71	2,32	442,01	2,37	765,31	2,00
300	530,991	2,65	1906,00	1,87	542,08	2,27	937,24	1,78
350	658,49	2,22	2083,57	1,19	636,24	2,10	1094,85	1,35
400	750,49	2,06	2207,85	0,96	685,13	2,26	1213,25	1,11
450	837,28	1,90	2284,43	1,08	704,20	2,58	1328,60	0,96
500	925,02	1,72	2336,53	1,30	708,42	2,95	1439,10	0,93
550	1014,05	1,51	2373,43	1,54	706,65	3,29	1525,71	1,14
600	1101,71	1,27	2388,81	1,89	696,46	3,62	1577,68	1,63
650	1182,81	1,06	2385,48	2,33	678,87	3,95	1594,22	2,31
700	1238,70	1,36	2338,50	2,73	740,52	3,84	1490,85	3,21
750	1279,19	1,37	2310,26	3,20	749,00	3,93	1412,59	4,23

Таблица 3 – Выборка коэффициентов регрессий для периода осеннего равноденствия

z, км	T_e				T_i			
	00 EEST		12 EEST		00 EEST		12 EEST	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	368,57	2,45	1668,72	0,13	367,87	2,45	603,18	1,98
250	422,40	2,47	1751,43	0,65	449,89	2,09	706,99	2,42
300	536,91	2,35	1911,30	0,26	548,28	2,05	846,49	2,25
350	675,10	1,96	–	–	648,19	1,90	964,25	1,85
400	820,30	1,49	–	–	748,68	1,54	1059,08	1,44
450	939,96	1,21	–	–	810,87	1,49	1143,14	1,28
500	1059,17	0,93	–	–	831,74	1,80	1217,39	1,48
550	–	–	2248,54	2,83	793,82	2,64	1344,51	1,33
600	1127,88	2,81	2385,76	2,31	773,21	3,21	1221,18	4,27
650	1117,93	3,17	2481,26	0,22	774,89	3,48	1264,37	4,40
700	–	–	–	–	–	–	–	–
750	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 4 – Выборка коэффициентов регрессий для периода зимнего солнцестояния

z, км	T_e				T_i			
	00 EET		12 EET		00 EET		12 EET	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	492,13	0,74	–	–	490,98	0,74	661,46	1,11
250	468,08	1,39	–	–	465,40	1,42	767,61	1,72
300	524,89	1,57	1958,74	0,71	491,12	1,80	832,54	2,08
350	649,28	1,26	2008,47	2,06	542,95	2,02	938,09	1,70
400	757,65	1,05	2001,10	3,48	563,12	2,43	1005,52	1,46
450	825,13	1,22	1969,61	4,68	555,01	2,97	1055,68	1,48
500	863,78	1,68	–	–	542,97	3,43	1092,51	1,81
550	872,38	2,41	–	–	533,89	3,75	1093,17	2,58
600	915,28	2,83	–	–	563,92	3,73	1063,10	3,64
650	948,73	3,29	–	–	605,04	3,62	–	–
700	911,95	4,02	2154,99	3,88	560,01	4,48	–	–
750	–	–	2114,37	4,20	586,79	4,51	–	–

Как показал регрессионный анализ, для некоторых высот невозможно получить соответствующие коэффициенты регрессий. Этот факт связан с тем, что экспериментальные данные неравномерно распределены по уровню солнечной активности. Подобная ситуация имела место при построении регрессионных зависимостей концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы N_m от индекса $F_{10.7}$ [19, 20]. Получено, что наибольшее количество данных имеется для фаз минимума и максимума солнечной активности, наименьшее – для фазы спада и роста. Продолжительность фазы минимума и максимума солнечной активности в среднем примерно 3 – 3,5 года, тогда как продолжительность фазы роста и спада активности Солнца – примерно 2 – 2,5 года. Такая же ситуация обстоит и с экстремальными значениями $F_{10.7} > 250$.

Далее, используя полученные коэффициенты регрессий, восстанавливались высотные профили температуры электронов и ионов для трех уровней солнечной активности: низкой ($F_{10.7} = 70$), средней ($F_{10.7} = 120$) и высокой ($F_{10.7} = 190$). Результаты восстановления высотного хода температуры электронов и ионов представлены на рис. 5 – 8. Для высотных зависимостей также были получены соответствующие коэффициенты регрессий для трех уровней солнечной активности, полдня и полуночи и характерных геофизических периодов – весна, осень, зима, лето (см. табл. 5).

Полученные коэффициенты регрессий далее использовались для восполнения “пробелов” в табл. 1 – 4 на высотах, для которых не удалось построить регрессионную зависимость T_e и T_i от индекса $F_{10.7}$.

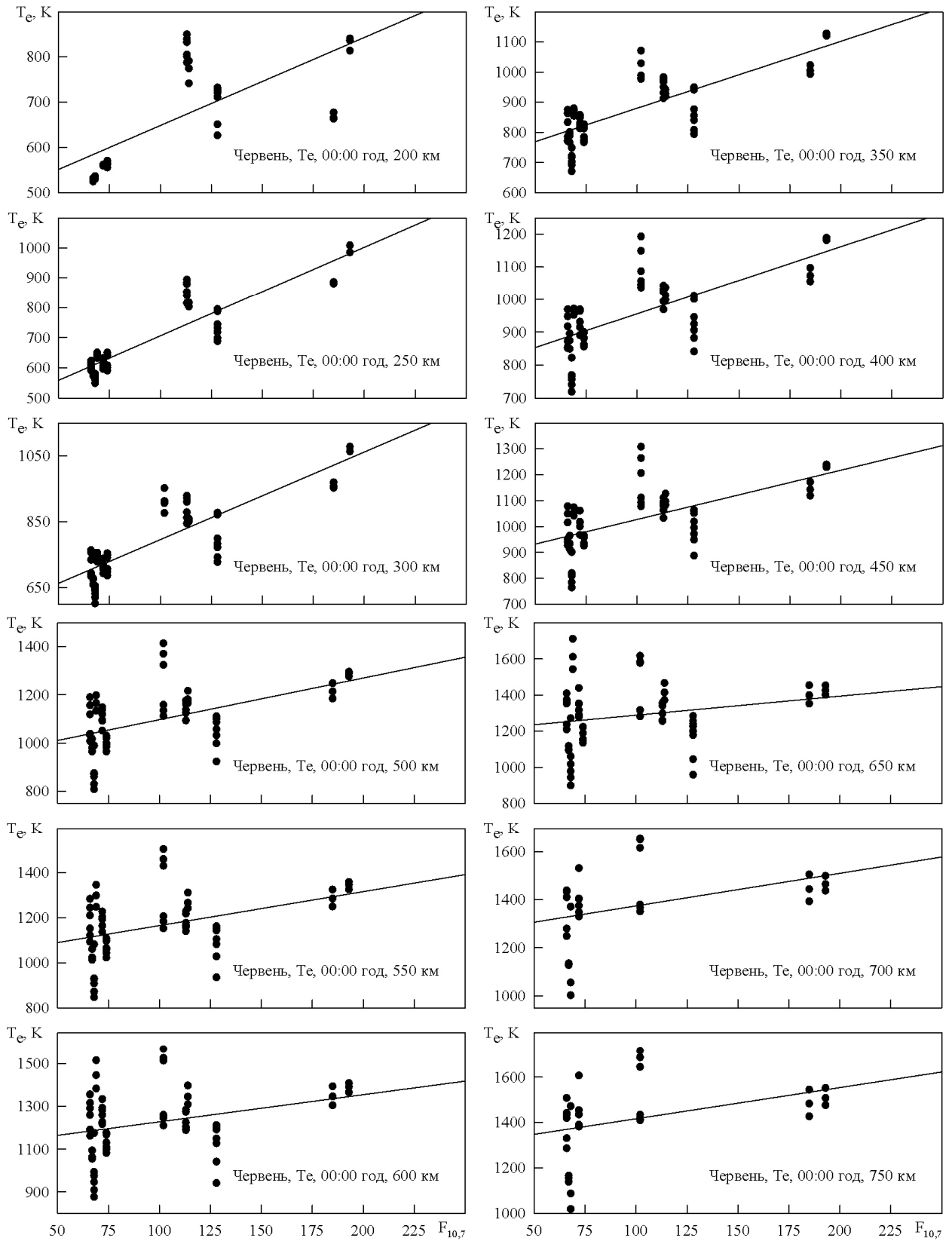


Рис. 1 – Регрессионные зависимости температуры электронов от индекса солнечной активности для летнего солнцестояния для 00 EEST

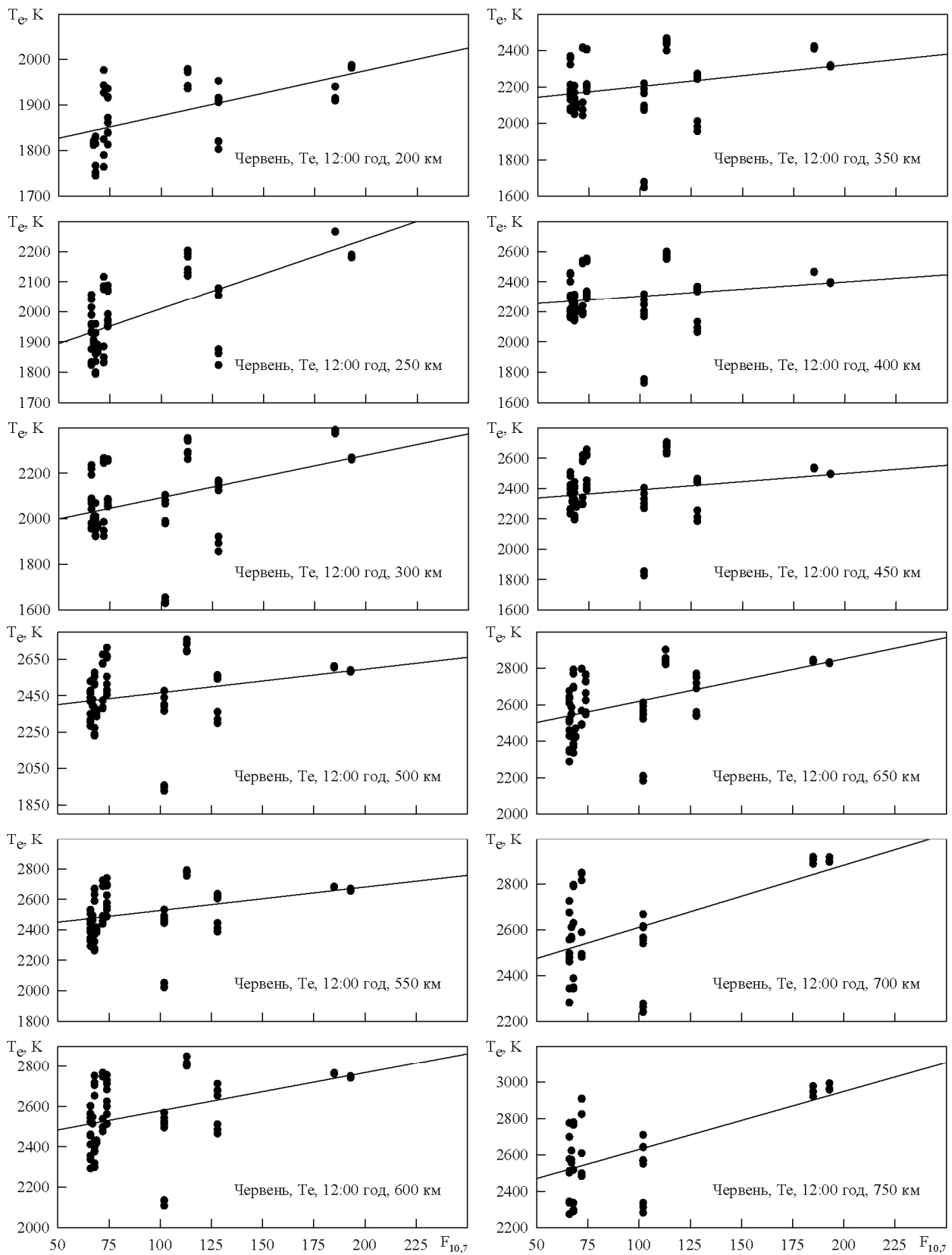


Рис. 2 – Регрессионные зависимости температуры электронов от индекса солнечной активности для летнего солнцестояния для 12 EEST

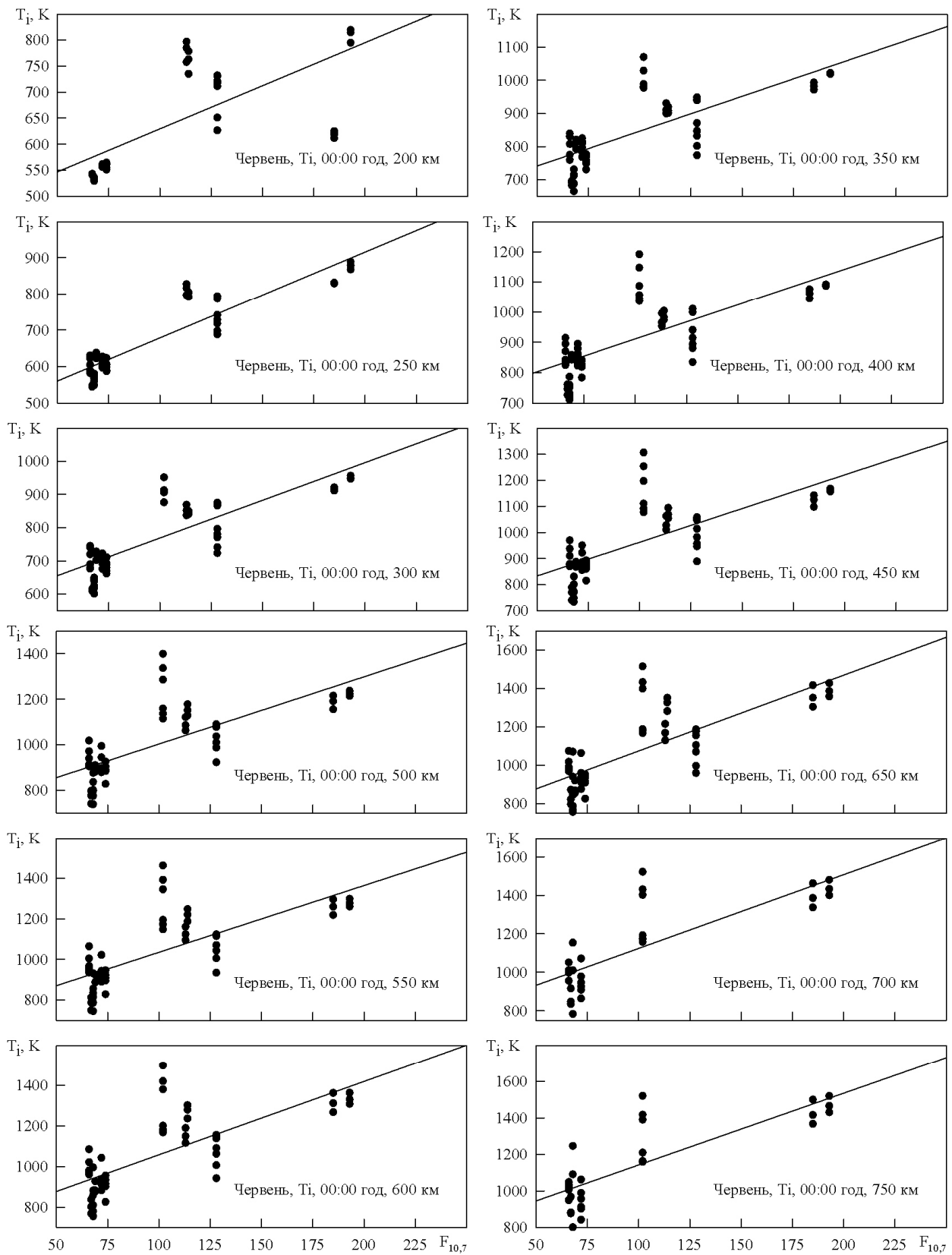


Рис. 3 – Регрессионные зависимости температуры ионов от индекса солнечной активности для летнего солнцестояния для 00 EEST

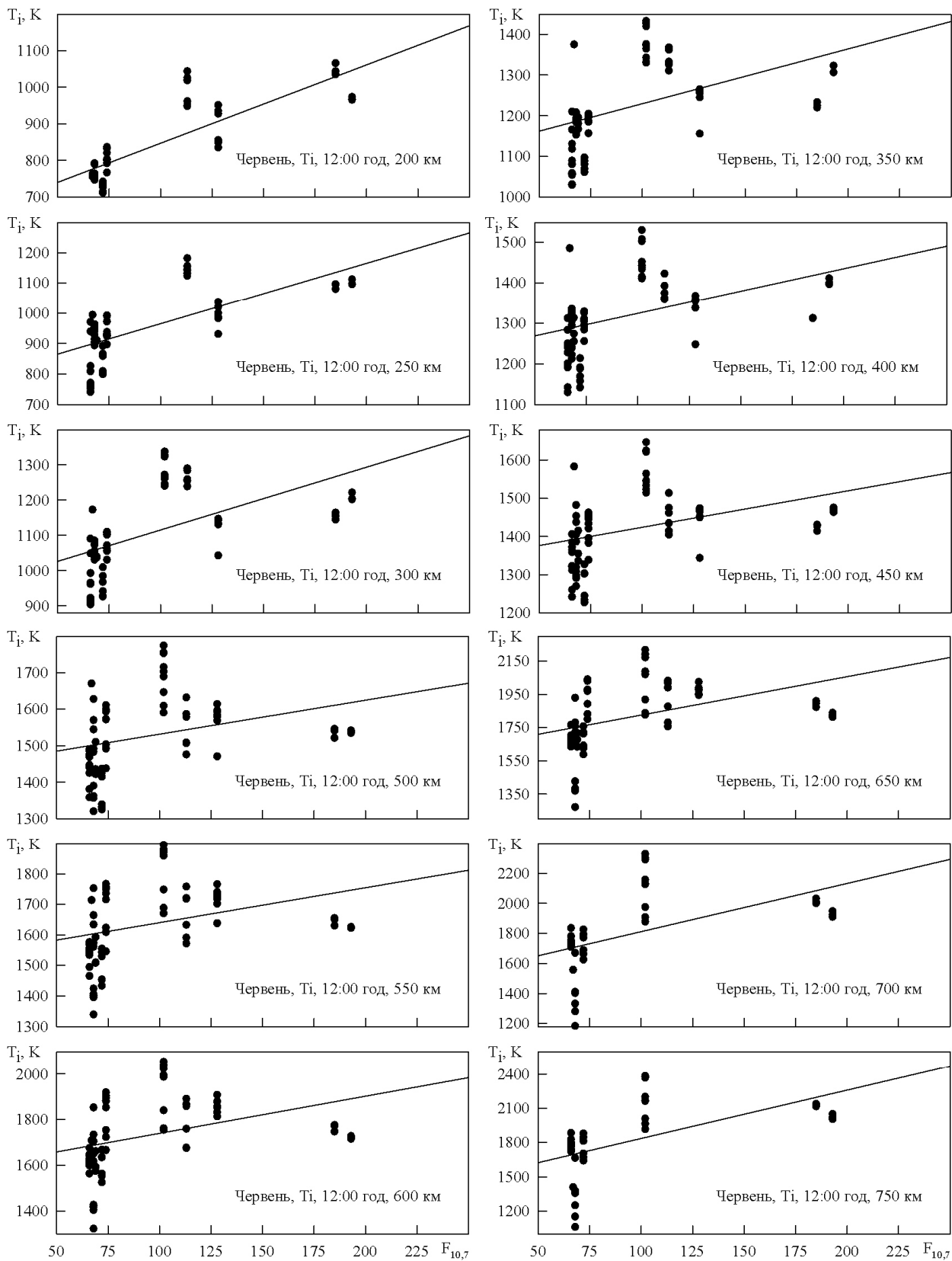


Рис. 4 – Регрессионные зависимости температуры ионов от индекса солнечной активности для летнего солнцестояния для 12 EEST

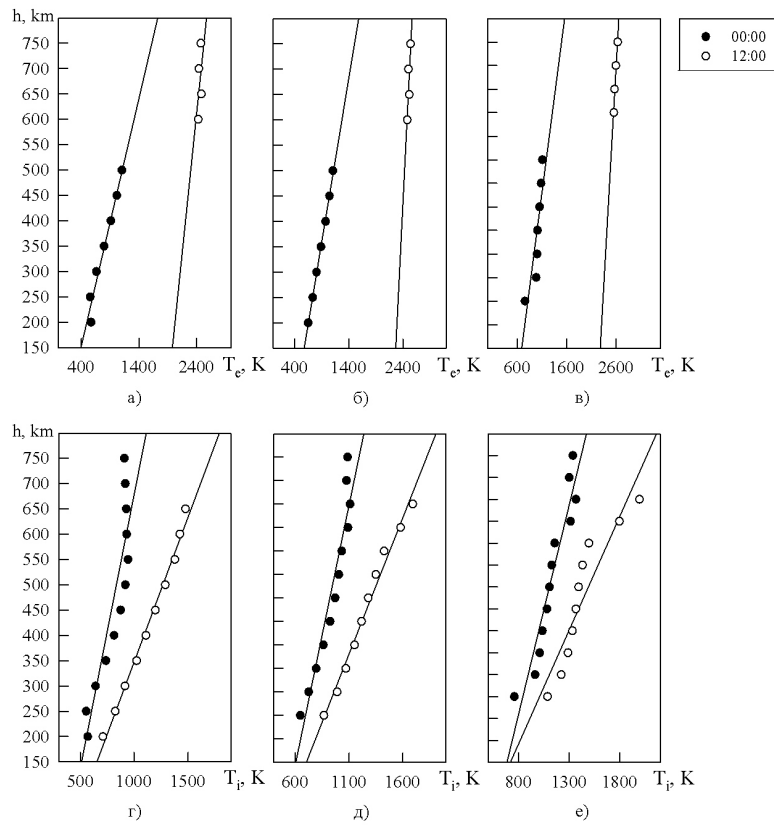


Рис. 5 – Высотные зависимости температуры электронов и ионов для периода весеннего равноденствия. Здесь и далее на рисунках: а, з) $F_{10.7} = 70$; б, д) $F_{10.7} = 120$; в, е) $F_{10.7} = 190$

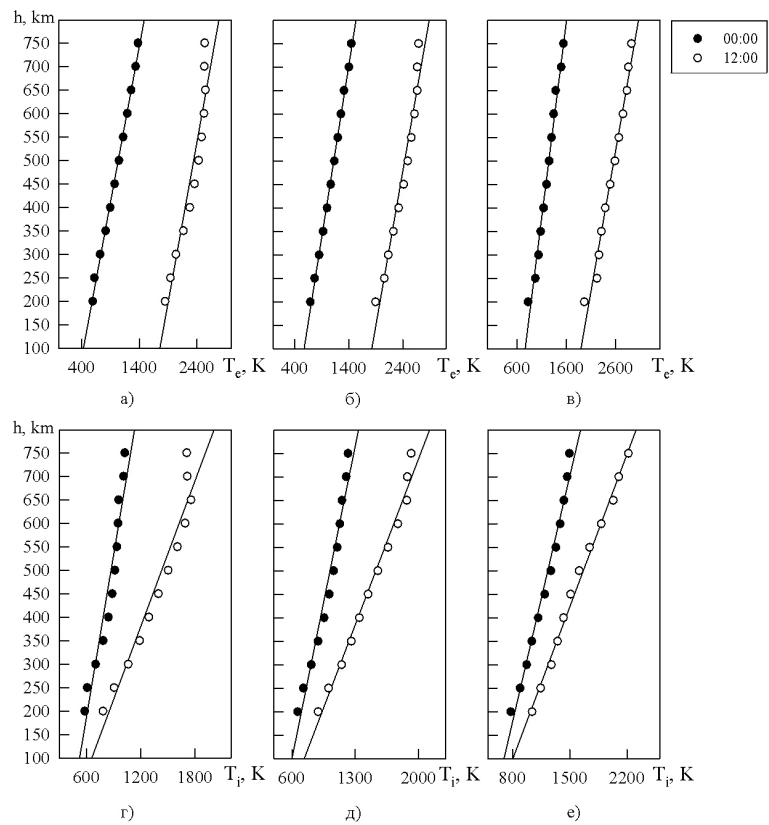


Рис. 6 – Высотные зависимости температуры электронов и ионов для периода летнего солнцестояния

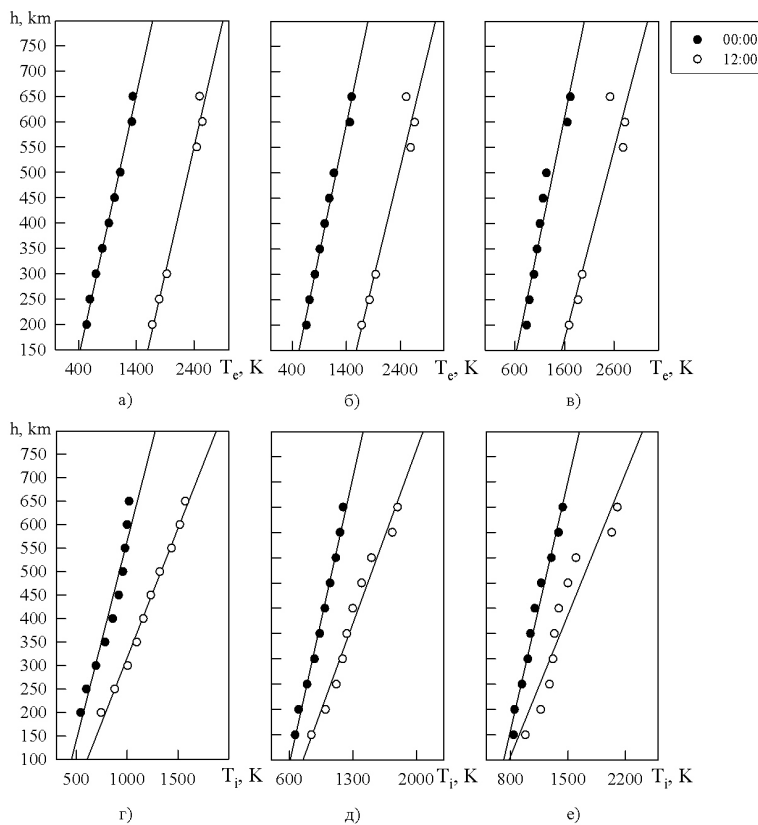


Рис. 7 – Высотные зависимости температуры электронов и ионов для периода осеннего равноденствия

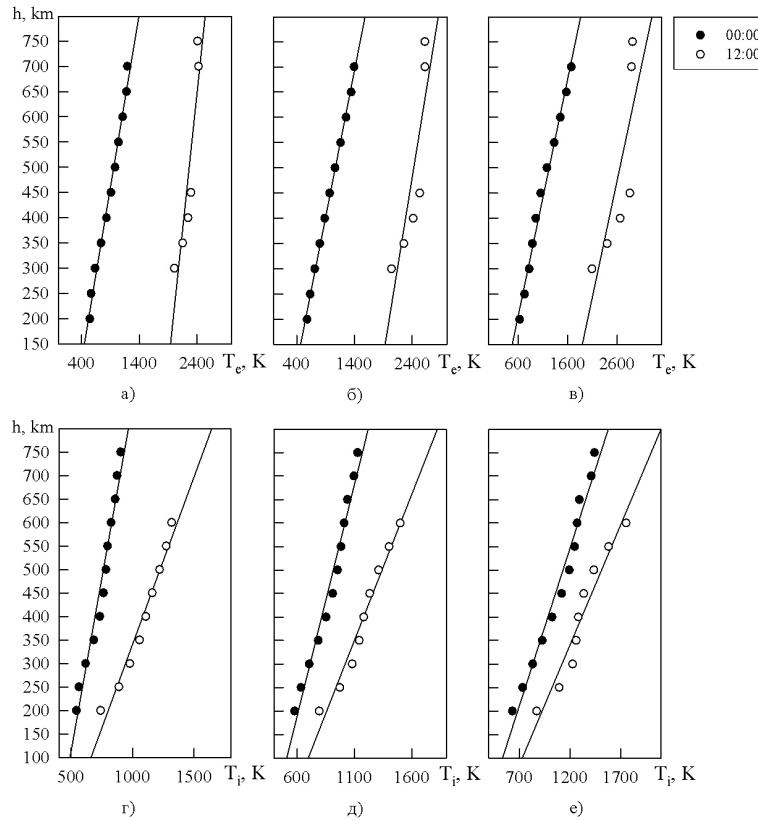


Рис. 8 – Высотные зависимости температуры электронов и ионов для периода зимнего солнцестояния

Таблица 5 – Регрессионные коэффициенты восстановленных высотных зависимостей температуры электронов и ионов

$F_{10,7}$	T_e				T_i			
	00 LT		12 LT		00 LT		12 LT	
	d_0	d_1	d_0	d_1	e_0	e_1	e_0	e_1
Весеннее равноденствие								
70	-107,88	0,52	-2029,62	1,10	-402,79	1,08	-223,45	0,57
120	-247,62	0,61	-4748,37	2,14	-569,18	1,11	-308,38	0,58
190	-289,79	0,56	-4120,61	1,85	-603,54	0,95	-323,39	0,52
Летнее солнцестояние								
70	-183,19	0,66	-1098,38	0,68	-502,99	1,15	-240,17	0,52
120	-315,66	0,73	-1100,66	0,66	-469,27	0,95	-271,52	0,50
190	-535,86	0,83	-1035,95	0,60	-420,19	0,75	-273,16	0,46
Осеннее равноденствие								
70	-71,03	0,52	-647,00	0,50	-279,46	0,85	-231,08	0,55
120	-116,38	0,51	-566,34	0,44	-338,47	0,81	-216,61	0,49
190	-149,58	0,47	-439,91	0,36	-351,63	0,70	-160,48	0,40
Зимнее солнцестояние								
70	-158,62	0,69	-1945,33	1,08	-623,12	1,47	-371,39	0,71
120	-121,22	0,58	-1213,39	0,71	-404,25	0,99	-334,75	0,62
190	-74,94	0,47	-725,37	0,46	-259,75	0,67	-273,41	0,51

В табл. 6 – 9 приведены скорректированные коэффициенты регрессий для расчета T_e и T_i в зависимости от индекса солнечной активности $F_{10,7}$ для полуночи и полудня, четырех характерных геофизических периодов в высотном диапазоне 200 – 750 км.

Результаты сравнительного анализа. Используя полученные модельные зависимости, выполнено сравнение результатов расчетов температуры электронов и ионов по региональной модели CERIM ION, глобальной международной справочной модели ионосферы IRI-2007 [4] и экспериментальными данными радара некогерентного

рассеяния в Харькове. Для расчетов были выбраны следующие даты: 2 марта 2007 г., 20 июня 2007 г., 25 сентября 2007 г. и 20 декабря 2007 г., что соответствует фазе минимума 23-го цикла солнечной активности. Выбранные периоды характеризовались спокойной гелиогеофизической обстановкой. Индекс геомагнитной активности A_p не превышал 12 единиц, K_p -индекс варьировался в пределах 0 – 3. Поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см менялся в пределах $(66 – 73) \cdot 10^{-22}$ Вт·м⁻²·Гц⁻¹.

На рис. 9 – 10 приведены экспериментальные высотные профили T_e и T_i и результаты расчетов по моделям CERIM ION и IRI-2007.

Таблица 6 – Коэффициенты регрессий для расчета температуры T_e и T_i от индекса $F_{10,7}$ для весеннего равноденствия

z , км	T_e				T_i			
	00 ЕЕТ		12 ЕЕТ		00 ЕЕТ		12 ЕЕТ	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	440,64	2,29	1908,57	2,43	400,28	2,35	596,42	2,20
250	535,66	2,25	1958,18	2,29	441,32	2,41	676,60	2,28
300	630,68	2,20	2007,79	2,15	482,36	2,46	756,78	2,36
350	725,71	2,15	2057,40	2,00	523,40	2,52	836,96	2,43
400	820,73	2,10	2107,01	1,86	564,43	2,57	917,14	2,51
450	915,75	2,05	2156,62	1,72	605,47	2,63	997,31	2,59
500	1010,78	2,00	2206,23	1,58	646,51	2,68	1077,49	2,67
550	1105,80	1,95	2255,84	1,44	687,55	2,74	1157,67	2,74
600	1200,83	1,90	2305,45	1,30	728,59	2,79	1237,85	2,82
650	1295,85	1,85	2355,05	1,16	769,63	2,84	1318,02	2,90
700	1390,87	1,81	2404,66	1,02	810,66	2,90	1398,20	2,98
750	1485,90	1,76	2454,27	0,88	851,70	2,95	1478,38	3,05

Таблица 7 – Коэффициенты регрессий для расчета температуры T_e и T_i от индекса $F_{10.7}$ для летнего солнцестояния

z, км	T_e				T_i			
	00 EEST		12 EEST		00 EEST		12 EEST	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	401,59	2,54	1814,05	1,31	483,98	1,82	759,66	1,39
250	485,91	2,41	1880,76	1,40	513,46	2,02	849,00	1,48
300	570,22	2,28	1947,47	1,48	542,95	2,22	938,34	1,57
350	654,54	2,16	2014,18	1,57	572,44	2,41	1027,69	1,67
400	738,86	2,03	2080,89	1,65	601,92	2,61	1117,03	1,76
450	823,18	1,90	2147,60	1,74	631,41	2,80	1206,37	1,85
500	907,49	1,77	2214,30	1,82	660,90	3,00	1295,71	1,95
550	991,81	1,64	2281,01	1,91	690,39	3,20	1385,06	2,04
600	1076,13	1,51	2347,72	2,00	719,87	3,39	1474,40	2,13
650	1160,45	1,38	2414,43	2,08	749,36	3,59	1563,74	2,23
700	1244,76	1,26	2481,14	2,17	778,85	3,78	1653,08	2,32
750	1329,08	1,13	2547,85	2,25	808,33	3,98	1742,43	2,41

Таблица 8 – Коэффициенты регрессий для расчета температуры T_e и T_i от индекса $F_{10.7}$ для осеннего равноденствия

z, км	T_e				T_i			
	00 EEST		12 EEST		00 EEST		12 EEST	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	403,10	1,77	1662,84	0,53	444,46	1,81	723,64	0,97
250	493,63	1,85	1739,89	0,84	495,64	1,91	793,29	1,26
300	584,17	1,93	1816,94	1,16	546,81	2,01	862,94	1,55
350	674,70	2,00	1893,99	1,47	597,98	2,11	932,59	1,84
400	765,24	2,08	1971,04	1,79	649,16	2,21	1002,24	2,13
450	855,77	2,15	2048,09	2,10	700,33	2,32	1071,88	2,41
500	946,31	2,23	2125,14	2,41	751,50	2,42	1141,53	2,70
550	1036,84	2,30	2202,19	2,73	802,68	2,52	1211,18	2,99
600	1127,38	2,38	2279,24	3,04	853,85	2,62	1280,83	3,28
650	1217,91	2,46	2356,29	3,36	905,02	2,72	1350,47	3,57
700	1308,45	2,53	2433,34	3,67	956,20	2,83	1420,12	3,86
750	1398,99	2,61	2510,39	3,99	1007,37	2,93	1489,77	4,15

Таблица 9 – Коэффициенты регрессий для расчета температуры T_e и T_i от индекса $F_{10.7}$ для зимнего солнцестояния

z, км	T_e				T_i			
	00 EET		12 EET		00 EET		12 EET	
	a_0	a_1	a_0	a_1	b_0	b_1	b_0	b_1
200	485,39	0,54	1979,03	0,15	485,59	1,05	731,80	1,03
250	537,94	0,82	1988,54	0,66	495,80	1,39	785,23	1,26
300	590,48	1,10	1998,06	1,18	506,02	1,73	838,66	1,49
350	643,03	1,38	2007,58	1,70	516,23	2,06	892,09	1,72
400	695,57	1,67	2017,10	2,22	526,45	2,40	945,52	1,95
450	748,12	1,95	2026,62	2,74	536,66	2,74	998,95	2,19
500	800,66	2,23	2036,13	3,25	546,87	3,08	1052,38	2,42
550	853,21	2,52	2045,65	3,77	557,09	3,42	1105,81	2,65
600	905,75	2,80	2055,17	4,29	567,30	3,75	1159,24	2,88
650	958,30	3,08	2064,69	4,81	577,51	4,09	1212,67	3,11
700	1010,84	3,37	2074,21	5,33	587,73	4,43	1266,10	3,34
750	1063,39	3,65	2083,72	5,84	597,94	4,77	1319,53	3,58

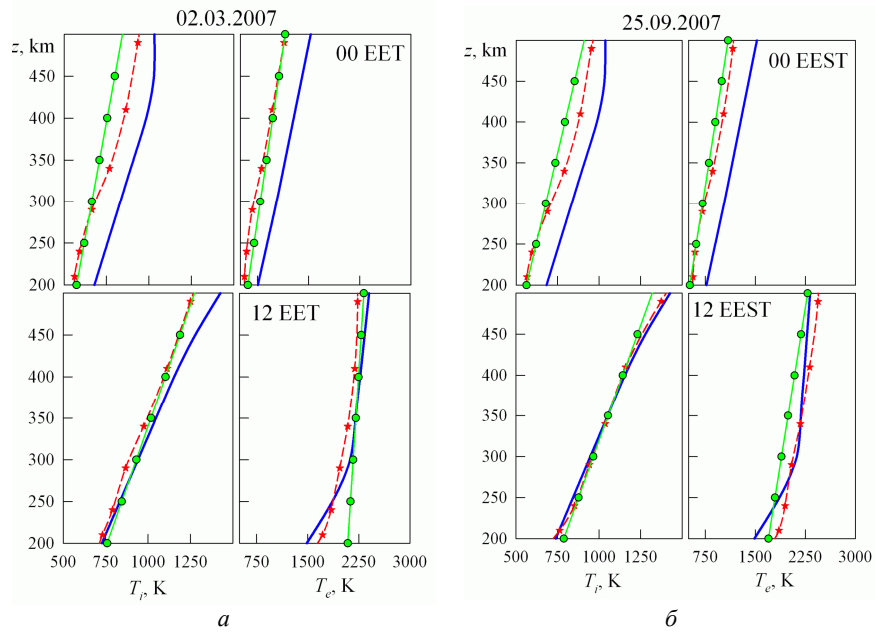


Рис. 9 – Высотные профили температуры электронов и ионов для периодов весеннего (а) и осеннего (б) равноденствий. Здесь и далее на графиках обозначены кривые: звездочки – экспериментальные данные; кружки – расчет по модели CERIM ION; сплошная – расчет по модели IRI-2007

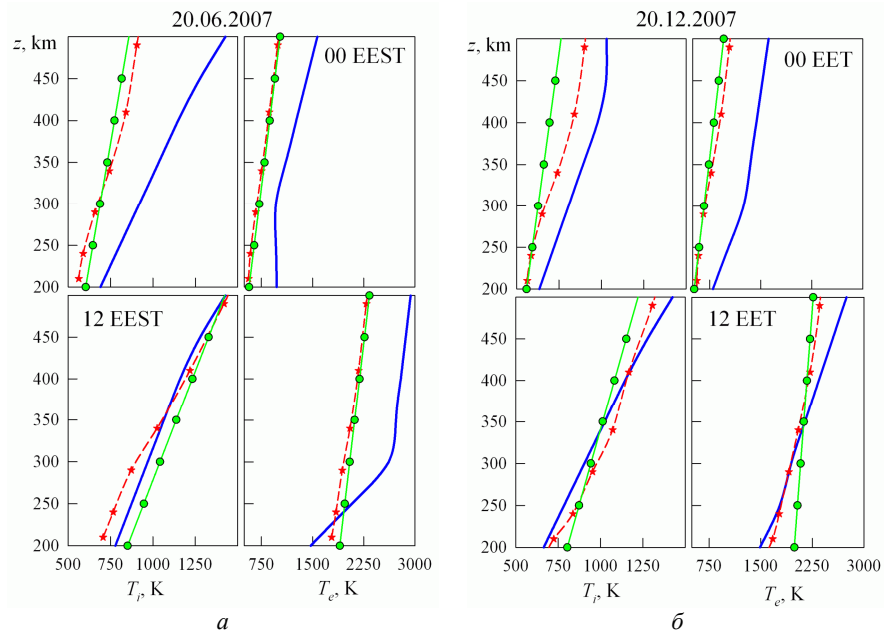


Рис. 10 – Высотные профили температуры электронов и ионов для периодов летнего (а) и зимнего (б) солнцестояний

Как видно из рис. 9а, для периода, близкого к весеннему равноденствию, значения температуры ионов, рассчитанные по модели CERIM ION, хорошо согласуются с экспериментальными данными в околополуденные часы, тогда как в 00 EET расчет и экспериментальные данные имеют близкие значения только в диапазоне высот 200 – 300 км. Выше 300 км имеет место занижение модельных данных по сравнению с экспериментом. Как видно из рисунка, глобальная модель IRI для 00 EET завышает значения T_i как по сравнению с экспериментом, так и расчетами

по модели CERIM ION. В околополуденные часы расчеты T_i по модели IRI хорошо согласуются с экспериментом и расчетами по модели CERIM ION в диапазоне высот 200 – 350 км. Для температуры электронов в околополуденные часы имеет место хорошее согласие между экспериментом и моделью CERIM ION, тогда как значения T_e , рассчитанные по модели IRI, превышают экспериментальные во всем рассматриваемом диапазоне высот. Для полуденных значений T_e в диапазоне высот 300 – 500 км наблюдается неплохое соответствие между

экспериментальными данными и расчетами по моделям CERIM ПОН и IRI-2007.

Для периода осеннего равноденствия (рис. 9б) получено, что хорошее согласие между рассчитанными и экспериментальными значениями температуры ионов наблюдается в околополуденные часы. Для ночных условий, как и для весеннего периода, расчеты по модели CERIM ПОН неплохо согласуются с экспериментом в диапазоне высот 200 – 300 км. С ростом высоты расчеты по региональной модели занижены по сравнению с экспериментальными значениями T_i . Модель IRI во всем рассматриваемом диапазоне высот дает завышенные значения температуры ионов по сравнению, как с экспериментом, так и расчетами по модели CERIM ПОН. Для температуры электронов наблюдается схожая ситуация. Для 00 EEST расчеты по региональной модели хорошо согласуются с экспериментом, тогда как расчеты по глобальной модели IRI-2007 завышены во всем рассматриваемом высотном диапазоне. Для полуденных значений T_e имеет место следующая ситуация. Экспериментальные значения температуры электронов и расчеты по модели IRI близки в диапазоне высот 300 – 400 км. На высотах выше и ниже данного диапазона значения T_e , рассчитанные по глобальной модели ионосферы меньше значений T_e , полученных в ходе эксперимента на радаре НР. Расчеты T_e по модели CERIM ПОН практически во всем рассматриваемом высотном диапазоне занижены по сравнению с расчетами по модели IRI и экспериментом.

Для периода летнего солнцестояния (рис. 10а) сравнительный анализ показал, что расчеты T_e по региональной модели ионосферы CERIM ПОН как в дневных, так и ночных условиях хорошо согласуются с экспериментальными данными. Величина T_e , рассчитанная по модели IRI, во всем рассматриваемом диапазоне высот превышает значения температуры электронов, полученной экспериментально и с помощью модели CERIM ПОН. Значения температуры ионов для 00 EEST, рассчитанные по региональной модели, близки значениям T_i , полученных в ходе наблюдений на радаре некогерентного рассеяния. Модель IRI также существенно завышает значения T_i , по сравнению с региональной моделью и экспериментом. В дневных условиях в диапазоне высот 350 – 500 км расчеты по модели IRI близки к экспериментальным данным. На высотах ниже 350 км глобальная модель IRI завышает значения T_i по сравнению с экспериментальными значениями. Расчеты по региональной модели ионосферы CERIM ПОН показали, что практически во всем диапазоне высот имеет место завышение значений температуры ионов по сравнению с экспериментом и расчетами по глобальной модели ионосферы IRI-2007.

Для периода зимнего солнцестояния (рис. 10б) получены следующие результаты. В ходе сравнительного анализа получено, что в ночных

условиях как для T_e , так и T_i расчеты по модели IRI-2007 существенно завышают значения температуры электронов и ионов, полученных экспериментально и рассчитанных по региональной модели CERIM ПОН. Значения T_i по модели CERIM ПОН существенно превышают экспериментальные значения, начиная с высоты примерно 300 км. Сравнение температуры электронов, полученной по региональной модели и экспериментальным путем, показало хорошее соответствие между экспериментом и модельными расчетами.

В дневных условиях значения T_e , рассчитанные по модели CERIM ПОН близки экспериментальным только на высотах $z > 350$ км. Ниже 350 км модельные расчеты завышают значения T_e по сравнению с экспериментом. Расчеты по модели IRI показали хорошее согласие с экспериментальными данными в диапазоне высот 200 – 350 км. С ростом высоты имеет место завышение рассчитанных значений T_e по модели IRI-2007 по сравнению с экспериментальными результатами.

Обсуждение полученных результатов. Анализ экспериментальных данных, полученных на радаре некогерентного рассеяния в период с 1997 по 2013 гг., показал, что на основе имеющихся данных о температурах электронов и ионов, можно получить регрессионные зависимости температур заряженных частиц от уровня солнечной активности (индекса $F_{10.7}$). Полученные коэффициенты регрессии позволяют рассчитать температуру электронов и ионов в околополуденные и околополуночные часы для четырех характерных геофизических периодов (весна, осень, лето, зима) в широком диапазоне высот 200 – 750 км. Как показал регрессионный анализ экспериментальных данных, основной проблемой является недостаток данных, полученных на быстропротекающих фазах цикла солнечной активности (фазы роста и спада), а также в периоды очень высокой (экстремальной) активности Солнца. Решить данную проблему можно проведением дополнительных экспериментальных исследований для указанных сезонов и уровней солнечной активности.

Сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов расчета по региональной модели ионосферы CERIM ПОН и глобальной модели IRI-2007 показал, что разрабатываемая в Институте ионосферы региональная модель довольно корректно отражает высотно-временные вариации температуры электронов и ионов. Расчет значений температуры заряженных частиц по модели IRI-2007, в большинстве случаев, завышает значения T_e и T_i , полученных экспериментально и рассчитанных по модели CERIM ПОН.

Выводы. В ходе регрессионного и сравнительного анализа, выполненного в настоящей работе, получены следующие результаты.

1. Построены регрессионные зависимости температуры электронов и ионов от индекса солнечной активности для 00 и 12 часов, четырех

характерных геофизических периода (весеннее и осеннее равноденствия, летнее и зимнее солнцестояния) в диапазоне высот 200 – 750 км.

2. Получены соответствующие коэффициенты регрессий для расчета температуры электронов и ионов в рамках дальнейшего развития региональной модели ионосферы CERIM ION по данным харьковского радара некогерентного рассеяния.

3. Сравнительный анализ экспериментальных данных с расчетами по моделям CERIM ION и IRI-2007 показал, что значения температуры электронов и ионов по региональной модели ионосферы CERIM ION, по сравнению с глобальной моделью IRI-2007, в целом, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Модель CERIM ION корректно отражает высотный ход температуры электронов и ионов в дневных и ночных условиях.

Список литературы: 1. *Lathuillere C.* From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments / *C. Lathuillere, M. Menvielle, J. Lilensten, T. Amari, S.M. Radicella* // *Ann. Geophysicae.* – 2005. – Vol. 20. – P. 1081-1104. 2. *Zhang S.* Ionospheric local model and climatology from long-term databases of multiple incoherent scatter radars / *S. Zhang, J.M. Holt, A.P. Eyken, M. McCready, C. Amory-Mazaudier, S. Fukao, M. Sulzer* // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – L20102, doi: 10.1029/2005GL023603. 3. *Picone J.M.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / *J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob, A.C. Aikin* // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1-16. 4. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / *D. Bilitza, B. Reinisch* // *J. Adv. Space Res.* – 2008. – Vol. 42, № 4. – P. 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048. 5. *Anderson D.N.* Intercomparison of physical models and observations of the ionosphere / *D.N. Anderson, M.J. Buonsanto, M. Codrescu, D. Decker, C.G. Fesen, T.J. Fuller-Rowell, B.W. Reinisch, P.G. Richards, R.G. Roble, R.W. Schunk, J.J. Sojka* // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103, № A2. – P. 2179-2192. 6. *Чернышев О.В.* Прогноз максимальных применимых частот / *О.В. Чернышев, Т.Г. Васильева.* – М.: Наука, 1973. – 113 с. 7. *Ануфриева Т.А.* Геометрические параметры слоя F2 ионосферы / *Т.А. Ануфриева, Б.С. Шапиро.* – М.: Наука, 1976. – 91 с. 8. *Поляков В.М.* Полуэмпирическая модель ионосферы / *В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская, Г.В. Шапранова* // Материалы мирового центра данных Б. – М.: Гидрометеоздат, 1978. – 112 с. 9. *Bhuyan P.K.* Electron density measurements in the topside F-region and its comparison with the IRI in the 75° E longitude sector / *P.K. Bhuyan, Chamua Minakshi* // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 1. – P. 55-64. 10. *Araujo-Pradere E.A.* Time empirical ionospheric correction model (STORM) response in IRI-2000 and challenges for empirical modeling in the future / *E.A. Araujo-Pradere, T.J. Fuller-Rowell, D. Bilitza* // *Radio Sci.* – 2004. – Vol. 39. – RS1S24. – doi:10.1029/2002RS002805. 11. *Sethi N.K.* Diurnal and seasonal variations of h_mF_2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 / *N.K. Sethi, R.S. Dabas, V.K. Vohra* // *Ann. Geophysicae.* – 2004. – Vol. 22. – P. 453-458. 12. *Захаров И.Г.* Сравнение экспериментальных и модельных значений полного электронного содержания в ионосфере над Восточной Европой / *И.Г. Захаров, М.В. Ляшенко* // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 280-286. 13. *Taran V.I.* Spatial and temporal distribution of the total electron content inferred from beacon-satellite observations and Kharkiv incoherent scatter radar data / *V.I. Taran, I.G. Zakharov, O.F. Tyrnov, M.V. Lyashenko* // *Adv. Space Res.* – 2007. – Vol. 39, № 5. – P. 803-807. 14. *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, № A11311. – P. 1-9. 15. *Holt J.M.* Regional and local ionospheric models based on Millstone Hill incoherent scatter radar data / *J.M. Holt, S. Zhang, M.J. Buonsanto* // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 29, № 8. – 10.1029/2002GL014678. 16. *Ляшенко М.В.* Полуэмпирическая модель параметров динамических процессов в геокосмической

плазме (100–1000 км) / *М.В. Ляшенко* // *Международная Байкальская Молодежная Научная Школа по Фундаментальной Физике. IX Конференция молодых ученых “Физические процессы в космосе и околоземной среде”, 11 – 16 сентября 2006 г. Программа и тезисы докладов.* – Иркутск: Изд-во ИСЗФ СО РАН, 2006. – С. 62–63. 17. *Ляшенко М.В.* Региональная модель ионосферы по данным харьковского радара некогерентного рассеяния: дис. ... кандидата физ.-мат. наук: 04.00.22 / *Ляшенко Михаил Владимирович.* – Х., 2008. – 204 с. 18. *Lyashenko M.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) based on Kharkov Incoherent Scatter Data / *M. Lyashenko, I. Domnin, L. Chernogor* // *Workshop on Assessment and Validation of Space Weather Models (Alcala de Henares, Spain, 16 – 17 March, 2011).* – 2011. – P. 23-24. 19. *Lyashenko M.V.* Simulation of Seasonal Variations of Electron Concentration in the Ionospheric F2-Peak for Midnight and Noon Local Time / *M.V. Lyashenko* // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2005. – 64, № 11. – P. 973-980, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v64.i11.90. 20. *Chernogor L.* Central Europe Ionospheric Model (CERIM ION) based on Kharkiv Incoherent Scatter Radar Database: Ionospheric F2 Peak Electron Density Simulation / *L. Chernogor, I. Domnin, M. Lyashenko* // *Workshop of Final Results COST Action ES0803 “Developing space weather products and services in Europe” (13–14 March 2012, Prague, Czech Republic).* – 2012. – P. 35.

Bibliography (transliterated): 1. *Lathuillere C.* From the Sun's atmosphere to the Earth's atmosphere: an overview of scientific models available for space weather developments / *C. Lathuillere, M. Menvielle, J. Lilensten, T. Amari, S.M. Radicella* // *Ann. Geophysicae.* – 2005. – Vol. 20. – P. 1081-1104. 2. *Zhang S.* Ionospheric local model and climatology from long-term databases of multiple incoherent scatter radars / *S. Zhang, J.M. Holt, A.P. Eyken, M. McCready, C. Amory-Mazaudier, S. Fukao, M. Sulzer* // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – Vol. 32. – L20102, doi: 10.1029/2005GL023603. 3. *Picone J.M.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / *J.M. Picone, A.E. Hedin, D.P. Drob, A.C. Aikin* // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1-16. 4. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters / *D. Bilitza, B. Reinisch* // *J. Adv. Space Res.* – 2008. – Vol. 42, № 4. – P. 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048. 5. *Anderson D.N.* Intercomparison of physical models and observations of the ionosphere / *D.N. Anderson, M.J. Buonsanto, M. Codrescu, D. Decker, C.G. Fesen, T.J. Fuller-Rowell, B.W. Reinisch, P.G. Richards, R.G. Roble, R.W. Schunk, J.J. Sojka* // *J. Geophys. Res.* – 1998. – Vol. 103, № A2. – P. 2179-2192. 6. *Chernyshev O.V.* Prognoz maksimal'nyh primenimyh chastot / *O.V. Chernyshev, T.G. Vasil'eva.* – М.: Nauka, 1973. – 113 s. 7. *Anufrieva T.A.* Geometricheskie parametry sloya F2 ionosfery / *T.A. Anufrieva, B.S. Shapiro.* – М.: Nauka, 1976. – 91 s. 8. *Polyakov V.M.* Poluempiricheskaya model' ionosfery / *V.M. Polyakov, V.E. Suhodol'skaya, M.K. Ivel'skaya, G.V. Shapranova* // *Materialy mirovogo centra dannyh B.* – М.: Gidrometeoizdat, 1978. – 112 s. 9. *Bhuyan P.K.* Electron density measurements in the topside F-region and its comparison with the IRI in the 75° E longitude sector / *P.K. Bhuyan, Chamua Minakshi* // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 2002. – Vol. 1. – P. 55-64. 10. *Araujo-Pradere E.A.* Time empirical ionospheric correction model (STORM) response in IRI-2000 and challenges for empirical modeling in the future / *E.A. Araujo-Pradere, T.J. Fuller-Rowell, D. Bilitza* // *Radio Sci.* – 2004. – Vol. 39. – RS1S24. – doi:10.1029/2002RS002805. 11. *Sethi N.K.* Diurnal and seasonal variations of h_mF_2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 / *N.K. Sethi, R.S. Dabas, V.K. Vohra* // *Ann. Geophysicae.* – 2004. – Vol. 22. – P. 453-458. 12. *Zakharov I.G.* Sravnenie eksperimental'nyh i model'nyh znacheniy polnogo elektronnoyego sodержaniya v ionosphere nad Vostochnoy Evropoy / *I.G. Zakharov, M.V. Lyashenko* // *Radiofizika i radioastronomiya.* – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 280-286. 13. *Taran V.I.* Spatial and temporal distribution of the total electron content inferred from beacon-satellite observations and Kharkiv incoherent scatter radar data / *V.I. Taran, I.G. Zakharov, O.F. Tyrnov, M.V. Lyashenko* // *Adv. Space Res.* – 2007. – Vol. 39, № 5. – P. 803-807. 14. *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, № A11311. – P. 1-9. 15. *Holt J.M.* Regional and local ionospheric models based on Millstone Hill incoherent scatter radar data / *J.M. Holt,*

- S. Zhang, M.J. Buonsanto // Geophys. Res. Lett. – 2005. – Vol. 29, № 8. – 10.1029/2002GL014678. **16.** Lyashenko M.V. Poluempiricheskaya model' parametrov dinamicheskikh processov v geokosmicheskoy plasme (100–1000 km) / M.V. Lyashenko // Mezhdunarodnaya Baykal'skaya Molodezhnaya Nauchnaya Shkola po Fundamental'noy Fizike. IX Konferenciya molodyh uchenykh "Fizicheskie processy v kosmose i okolozemnoy srede", 11 – 16 sentyabrya 2006 g. Programma i tezisy dokladov.– Irkutsk: Izd-vo ISZS SO RAN, 2006.–S. 62–63. **17.** Lyashenko M.V. Regional'naya model' ionosfery po dannym khar'kovskogo radara nekogerentnogo rasseyaniya: dis. ... kandidata fiz.-mat. nauk: 04.00.22 / Lyashenko Mikhail Vladimirovich.– Kh., 2008.–204 s. **18.** Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) based on Kharkov Incoherent Scatter Data / M. Lyashenko, I. Domnin, L. Chernogor // Workshop on Assessment and Validation of Space Weather Models (Alcala de Henares, Spain, 16 – 17 March, 2011). – 2011. – P. 23-24. **19.** Lyashenko M.V. Simulation of Seasonal Variations of Electron Concentration in the Ionospheric F2-Peak for Midnight and Noon Local Time / M.V. Lyashenko // Telecommunications and Radio Engineering.– 2005. – 64, № 11. – P. 973-980, doi: 10.1615/TelecomRadEng.v64.i11.90. **20.** Chernogor L. Central Europe Ionospheric Model (CERIM ION) based on Kharkiv Incoherent Scatter Radar Database: Ionospheric F2 Peak Electron Density Simulation / L. Chernogor, I. Domnin, M. Lyashenko // Workshop of Final Results COST Action ES0803 "Developing space weather products and services in Europe" (13–14 March 2012, Prague, Czech Republic).– 2012. – P. 35.

Поступила (received) 31.08.2015

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@ya.ru.

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

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

Сіладі Олександр Віталійович – студент Арктичного університету Норвегії, м. Тромсьо, Норвегія, тел.: (066) 155-52-20; e-mail: sean-89@ya.ru.

Силади Александр Витальевич – студент Арктического университета Норвегии, г. Тромсё, Норвегия; тел.: (066) 155-52-20; e-mail: sean-89@ya.ru.

Siladi Oleksandr Vitaliyovych – student of the UiT Arctic University of Norway, Tromsø, Norway; phone: (066) 155-52-20; e-mail: sean-89@ya.ru.

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

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

КВАЗИОПТИМАЛЬНЫЙ ПРИЕМ СИГНАЛОВ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

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

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

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

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

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

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

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

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

где N_p – количество реализаций;

q – отношение сигнал/шум;

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

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

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

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

где P_n – импульсная мощность передатчика;

η – к.п.д. антенно-фидерного тракта;

c – скорость света;

τ_n – длительность зондирующего импульса;

A – эффективная площадь антенны;

σ – эффективное сечение рассеяния;

N_e – концентрация электронов;

k – постоянная Больцмана;

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

ΔF – эффективная ширина полосы пропускания приемника.

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

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

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

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

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

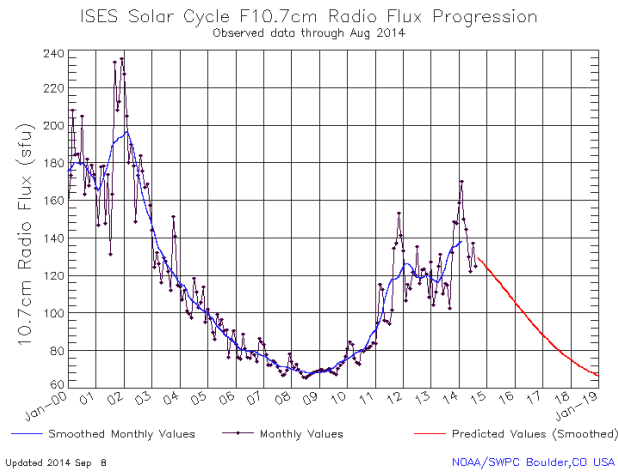


Рис. 1 – Временные вариации индекса солнечной активности F10,7

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

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

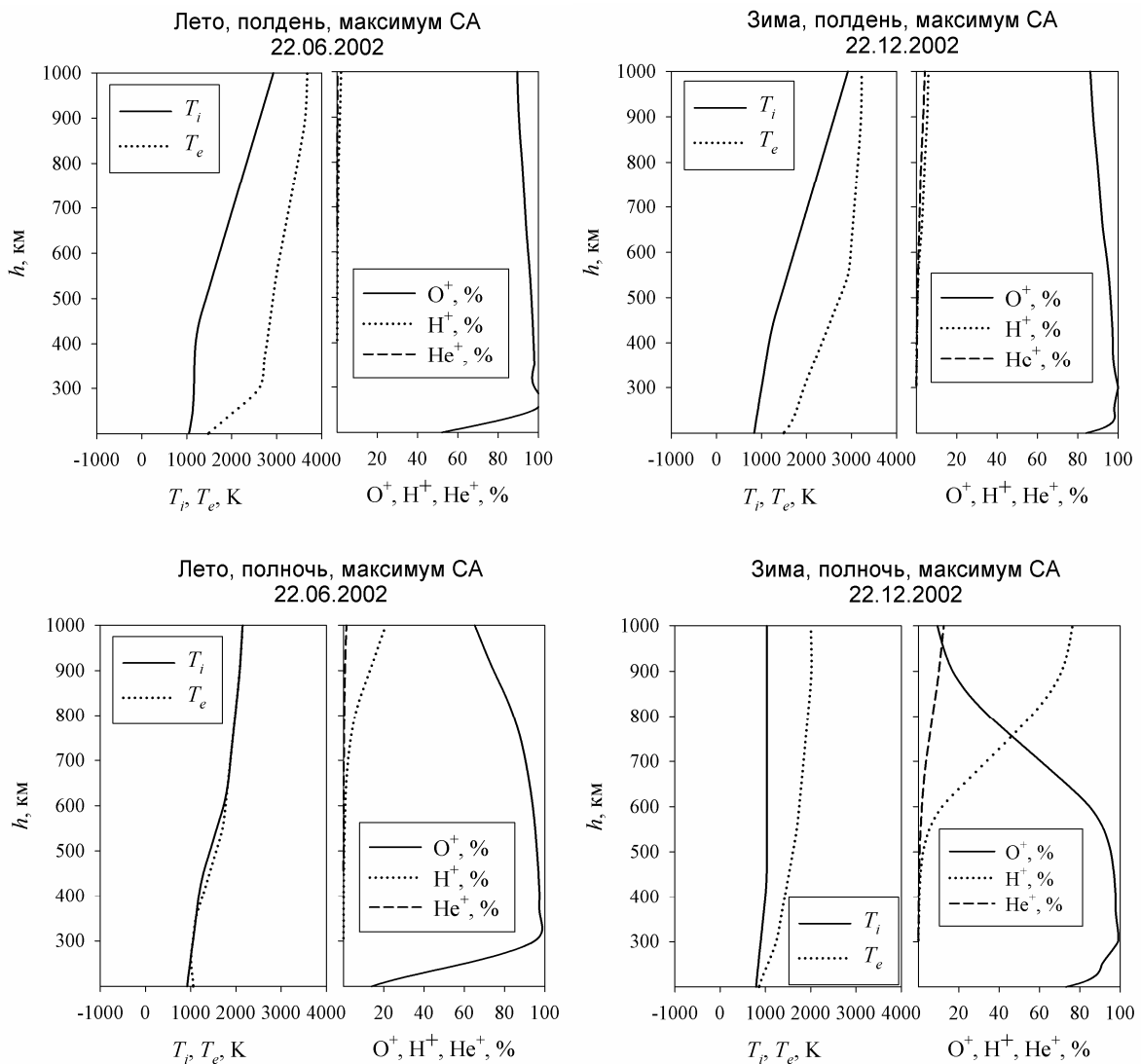


Рис. 2 – Высотные зависимости параметров ионосферы, рассчитанные по модели IRI-2007 для условий высокой солнечной активности

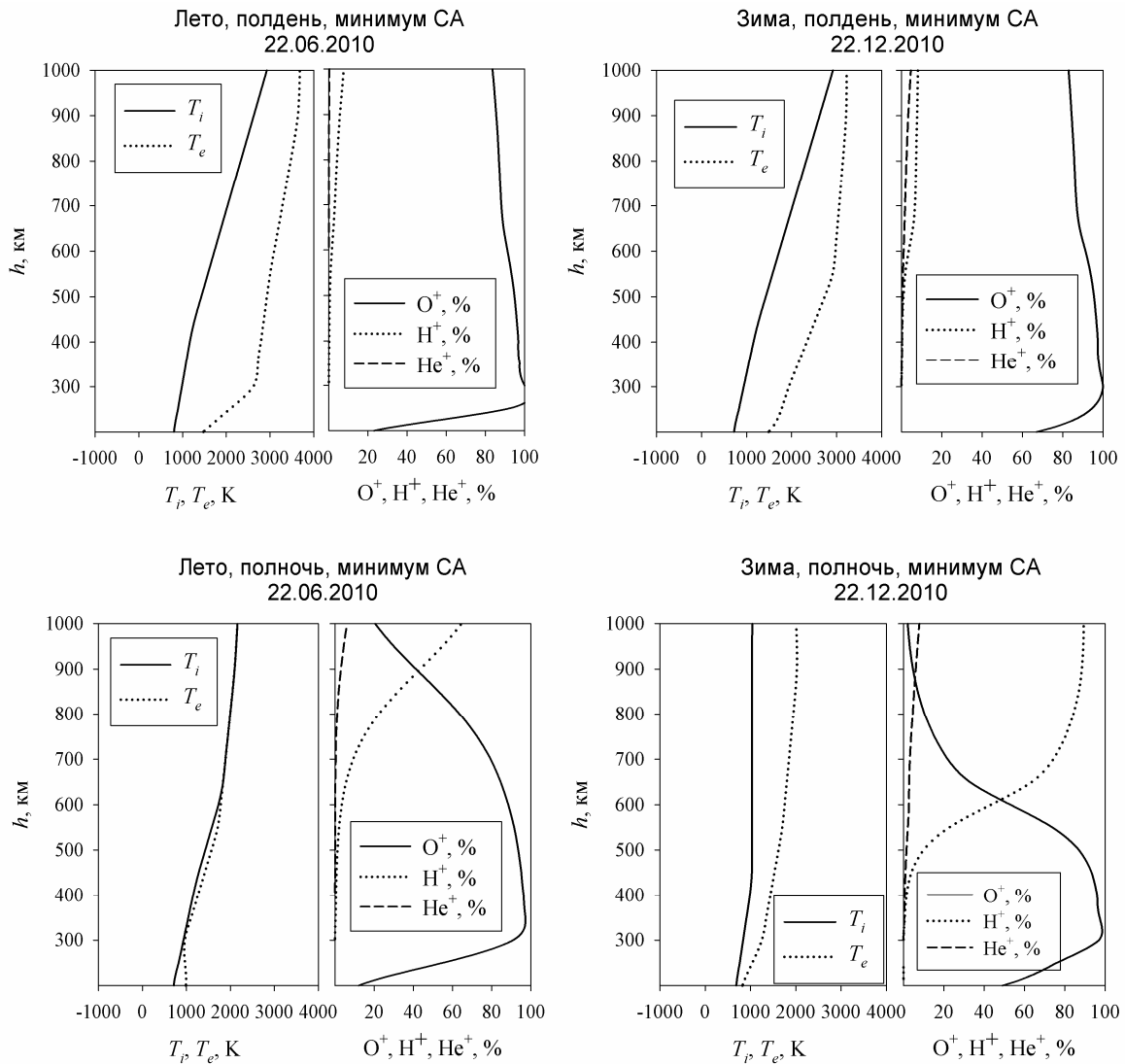


Рис. 3 – Высотные зависимости параметров ионосферы, рассчитанные по модели IRI-2007 для условий низкой солнечной активности

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

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

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

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

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

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

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

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

N – количество сортов ионов, которыми представлена плазма;

γ_n – относительное содержание ионов массой m_n ;

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

λ_0 – длина волны, соответствующая частоте зондирования;

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

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

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

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

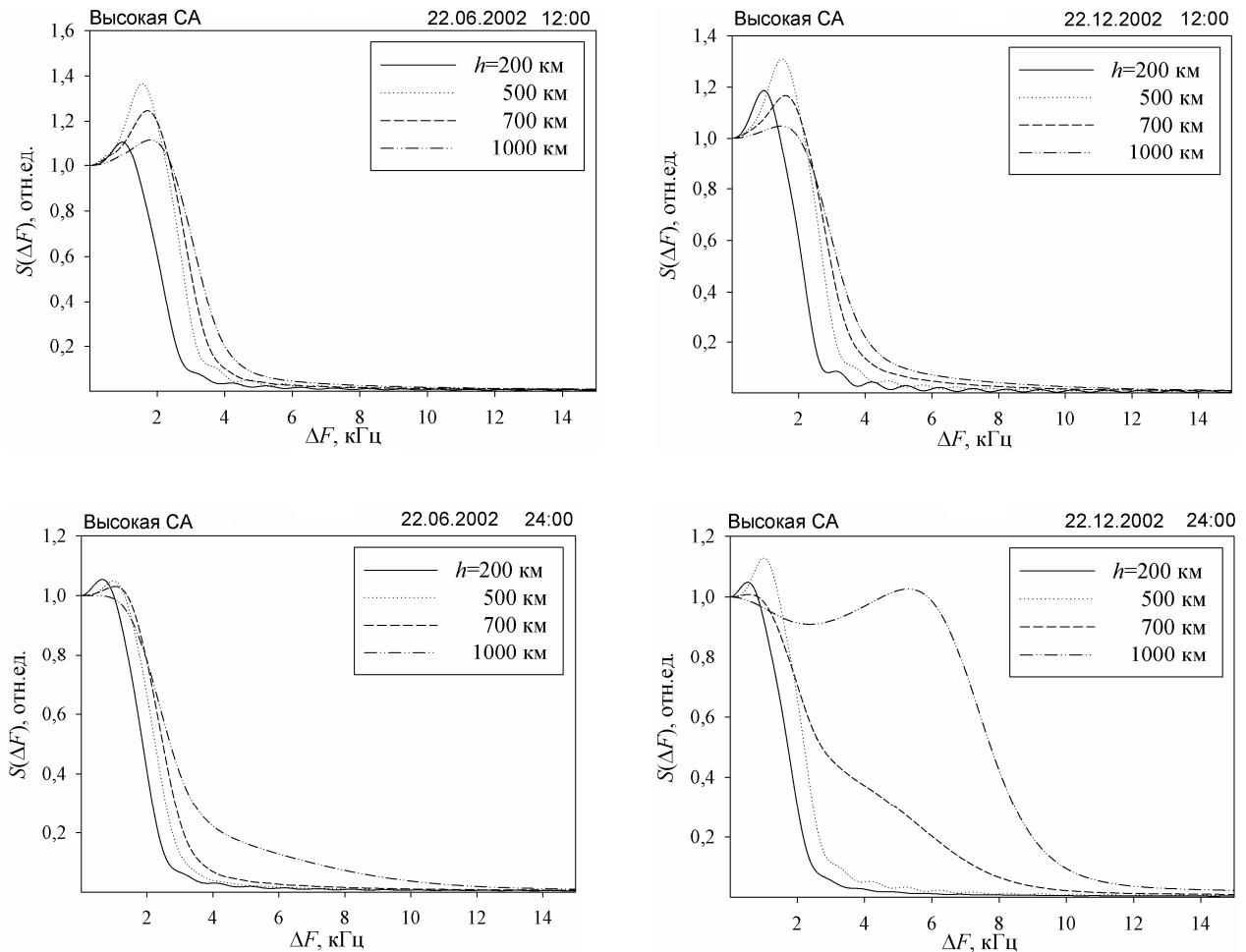


Рис. 4 – Результаты расчета спектра НР сигнала с использованием модели IRI-2007 для условий высокой солнечной активности

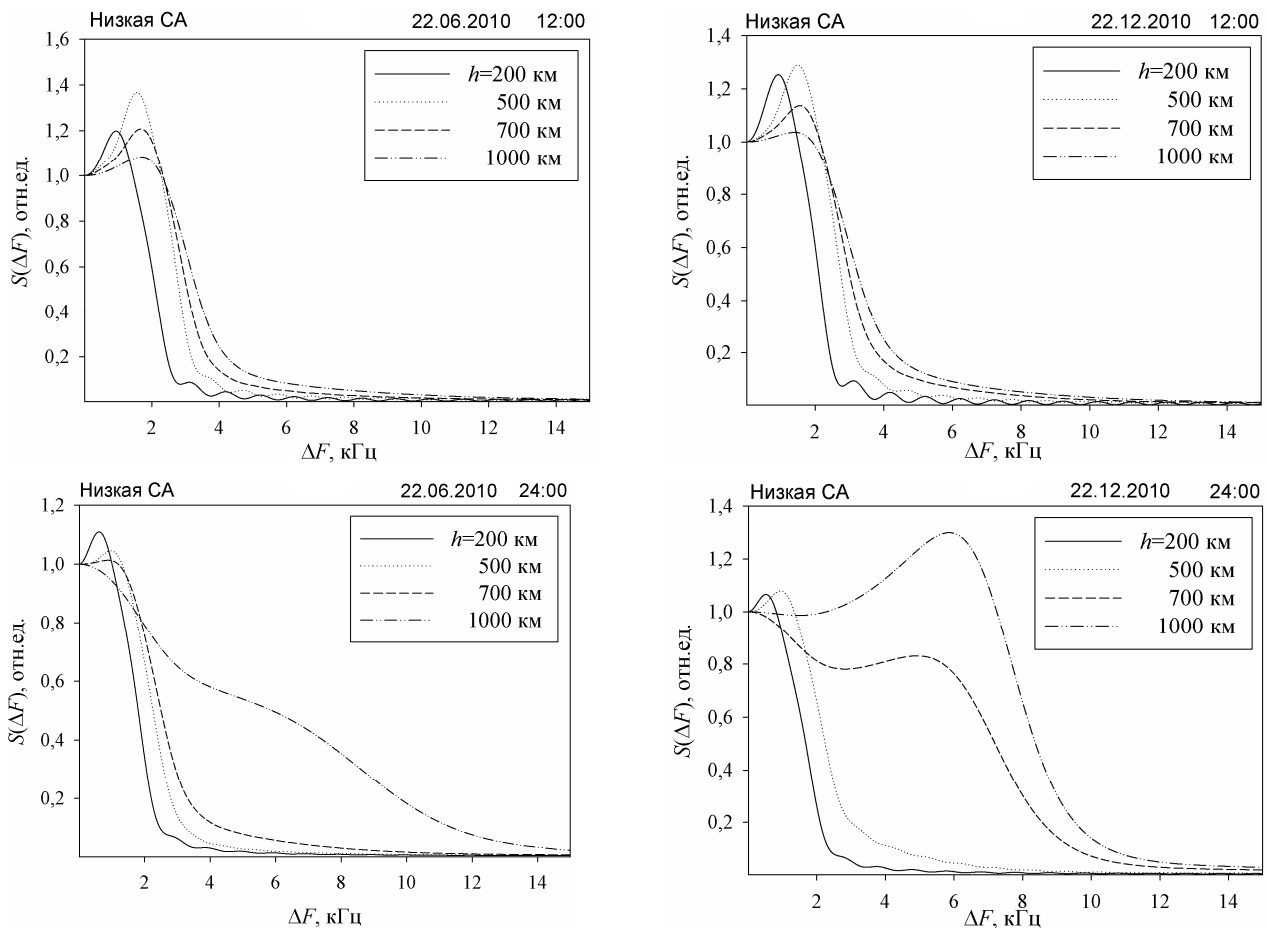


Рис. 5 – Результаты расчета спектра НР сигнала с использованием модели IRI-2007 для условий низкой солнечной активности

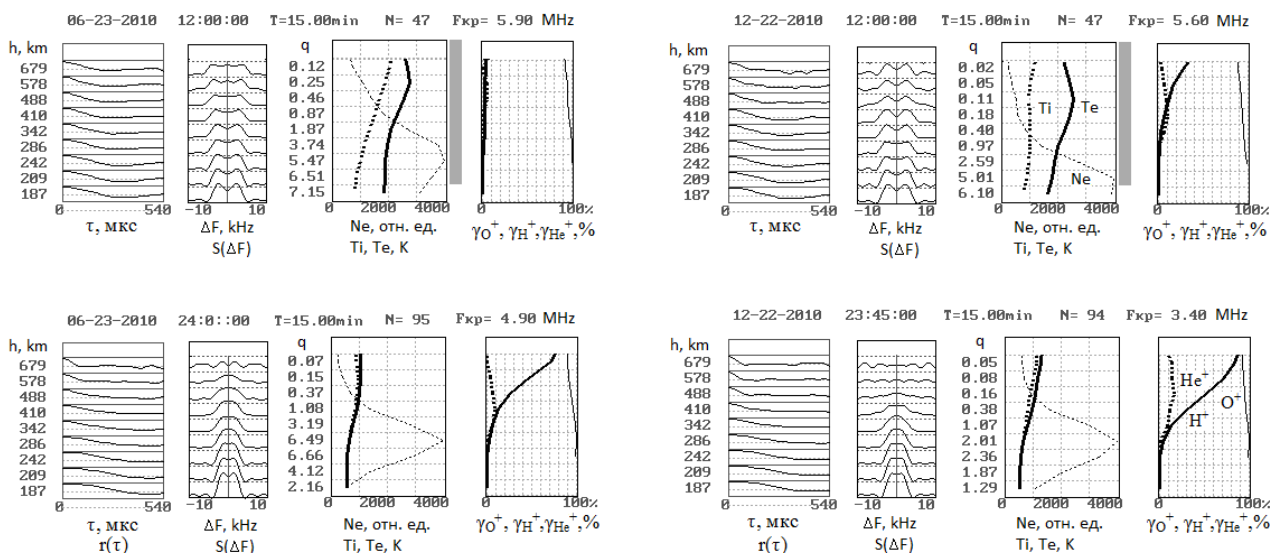


Рис. 6 – Высотные зависимости измеренных АКФ и спектров НР сигнала и вычисленных по ним параметров ионосферной плазмы

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

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

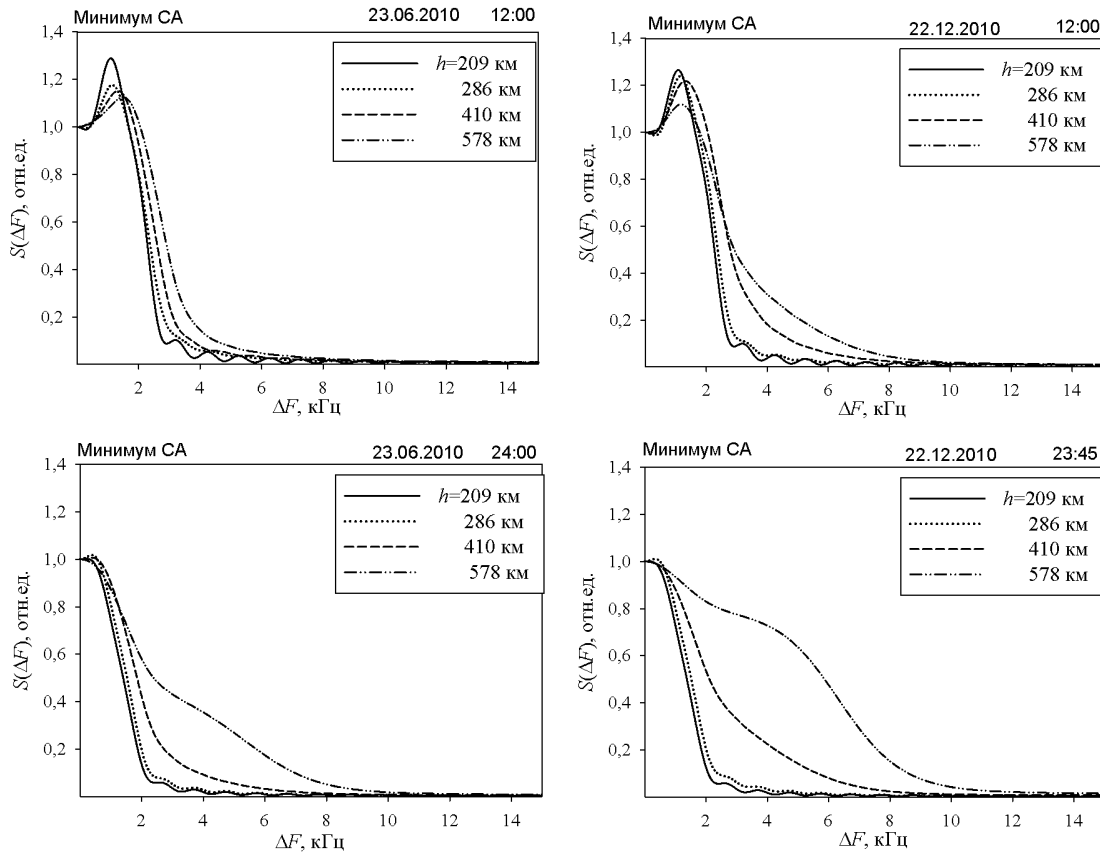


Рис. 7 – Спектры НР сигнала по данным измерений на радаре Института ионосферы

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

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

4. Квазиоптимальная фильтрация НР сигналов.

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

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

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

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

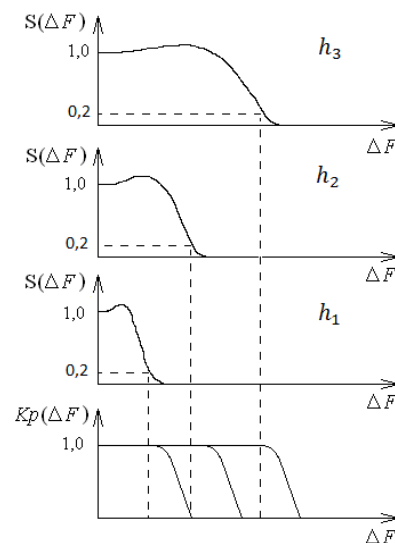


Рис. 8 – Иллюстрация спектров НР сигналов, принятых с высот ионосферы h_1, h_2, h_3 и квадратов АЧХ трех ФНЧ

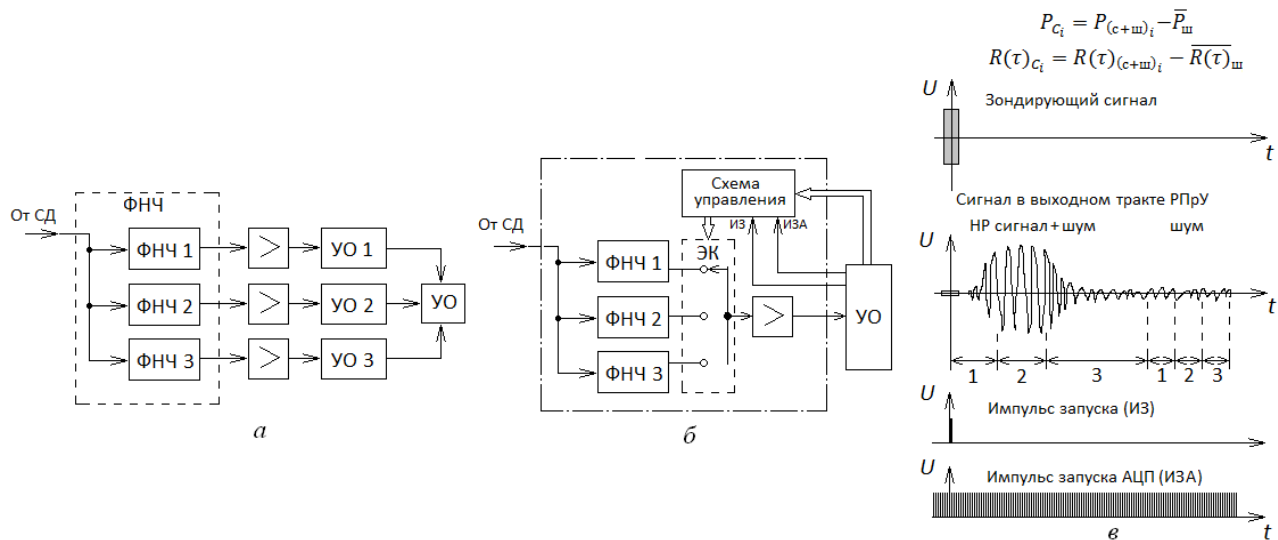


Рис. 9 – Структурная схема квазиоптимальной фильтрации: *a* – с тремя устройствами обработки; *б* – при наличии одного устройства обработки; *в* – эпюры сигналов: радиопередатчика, на выходе радиоприемного устройства и управления

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Поступила (received) 12.08.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК 621.396, 004.032, 004.031

А. Е. МИРОШНИКОВ**РАЗРАБОТКА БАЗЫ ДАННЫХ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ «БАЗИС» ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ И СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**

Описывается разработанное программное обеспечение, которое позволяет получить в удобном для пользователя формате параметры космической погоды и данные автоматической ионосферной станции «Базис» Института ионосферы. Разработанное оригинальное программное обеспечение интегрировано с системой экспресс-обработки Института ионосферы и качественно дополняет ее.

Ключевые слова: web-приложение, космическая погода, обработка, база данных, ионосферная станция.

Введение. При модернизации и дальнейшем развитии системы экспресс-обработки данных радара некогерентного рассеяния [1] появилась потребность в получении дополнительных параметров космической погоды. Такие параметры могут быть получены как с помощью измерительных средств Института ионосферы (автоматическая ионосферная станция (АИС)) так и с привлечением данных из дополнительных открытых источников (система мониторинга космической погоды).

Актуальность разработки базы данных АИС «Базис» Института ионосферы. Метод вертикального зондирования ионосферы продолжает оставаться основным глобальным методом сбора информации об ионосфере. Станции вертикального зондирования позволяют по высотно-частотной характеристике отраженного от ионосферы сигнала определять критические частоты для слоев E, F1, F2 и рассчитывать профиль электронной концентрации. Разработка базы данных (БД) также позволит:

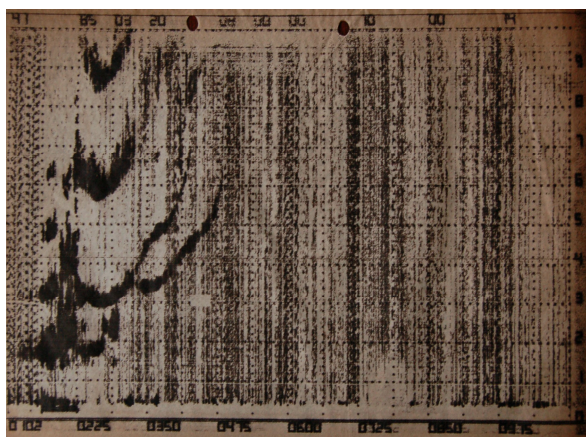
- каталогизировать данные в цифровом виде;
- повысить комфорт оператора при работе с данными АИС;
- предоставить пользователю доступ к данным в графическом и текстовом виде;
- использовать данные БД в режиме реального времени (при измерениях данные будут доступны через сеть Internet);

- модернизировать и повышать функциональность в будущем (разработка приложений на мобильные платформы и прочее);

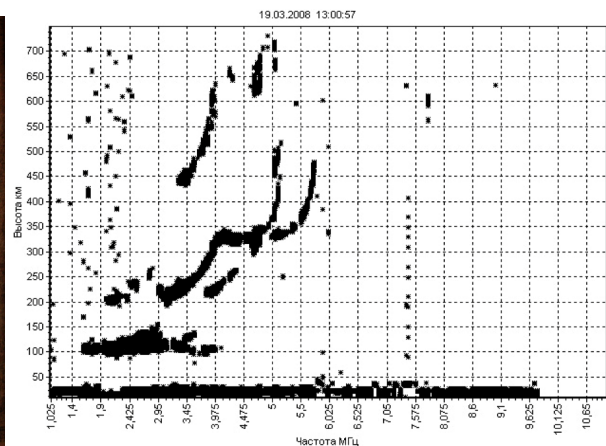
- интегрировать БД ионосферной станции с системой экспресс-обработки Института ионосферы;

Выходные форматы данных АИС Института ионосферы «Базис». Ионосферная станция, входящая в состав радиолокационного комплекса, позволяет проводить вертикальное зондирование и определять высотные характеристики ионосферы в диапазоне рабочей частоты от 0,3 МГц до 20 МГц с линейно возрастающим шагом от 1 кГц до 100 кГц. Количество рабочих частот в одном сеансе зондирования равно 400. Из-за шумоподобного характера принимаемого сигнала приходится применять метод когерентного накопления результатов – количество импульсов, последовательно излучаемых на каждой рабочей частоте, может меняться в диапазоне от 1 до 256.

Регистрация информации с АИС «Базис» во время измерений производится в графическом виде (посредством нанесения записи на электрохимическую бумагу регистрирующим устройством станции, рис. 1, а), а также в цифровом виде (файлы с развертками, полученные с помощью блока цифрового преобразования, рис. 1, б). Так же во время измерений оператор или после измерений



а



б

Рис. 1 – Пример выходных графических форматов данных:

а – ионограмма на специальной электрохимической бумаге; б – программные цифровые данные (развертка)

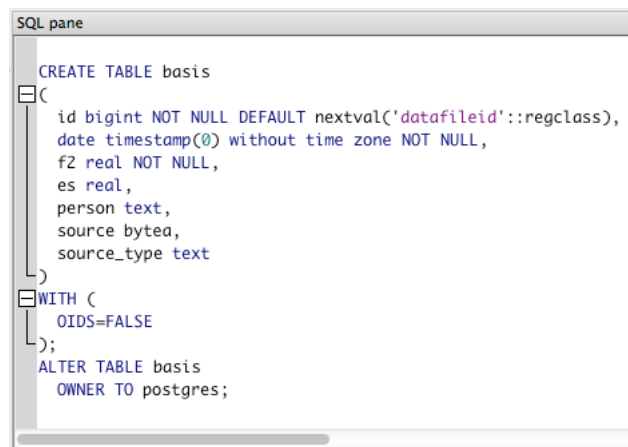
пользователь по данным высотно-частотной характеристики составляет журнал измерений с значениями критических частот слоев в текстовом табличном виде или в виде файла Microsoft Excel. Структура БД должна обеспечивать хранение и доступ ко всем перечисленным выше типам данных.

Разработанное программное обеспечение для хранения данных АИС “Базис” Института ионосферы основано на применении открытого программного обеспечения (ПО), а именно системы управления базами данных (СУБД) PostgreSQL, программы визуализации данных GnuPlot, веб-сервера Apache и оригинального программного обеспечения, написанного с использованием фреймворка Qt (C++). В качестве операционной системы (ОС) используется Ubuntu Server Linux.

Для хранения данных АИС была создана таблица в СУБД PostgreSQL (рис. 2) со следующими полями: id -

порядковый номер записи в таблице, date - дата и время измерений, F2 - значение критической частоты слоя F2, Es - значение критической частоты спорадического слоя Es, person - фамилия пользователя ответственного за получение достоверных данных, source - ионограмма (файл в графическом или двоичном виде), source_type - вид ионограммы (сканированный вариант ионограммы на электро-химической бумаге, программные цифровые данные или другой вид данных).

Для экспорта и импорта данных были разработаны кросс-платформенные консольные приложения, которые могут работать в ОС Windows, Linux и Mac OS X. На рис. 3 представлен внешний вид программы импорта данных в БД.

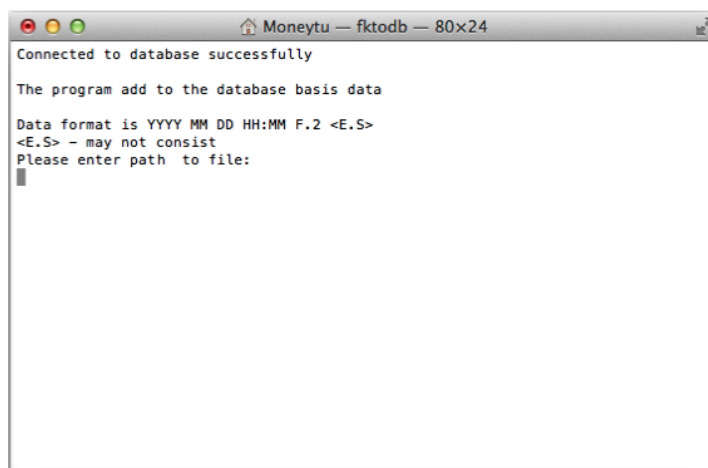


```

CREATE TABLE basis
(
  id bigint NOT NULL DEFAULT nextval('datafileid'::regclass),
  date timestamp(0) without time zone NOT NULL,
  f2 real NOT NULL,
  es real,
  person text,
  source bytea,
  source_type text
)
WITH (
  OIDS=FALSE
);
ALTER TABLE basis
  OWNER TO postgres;

```

Рис. 2 – Запрос на языке SQL для создания таблицы в базе данных АИС “Базис”



```

Connected to database successfully

The program add to the database basis data

Data format is YYYY MM DD HH:MM F.2 <E.S>
<E.S> - may not consist
Please enter path to file:

```

Рис. 3 – Окно программы импорта данных в БД АИС “Базис”

На рис. 4 представлен внешний вид домашней страницы системы экспресс-обработки Института ионосферы, на котором присутствует универсальный указатель ресурса (URL) (пункт Automatic ionospheric station “Basis”) для запуска разработанного CGI-приложения выводящего даты измерений, присутствующих в БД (рис. 5). Эти даты, в свою

очередь, также являются ссылками URL на запуск CGI-приложения, визуализирующего данные присутствующие в базе. На рис. 6 представлен внешний вид вывода результатов работы этой программы – данные доступны в графическом виде и в формате XML файла в заархивированном (zip) виде (рис. 6, б).

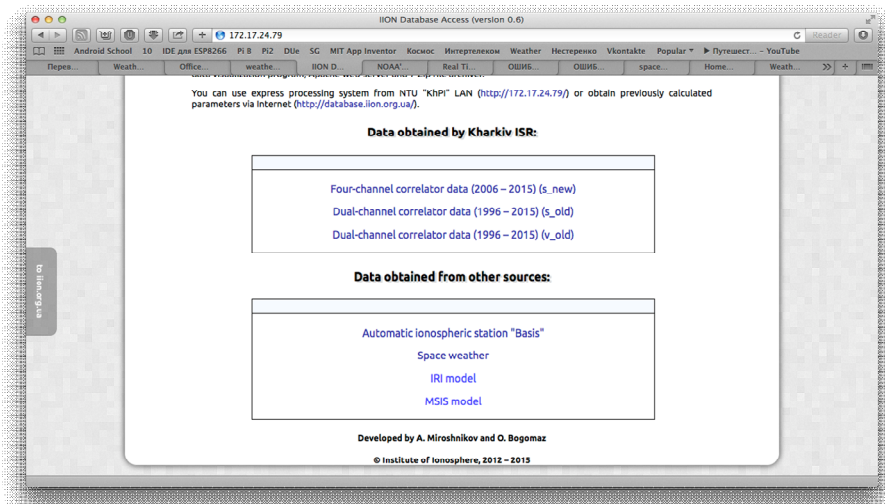


Рис. 4 – Главная страница сайта экспресс-обработки Института ионосферы.

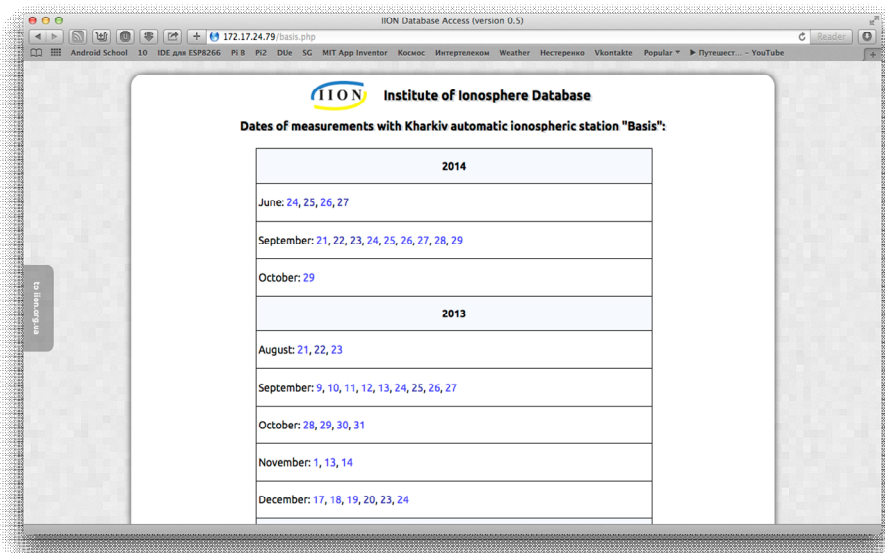
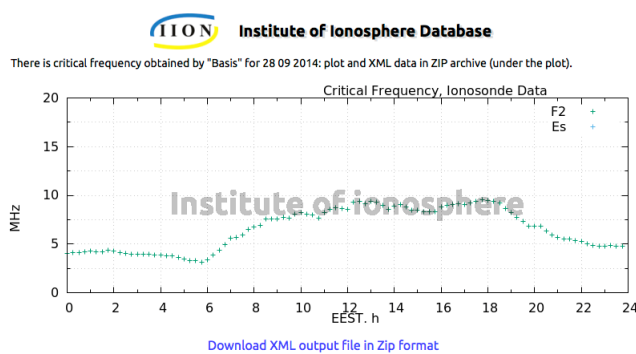


Рис. 5 – Web-страница, сформированная программой получения информации о наличии данных в БД



а

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <Basis>
3   <Seance>
4     <Date>2014-09-28</Date>
5     <Time>00:00</Time>
6     <F2_kr>4.05</F2_kr>
7     <Es xmlns:null="true">None</Es>
8   </Seance>
9   <Seance>
10    <Date>2014-09-28</Date>
11    <Time>00:15</Time>
12    <F2_kr>4.15</F2_kr>
13    <Es xmlns:null="true">None</Es>
14  </Seance>
15  <Seance>
16    <Date>2014-09-28</Date>
17    <Time>00:30</Time>
18    <F2_kr>4.125</F2_kr>
19    <Es xmlns:null="true">None</Es>
20  </Seance>
21  <Seance>
22    <Date>2014-09-28</Date>

```

б

Рис. 6 – Выходные форматы программы визуализации данных БД АИС “Базис”: а – суточный ход критической частоты; б – фрагмент данных в XML формате

Интеграция БД АИС “Базис” с системой экспресс-обработки. Для расчета высотного распределения электронной концентрации необходимо после статистического усреднения значений мощности сигнала рассеяния вдоль направления зондирования и уточнения с помощью корректирующего множителя (отношение температуры электронов к температуре ионов)

проводить привязку к абсолютному значению электронной концентрации в максимуме слоя F2. Данный максимум слоя F2 оценивается по критической частоте этого слоя. Таким образом, для возможности расчета высотно-временного хода электронной концентрации системой экспресс-обработки необходимы наличие значений критической частоты в БД АИС “Базис” (рис. 7).

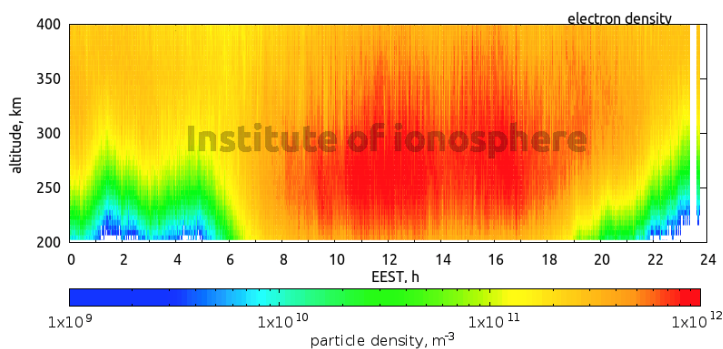


Рис. 7 – Пример расчета высотно-временного хода электронной концентрации системой экспресс-обработки Института ионосферы

Актуальность разработки системы мониторинга космической погоды Института ионосферы. Космическая погода связана с изменяющимися во времени условиями в Солнечной системе: в характеристиках солнечного ветра, магнитосферы, ионосферы и термосферы. К тематике космической погоды относятся вопросы солнечной и геомагнитной активности (геомагнитные бури), исследования воздействия солнечных факторов на технические системы (радиопомехи, пр.), воздействия на биологические системы и людей.

Созданная система мониторинга космической погоды Института ионосферы может быть применена как для научных, так и для прикладных задач, таких как:

- получение дополнительной информации при интерпретации результатов, полученных с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) и автоматической ионосферной станции Института ионосферы;
- выбор режима работы радара НР;
- привязка времени работы измерительного комплекса к различным условиям космической погоды;
- контроль работы оборудования.

Существует определенное количество систем мониторинга космической погоды, однако все они имеют те или иные недостатки и имеют узкую научную специализацию.

Исходные данные для системы мониторинга космической погоды. Исходными входными данными для системы космической погоды Института ионосферы являются: уровень рентгеновского излучения Солнца, поток элементарных частиц, составляющие магнитного поля Земли (данные параметры берутся по данным спутниковых измерений), 3-х часовой планетарный индекс K (по данным наземных магнетометров) и данные станций наклонного зондирования в Прухонице (Чехия) и Москве (Россия). Данные берутся из сторонних открытых источников, таких как сайты National

Aeronautics and Space Administration (NASA), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), международной сети дигизондов и др. источников.

Данные космических измерений берутся с геостационарных спутников GOES-13, GOES-15 и GOES-14 (резервный). Инструменты на борту спутников включают: 5-канальный мультиспектральный тепловизор для получения в видимом и инфракрасном спектре изображения континентальной части Соединенных Штатов; инструмент для измерения температуры воздуха и влажности; солнечный рентгеновский тепловизор для обнаружения солнечных вспышек; инструмент для мониторинга магнитосферы, космического радиационного фона и заряженных частиц.

Данные станций наклонного зондирования были выбраны из практических соображений: дигизонд DPS-4 Института физики атмосферы (Institute of Atmospheric Physics CAS, Прухонице) находится на одной широте с АИС "Базис" Института ионосферы (Харьков) на расстоянии 1550 км., а дигизонд DPS-4 Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН, Москва) – ближайший инструмент, расположенный на расстоянии 650 км.

Для расчета среднего 3-х часового планетарного индекса используются данные сети наземных магнетометров Геологической службы США (U.S. Geological Survey), Британской геологической службы (British Geological Survey), Института физики Земли (Institut de Physique du Globe de Paris, Париж) и корейского центра космической погоды (Korean Space Weather Center). Используются магнетометры расположенные в: Боулдер, штат Колорадо, США; Шамбон-ла-Форе, Франция; Фредериксбург, штат Вирджиния, США; Фресно, штат Калифорния, США; Хартленд, Великобритания; Ньюпорт, штат Вашингтон, США; Ситка, штат Аляска, США; Чеджу, Корея.

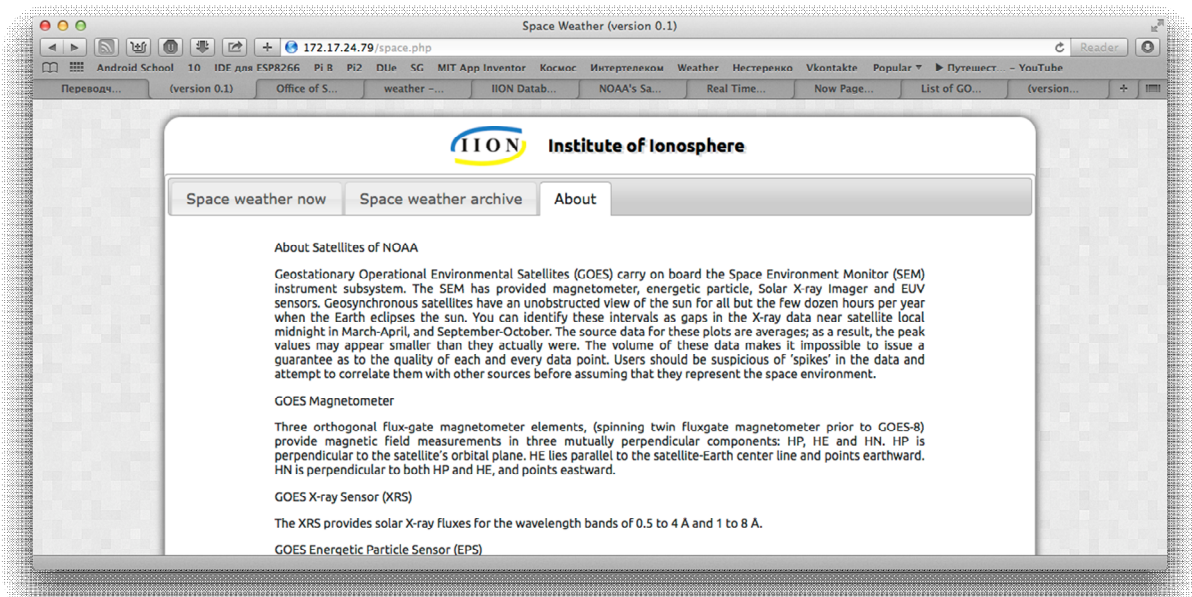


Рис. 8 – Фрагмент сайта системы мониторинга космической погоды Института ионосферы, вкладка *About*

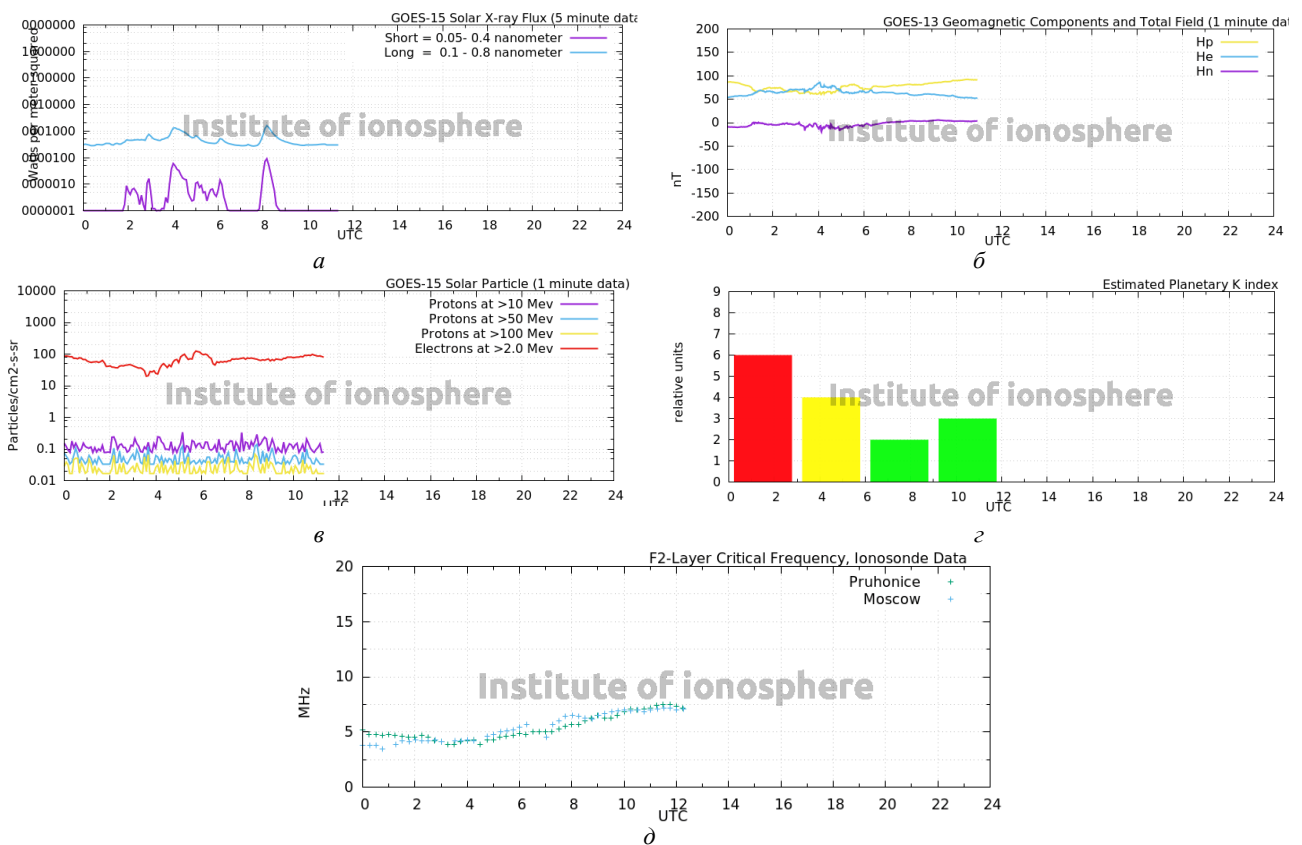


Рис. 9 – Основные выходные данные системы мониторинга космической погоды: *a* – уровень рентгеновского излучения Солнца; *б* – составляющие магнитного поля Земли; *в* – поток элементарных частиц; *г* – 3-х часовой планетарный индекс *K*; *д* – данные станций наклонного зондирования в г. Прухонице и г. Москва.

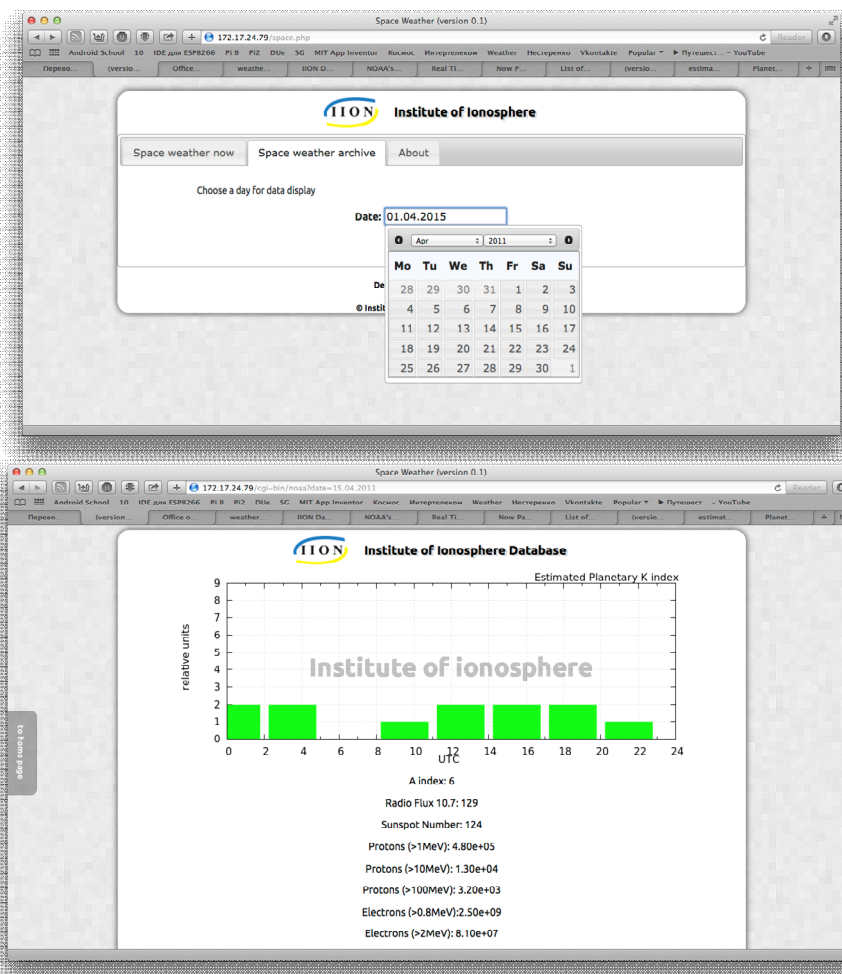


Рис. 10 – Фрагмент сайта системы мониторинга космической погоды Института ионосферы, вкладка *Space weather archive*: а – выбор даты; б – параметры, доступные в архиве

Практическая реализация системы мониторинга космической погоды. Разработанная система мониторинга космической погоды Института ионосферы работает на стороне удаленного сервера, использует оригинальное ПО написанное на языке C++ (фреймверк Qt) и работает совместно с программой GnuPlot, JavaScript библиотекой jQuery и веб-сервером Apache. Система работает в режиме реального времени и доступна в сети НТУ «ХПИ» на сайте экспресс-обработки Института ионосферы (рис.3, меню Space weather). Веб-сайт системы мониторинга космической погоды состоит из трех вкладок: *Space weather now*, *Space weather archive* и *About*.

Вкладка *About* (рис. 8) содержит краткое описание назначения системы, описание параметров космической погоды, инструментов с помощью которых они были получены, режимы работы инструментов и приводятся источники данных.

Вкладка *Space weather now* показывает актуальные параметры космической погоды в режиме реального времени (рис. 9), при условии наличия источников данных.

Вкладка *Space weather archive* содержит подпрограмму работающую в офлайн режиме и содержит архивные значения параметров (рис. 10, а).

Пользователю предлагается ввести дату, заполнив форму или выбрав число из выпадающего календаря. Если данные за введённое число присутствуют в архиве, то выводятся значения параметров космической погоды в текстовом и графическом виде. Если была введена дата, данные для которой еще не присутствуют в архиве, данные архива подсистемы обновляются, а затем предоставляются пользователю. Подпрограмма архивных данных содержит значения параметров космической погоды с 1995 года и содержит такие параметры как: планетарный A индекс, поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см, количество солнечных пятен, среднесуточный поток элементарных частиц по спутниковым измерениям, 3-х часовой планетарный индекс K.

Выводы. Создана БД для хранения данных АИС «Базис» Института ионосферы и разработан комплекс программ, которые позволяют производить импорт и экспорт данных, каталогизировать данные и предоставлять данные в удобном для пользователя формате. Также разработан комплекс программ системы мониторинга космической погоды, которые предоставляют данные пользователю в режиме реального времени. Система имеет возможность предоставлять пользователю данные из архива данных космической погоды. Все разработанное оригинальное

ПО интегрировано с системой экспресс-обработки Института ионосферы и качественно дополняет ее.

Список литературы: 1. *Miroshnikov A.E.* Incoherent scatter radar data processing on a remote server [Электронный ресурс] / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // 12th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2012. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). 2. *Богомаз А.В.* Преимущества обработки данных радара НР на удалённом сервере / *А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников* // Актуальные проблемы автоматизации и приборостроения Украины: материалы Науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых, 24–25 дек. 2012 г. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 27–28. 3. *Miroshnikov A.E.* Kharkiv Institute ionosphere incoherent scatter radar (Ukraine) express data processing on a remote server and visualization of results [Электронный ресурс] / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // 16th International EISCAT symposium, 12–16 August 2013, Lancaster UK. – Lancaster, 2013. – http://eiscat2013.lancs.ac.uk/wp-content/uploads/2013/08/3_Miroshnikov_Miroshnikov_Abstract.pdf. 4. *Богомаз А.В.* Экспресс-обработка данных радара некогерентного рассеяния на удалённом сервере / *А.В. Богомаз, А.Е. Мирошников* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – №28 (1001). – С. 63–68. 5. *Мирошников А.С.* Візуалізація результатів обробки даних радара некогерентного розсіяння на віддаленому сервері / *А.С. Мирошников, О.В. Богомаз* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІІ (29–31 травня 2013 р., Харків). Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 200. 6. *Miroshnikov A.* Program of data exchange in XML format of ISR express data processing system running on the server-side / *A. Miroshnikov, O. Bogomaz, A. Zhuk* // International School-Conference “Remote radio sounding of the ionosphere (ION-2013)”, September, 30 – October, 4, 2013, Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. – Book of abstracts. – 2013. – P. 51. 7. *Мирошников А.Е.* Кросс-платформенное программное обеспечение для работы с базой данных института ионосферы / *Мирошников А.Е., Богомаз А.В.* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – №33 (1066)-С. 46-50. 8. *Пуляев В.А.* Запись ионосферных параметров в формате базы данных MADRIGAL / *Пуляев В.А., Белозеров Д.П., Мирошников А.Е.* // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Серия: «Радиофизика и ионосфера». – 2013. – №28 (1001) – С. 46-52. 9. *Мирошников А.С.* Разработка базы данных автоматической ионосферной станции «Базис» института ионосферы / *А.С. Мирошников* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІІ (20 – 22 травня 2015 р., Харків). Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 284. 10. *Мирошников А.С.* Разработка системы мониторинга космической погоды, работающей в режиме реального времени, для института ионосферы / *А.С. Мирошников* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.ІІІ (20 – 22 травня 2015 р., Харків). Секція 17. Навколоземний космічний простір. Радіофізика та іоносфера – Харків: НТУ «ХПІ». – С. 284.

Bibliography (transliterated): 1. *Miroshnikov A.E.* Incoherent scatter radar data processing on a remote server [Elektronnyy resurs] /

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мирошников Артем Євгенійович – молодший науковий співробітник Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків, тел.: (098) 922-32-42; e-mail: moneytu@gmail.com.

Мирошников Артем Євгенєвич – младший научный сотрудник Института ионосферы, г. Харьков; тел.: (098) 922-32-42; e-mail: moneytu@gmail.com.

Miroshnikov Artem Evgenyevich – Junior Researcher of Institute of Ionosphere, Kharkiv; tel.: (098) 922-32-42; e-mail: moneytu@gmail.com.

A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz // 12th Kharkiv Young Scientists Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics. – Kharkiv, 2012. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM). 2. *Bogomaz A.V.* Preimuschestva obrabotki dannykh radara NR na udalYonnom servere / *A.V. Bogomaz, A.E. Miroshnikov* // Aktualnyie problemyi avtomatiki i priborostroeniya Ukrainyi: materialyi Nauch.-tehn. konfer. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, 24–25 dek. 2012 g. – Kharkov: NTU «HPI», 2012. – P. 27–28. 3. *Miroshnikov A.E.* Kharkiv Institute ionosphere incoherent scatter radar (Ukraine) express data processing on a remote server and visualization of results [Elektronnyy resurs] / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // 16th International EISCAT symposium, 12–16 August 2013, Lancaster UK. – Lancaster, 2013. – http://eiscat2013.lancs.ac.uk/wp-content/uploads/2013/08/3_Miroshnikov_Miroshnikov_Abstract.pdf 4. *Bogomaz A.V.* Ekspress-obrabotka dannykh radara nekogerentnogo rasseyaniya na udalYonnom servere / *A.V. Bogomaz, A.E. Miroshnikov* // Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta «Harkovskiy politehnicheskii institut». Seriya: «Radiofizika i ionosfera». – 2013. – Vol 28 (1001). – P. 63–68. 5. *Miroshnikov A.E.* Vizualizatsiya rezultativ obrobki danih radara nekogerentnogo rozslYannya na viddalenomu serveri / *A.E. Miroshnikov, O.V. Bogomaz* // Informatsiynyyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidey XXI mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi, Ch.III (29–31 travnya 2013 r., Kharkiv). Sektsiya 17. Navkolozemniy kosmichniy prostir. Radiofizika ta Ionosfera – Kharkiv: NTU «KhPI». – P. 200. 6. *Miroshnikov A.* Program of data exchange in XML format of ISR express data processing system running on the server-side / *A. Miroshnikov, O. Bogomaz, A. Zhuk* // International School-Conference “Remote radio sounding of the ionosphere (ION-2013)”, September, 30 – October, 4, 2013, Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. – Book of abstracts. – 2013. – P. 51. 7. *Miroshnikov A.E.* Kross-platfornennoe programmnoe obespechenie dlya raboty s bazoy dannykh instituta ionosfery / *Miroshnikov A.E., Bogomaz A.V.* // Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta «Kharkovskiy politehnicheskii institut». Seriya: «Radiofizika i ionosfera». – 2013. – Vol 33 (1066)-P. 46-50. 8. *Pulyaev V.A.* Zapis ionosfernnykh parametrov v formate bazy dannykh MADRIGAL / *Pulyaev V.A., Belozarov D.P., Miroshnikov A.E.* // Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta «Kharkovskiy politehnicheskii institut». Seriya: «Radiofizika i ionosfera». – 2013. – Vol. 28 (1001) – P. 46-52. 9. *Miroshnikov A.E.* Razrabotka bazy dannykh avtomaticheskoy ionosfernoy stantsii «Bazis» instituta ionosfery / *A.E. Miroshnikov* // Informatsiynyyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidey XXIII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi, Ch.III (20 – 22 travnya 2015 r., Kharkiv). Sektsiya 17. Navkolozemniy kosmichniy prostir. Radiofizika ta Ionosfera – Kharkiv: NTU «KhPI». – P. 284. 10. *Miroshnikov A.E.* Razrabotka sistemyi monitoringa kosmicheskoy pogodyi, rabotayushey v rezhime realnogo vremeni, dlya instituta ionosfery / *A.E. Miroshnikov* // Informatsiynyyi tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidey XXIII mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi, Ch.III (20 – 22 travnya 2015 r., Harkiv). Sektsiya 17. Navkolozemniy kosmichniy prostir. Radiofizika ta ionosfera – Kharkiv: NTU «KhPI». – P. 284.

Поступила (received) 28.08.2015

УДК 550.388.2

Т. Г. ЖИВОЛУП, С. В. ПАНАСЕНКО, Л. Ф. ЧЕРНОГОР**ВОЗМУЩЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, СОПРОВОЖДАВШИЕ СТАРТЫ РАКЕТЫ «СОЮЗ» С КОСМОДРОМА ПЛЕСЕЦК**

Проанализированы временные зависимости критических частот F-области ионосферы для трех стартов ракеты «Союз» с космодрома Плесецк по данным двух ионозондов, расположенных вблизи г. Тромсе (Норвегия) и г. Лонгьир (архипелаг Свалбард, Норвегия). Обнаружены квазипериодические вариации этих частот, наблюдавшиеся после стартов с запаздываниями 30 – 60 мин и около 70 мин для ионозондов вблизи г. Тромсе и г. Лонгьир соответственно. Периоды волновых возмущений составили 30 – 60 мин, а амплитуды равнялись 0.05 – 0.2 МГц. Горизонтальные скорости распространения возмущений соответствовали скоростям акустико-гравитационных волн на высотах максимума концентрации электронов.

Ключевые слова: ионозонд, критические частоты, старты ракет, волновые возмущения.

Введение. В последние десятилетия мощность ракет и частота их стартов достигла таких значений, что высвобождаемую при этом энергию необходимо учитывать при анализе процессов в атмосфере и геокосмосе. Стартующая ракета оказывает механическое, тепловое, химическое и электромагнитное воздействия на окружающую среду. При этом часть энергии тратится на генерацию и распространение волновых возмущений в атмосфере и ионосфере, способных распространяться на тысячи километров от места старта [1].

Обнаружение и оценка параметров таких волновых процессов является актуальной задачей по нескольким причинам. С одной стороны, старты и полеты ракет являются своего рода активными экспериментами в геокосмосе, в которых расстояние до космодрома и выделяемая энергия, зависящая от массы ракеты, являются известными величинами. Таким образом, анализ динамических процессов позволяет уточнить модели этих процессов, вызванных локальными высокоэнергичными источниками, а также выявить механизмы преобразования и передачи энергии в системе Земля – атмосфера – геокосмос. С другой стороны, наблюдаемые волновые возмущения сами по себе являются индикатором исследуемых событий. При наличии одновременных измерений, проведенных рядом разнесенных в пространстве измерительных комплексов, по значениям параметров наблюдаемых процессов можно определить местоположение, время старта и оценить массу стартовавшей ракеты.

Анализ волновых возмущений, наблюдаемых вдали от места старта, проводится в течение нескольких десятилетий [1]. При этом активно применяются наземные методы дистанционного зондирования, такие как метод вертикального зондирования [2 – 4], некогерентного рассеяния [5, 6], доплеровского зондирования [7], а также магнитометрические методы [8].

Целью данной работы является анализ временных вариаций критических частот F2-слоя ионосферы, имевших место после старта ракеты «Союз» с космодрома Плесецк, по данным ионозондовых наблюдений.

Сведения о ракете и средствах наблюдения. Ракета «Союз» относится к тяжелым ракетам [1]. Она

имеет полную массу 305 т, высоту 46.1 м, начальную тягу 4.14 МН. Ее низкоорбитная полезная нагрузка составляет 6855 кг для высоты 200 км. Параметры нулевой ступени следующие: масса – 4×44.4 т, тяга – 4×1.02 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 19.6 м, время работы – 120 с. Параметры первой ступени: масса – 105.4 т, тяга – 1 МН, диаметр – 3 м, высота – 27.8 м, время работы – 286 с. Вторая ступень имеет следующие параметры: масса – 25.2 т, тяга – 0.3 МН, диаметр – 2.7 м, высота – 6.7 м, время работы – 300 с. Общая продолжительность работы двигателей ракеты – около 12 мин.

Для диагностики ионосферных возмущений использовались данные двух ионозондов (Dynasonde), расположенных вблизи г. Тромсе (Норвегия) и г. Лонгьир (архипелаг Свальбард, Норвегия) [9].

Ионозонд, расположенный вблизи г. Тромсе, является одним из шести цифровых ионозондов, спроектированных и созданных в Лаборатории космической среды (Боулдер, США) в течение 1975 – 1978 гг. Для стандартного зондирования он излучает радиоимпульсы гауссовской формы длительностью по половинной мощности около 128 мкс. Максимальная мощность составляет 10 кВт. Два приемника используются с мультиплексорами на входах таким образом, что можно подключать различные пары шести приемных антенн при приеме каждого импульса. Ширина полосы пропускания приемника равна 30 кГц. Погрешность оценки критических частот $f_{o,x}F2$ составляет около 10 кГц (0.01 МГц).

Предающая антенна ионосферной станции была установлена в 1980 г. и является четырехмачтовой двухплоскостной логопериодической антенной с коэффициентом логопериодичности $\tau = 0.92$. Усиление этой антенны рассчитывается по формуле: $G(\theta) = 6 \cos^{1.5}(\theta)$ дБ для частот, больших 1 МГц, где θ – зенитный угол излучения. Приемная антенна представляет собой квадратный массив из шести длинных диполей, диагональ квадрата равна 141 м. Каждый диполь состоит из двух алюминиевых трубок длиной 11 м и диаметром 15 см, расположенных на высоте 2 м над поверхностью Земли.

Оборудование ионозонда (передатчик, приемник и антенны) практически не изменились с 1980 г., в то время как программное обеспечение и обработка

данных существенно улучшились. Сейчас данные ионозонда представляются в реальном времени в сети Интернет с использованием более детального анализа, что привело к существенному улучшению детализации результатов. В 2002 г. была установлена автономная система анализа данных в реальном времени. Она позволила получать большое разнообразие ионосферных параметров, включая профили концентрации электронов, скорость переноса плазмы, автоматически масштабируемые значения критических частот E- и F- областей [9].

Ионозонд вблизи г. Лонгьер имеет практически такие же характеристики, как и описанный выше, кроме размера приемной антенны – она состоит из четырех длинных диполей.

Данные ионозондов находятся в свободном доступе в сети Интернет (<http://dynserv.eiscat.uit.no>). Расстояние от космодрома Плесецк до ионозондов составляет около 1200 км и 2000 км соответственно. Информация о дате и времени старта ракеты (СР), а также модификации ракеты представлена в табл. 1.

Таблица 1 – Общие сведения о стартах ракеты и геомагнитной обстановке

Дата	Время старта, UT	Тип ракеты	Высокоширотные индексы		Планетарные индексы	
			A	K	A_p	K_p
15.04.2010	15:00:00	Союз У	6	3 3 1 2 1 1 0 0	8	4 3 1 1 1 1 0 1
16.04.2010			2	2 1 0 0 0 1 0	4	2 1 0 0 0 1 1
17.04.2010			2	1 0 1 0 0 0 1 1	2	1 0 0 0 0 0 1 1
05.05.2014	13:49:35	Союз 2.1a	10	1 3 3 3 2 3 2 1	10	2 3 3 2 2 2 2 2
06.05.2014			1	1 1 1 0 0 0 0	3	1 1 1 1 1 0 0 0
07.05.2014			3	0 0 0 0 3 1 0 1	4	0 1 1 1 2 1 1 2
26.06.2011	16:00:00	Союз У	6	3 3 1 1 2 1 0 1	7	3 3 1 1 1 1 1 1
27.06.2011			3	1 1 1 1 2 0 0 1	5	1 2 1 1 1 1 2 2
28.06.2011			1	1 1 0 0 0 0 0 1	4	2 2 0 0 1 1 0 1

Примечание. Данные, относящиеся ко дню старта, выделены жирным начертанием.

Сведения о геомагнитной обстановке. В табл. 1 также приведены значения высокоширотных и планетарных индексов геомагнитной активности в день старта, а также в предыдущие и последующие сутки. Видно, что индексы A и A_p равнялись 1 – 10, а K и K_p в основном не превышали значения 3. Это свидетельствует о том, что в дни стартов ракеты “Союз”, как в предшествующие и последующие дни, состояние магнитного поля Земли было спокойным, что способствовало обнаружению возмущений в ионосферной плазме, сопровождавших старты ракет.

Анализ f -графиков. Для выявления ионосферных возмущений анализировались временные вариации частоты f_oF2 . В тех случаях, когда определить ее значения было невозможно, анализировались вариации f_xF2 (рис. 1 – 3).

Из рис. 1, а видно, что в предыдущий день до СР, 15 апреля 2010 г., значения f_oF2 в интервале времени 12:48 – 13:12 (здесь и далее время UT) изменялись незначительно. Потом имело место падение f_oF2 до ее локального минимума в 13:52, ее рост до ее локального максимума в 14:40, и затем ее спад до небольшого локального минимума в 15:12. С 15:16 до 17:32 наблюдались слабые изменения f_oF2 .

16 апреля 2010 г., т.е. в день СР, поведение f_oF2 было иным. По данным ионозонда вблизи г. Тромсе перед СР наблюдалось некоторое увеличение f_oF2 до ее локального максимума в 14:32, потом ее уменьшение до ее локального минимума в 14:48 и увеличение до локального максимума в 14:52. Затем после СР началось уменьшение f_oF2 до локального минимума в 15:12. После этого наблюдались два локальных максимума f_oF2 в 15:24 и 16:56 (см. рис. 1, б).

Вариации $f_oF2(t)$ в следующий после старта день 17 апреля 2010 г. были иными, чем в день СР (см.

рис. 1, в). В период с 13:44 до 14:52 f_oF2 почти не изменялась, потом уменьшилась до небольшого локального минимума, который наблюдался в 15:04, потом возросла до своего локального максимума в 16:44, после чего стала уменьшаться с небольшими флуктуациями.

По данным ионозонда вблизи г. Лонгьер, перед СР после локального максимума в 14:18 наблюдалось монотонное уменьшение f_oF2 до момента СР в 15:00, которое продолжилось и после старта до локального минимума f_oF2 в 15:24. Затем f_oF2 увеличилась до локального максимального значения, которое наблюдалось с 15:42 до 16:06 и после этого стала уменьшаться с небольшими флуктуациями (см. рис. 1, г).

Рассмотрим временные вариации частоты f_xF2 в день старта ракеты “Союз” 6 мая 2014 г. в 13:49, а также в предыдущий старту и следующий после старта день (см. рис. 2).

Как видно из рис. 2, а, 5 мая 2014 г. до 13:40 наблюдались квазипериодические колебания f_xF2 , после чего f_xF2 возрастает до своего локального максимального значения, которое наблюдалось с 14:40 до 14:50, и потом монотонно уменьшилась до своего минимального значения в 15:34.

6 мая 2014 г., в день СР, поведение f_xF2 отличалось от ее поведения 5 мая 2014 г. (см. рис. 2, б). До СР в период 09:00 – 12:00 f_xF2 почти не изменялась. После 12:00 f_xF2 медленно увеличивалась до своего локального максимума, который наблюдался с 13:30 до 13:40, и с 13:50, после СР, стала постепенно уменьшаться до своего локального минимального значения, которое было достигнуто в 14:20. Потом f_xF2 медленно увеличилась до своих локальных максимальных значений, которые наблюдались с 15:34 до 15:50. После этого частота f_xF2

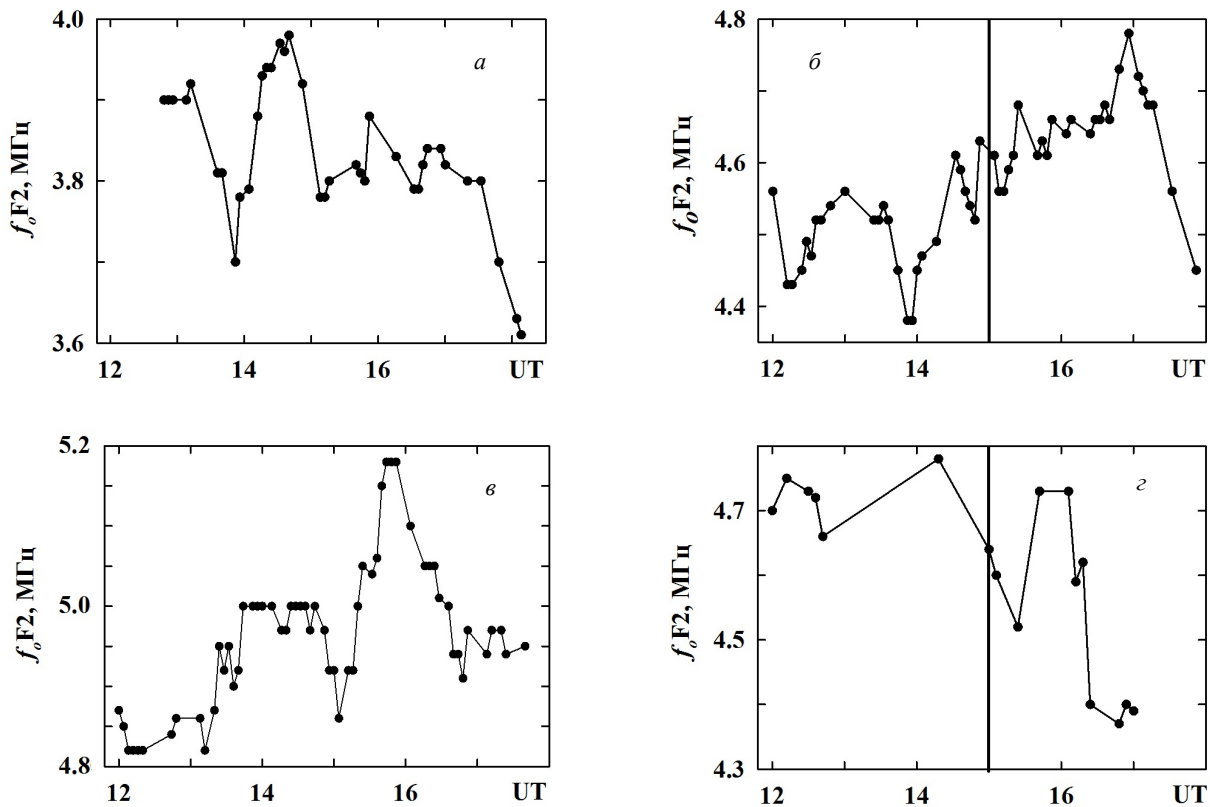


Рис. 1 – Временные вариации критической частоты F-области ионосферы f_oF_2 , полученные с помощью ионозонда вблизи г. Тромсø: *a* – 15.04.2010 г.; *б* – 16.04.2010 г. и *в* – 17.04.2010 г., а также ионозонда вблизи г. Лонггьир: *г* – 16.04.2010 г. Здесь и далее вертикальными сплошными линиями показан момент старта ракеты.

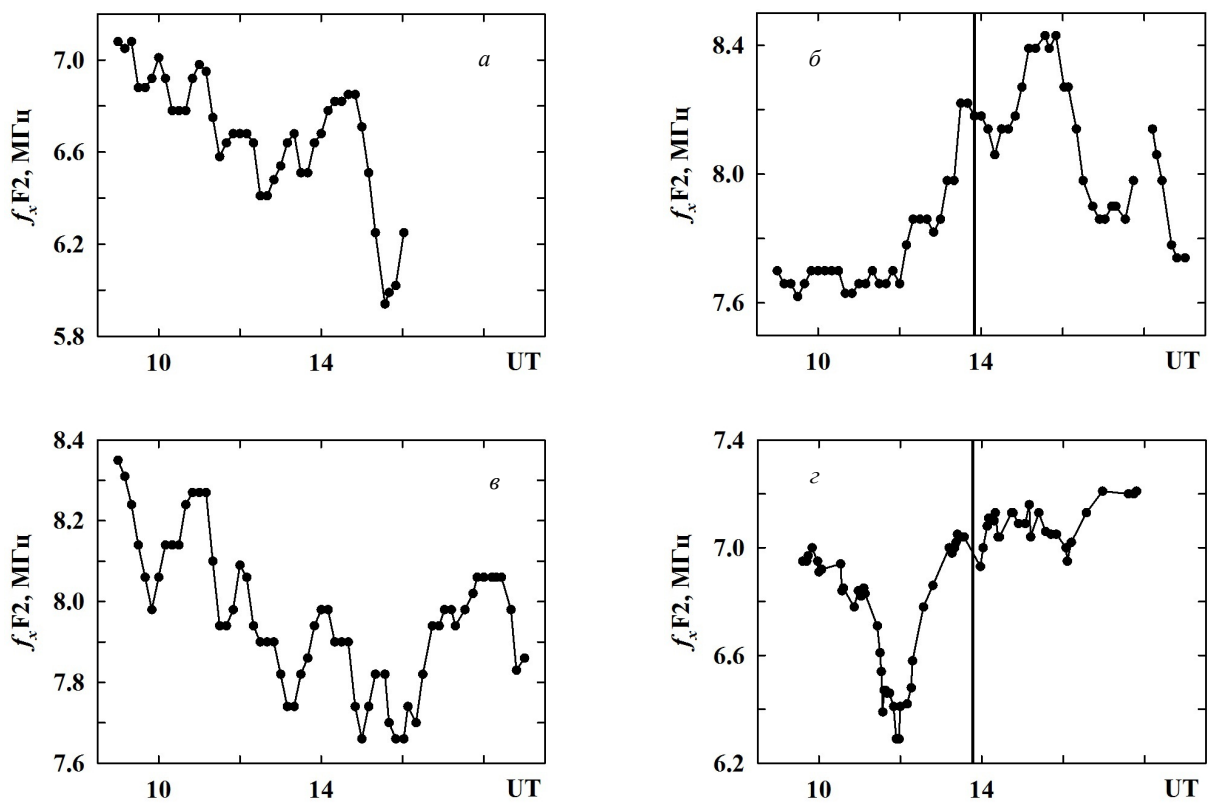


Рис. 2 – То же, что и на рис. 1, для f_xF_2 : *a* – 05.05.2014 г.; *б*, *г* – 06.05.2014 г. и *в* – 07.05.2014 г.

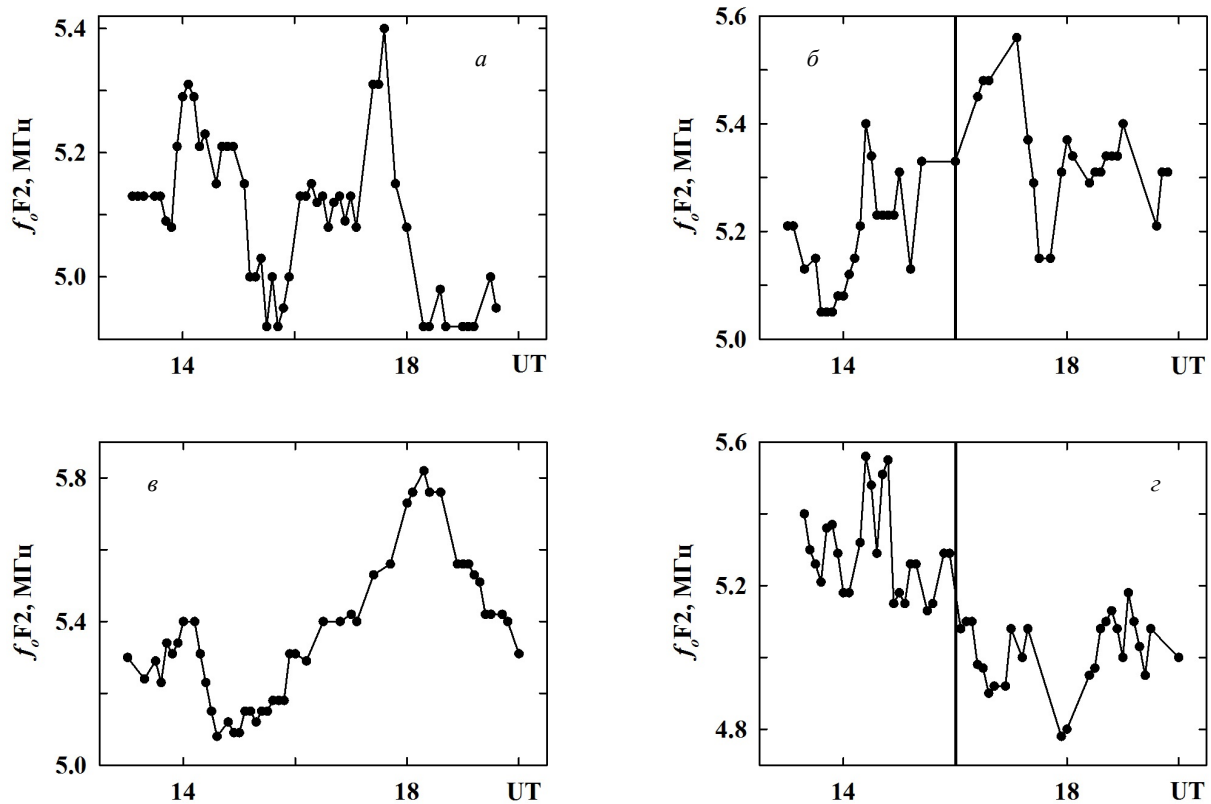


Рис. 3 – То же, что и на рис. 1, для: а – 26.06.2011 г.; б, в – 27.06.2011 г. и г – 28.06.2011 г.

уменьшилась до локальных минимальных значений, которые наблюдались с 16:54 до 17:52, после чего f_xF2 несколько возросла, и третий локальный максимум наблюдался в 18:12.

7 мая 2014 г. поведение f_xF2 также отличалось от ее поведения в день СР (см. рис. 2, в). С 09:00 до 16:02 наблюдались квазипериодические колебания f_xF2 . После 16:02 f_xF2 постепенно увеличилась до своих максимальных значений, которые наблюдались с 17:50 до 18:26, и после этого стала медленно убывать.

Опишем временные зависимости критической частоты f_xF2 по данным ионозонда вблизи г. Лонгвир 6 мая 2014 г. (см. рис. 2, г). С 09:58 f_xF2 уменьшалась с небольшими флуктуациями до своих минимальных значений, наблюдаемых с 11:54 до 11:58. Потом f_xF2 возрастает до своих локальных максимальных значений, наблюдаемых с 13:24 до 13:34. После этого и после СР наблюдается локальный минимум f_xF2 в 13:58. После 13:58 f_xF2 немного возрастает с небольшими флуктуациями, но в 16:06 наблюдался третий локальный минимум f_xF2 , после чего она немного возросла.

Рассмотрим временные вариации частоты f_oF2 в день старта ракеты “Союз” 27 июня 2011 г. в 16:00, а также в предыдущий старту и следующий после старта день (см. рис. 3).

Как видно из рис. 3, а, 26 июня 2011 г. f_oF2 после своего локального максимума в 14:06 монотонно уменьшалась до своего локального минимального значения в 15:42, испытывая небольшие флуктуации. После этого f_oF2 несколько увеличилась и в период 16:06 – 17:06 слабо изменялась. Затем она резко

возросла до своего максимального значения в 17:36 и потом также резко уменьшилась до своих минимальных значений, которые наблюдались в интервале 18:18 – 19:12.

27 июня 2011 г., в день СР, поведение f_oF2 сильно отличалось от ее поведения 26 июня 2011 г. (см. рис. 3, б). До СР в период 15:24 – 16:00 f_oF2 не изменялась, а после СР стала увеличиваться до своего максимального значения в 17:06, потом резко уменьшилась до своих локальных минимальных значений, которые наблюдались с 17:30 до 17:42. После этого f_oF2 несколько возросла до своего локального максимума в 18:00, после чего второй локальный максимум наблюдался в 19:00.

28 июня 2011 г. поведение f_oF2 также имело некоторые особенности (см. рис. 3, в). Частота f_oF2 после локального максимума в 14:12 уменьшилась до своего минимального значения в 14:36, затем увеличилась до своего максимального значения в 18:18, испытывая небольшие флуктуации, и после этого стала убывать с небольшими квазипериодическими колебаниями.

По данным ионозонда вблизи г. Лонгвир, до момента старта в 16:00 наблюдались квазипериодические волновые колебания f_oF2 (см. рис. 3, г). С 15:48 до 15:54 имел место локальный максимум f_oF2 . После СР f_oF2 стала убывать с небольшими флуктуациями до своего минимума в 16:36. После этого наблюдались два небольших локальных максимума в 17:00 и 17:18, а затем f_oF2 снова уменьшилась до своего локального минимума в 17:54. Потом имело место возрастание f_oF2 до

локального максимума в 19:06 с последующим уменьшением ее значений.

Обсуждение результатов. Проанализируем временные вариации критических частот f_oF_2 , которые могут быть вызваны стартом ракеты “Союз”. Как видно из рис. 1, б, имели место квазигармонические вариации f_oF_2 с квазипериодом 30–40 мин, которые начались примерно в 14:30 и продолжались до 16:00. Его амплитуда равнялась около 0.05 МГц. Если подавление колебаний связано с СР, то время запаздывания возмущений составило около 1 часа. С учетом расстояния от ионозонда до космодрома Плесецк горизонтальная скорость распространения возмущений v составляет около 340 м/с. Из рис. 1, а, в видно, что в соседние дни не наблюдалось волновых возмущений f_oF_2 с таким же или близким квазипериодом. Из-за плохого качества данных, полученных в этот же день с помощью ионозонда вблизи г. Лонгьир, подобные вариации f_oF_2 обнаружены не были (рис. 1, г).

Что касается СР, произошедшего 6 мая 2014 г. (рис., 2, б), то здесь эффекты старта менее заметны. С ним может быть связан квазигармонический процесс с периодом около 60 мин и амплитудой 0.2 МГц, начавшийся примерно через 30 мин после СР. Тогда $v \approx 680$ м/с. Следует отметить, что такого процесса не наблюдалось с помощью ионозонда вблизи г. Лонгьир (см. рис. 2, г). Кроме того, в соседние дни по данным ионозонда вблизи г. Тромсе также имели место подобные волновые возмущения (см. рис. 2, а, в).

Наконец, 27 июня 2011 г., по данным ионозонда вблизи г. Тромсе примерно через 40 мин после СР, наблюдались колебания f_oF_2 с периодом около 50 мин и амплитудой около 0.15 МГц. При этом $v \approx 500$ м/с. Важно, что квазипериодический процесс почти с таким же периодом и амплитудой около 0.1 МГц был зарегистрирован с помощью ионозонда вблизи г. Лонгьир (см. рис. 3, г). Время его запаздывания составило около 70 мин. Поэтому, с учетом расстояния до космодрома 2000 км $v \approx 475$ м/с. Это значение очень близко к тому, что наблюдалось с помощью ионозонда вблизи г. Тромсе, причем примерно на 20 мин позже. Таким образом, наблюдаемое возмущение, скорее всего, вызвано СР.

Все наблюдаемые волновые возмущения имели горизонтальную скорость, лежащую в диапазоне 340–680 м/с, что соответствует скоростям акустико-гравитационных волн (АГВ) на рассматриваемых высотах. АГВ, сопровождавшие СР, были обнаружены также по данным других наблюдений [2–8].

Выводы. Проанализированы временные вариации критических частот F-области ионосферы, сопровождавшие старты ракеты “Союз” с космодрома Плесецк, по данным двух ионозондов, расположенных на расстоянии около 1200 км и 2000 км от места старта соответственно. Выявлены волновые возмущения, наблюдавшиеся с запаздываниями 30–60 мин и около 70 мин относительно момента времени СР для ионозондов вблизи г. Тромсе и г. Лонгьир соответственно. Показано, что эти возмущения имеют горизонтальные скорости 340–680 м/с, которые

соответствуют скоростям АГВ на этих высотах. Дополнительным аргументом в пользу того, что возмущения 27 июня 2011 г. могут быть вызваны СР, является возрастание времени запаздывания с увеличением расстояния до космодрома.

Список литературы: 1. Chernogor L. F. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment / L. F. Chernogor, N. Blaunstein – Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group. 2014 – 534 p. 2. Живолуп Т. Г. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты “Протон”: результаты вертикального зондирования / Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 15–21. 3. Живолуп Т. Г. Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты “Союз” в спокойных и магнитовозмущенных условиях / Т. Г. Живолуп, Л. Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2010. – Т. 16, № 3. – С. 22–31. 4. Черногор Л. Ф. Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты “Протон” при различных состояниях космической погоды / Л. Ф. Черногор, Т. Г. Живолуп // Радиофізика і радіоастрономія. – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 394–403. 5. Бурмака В. П. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов / В. П. Бурмака, В. И. Таран, Л. Ф. Черногор // Геомагнетизм і аерономія. – 2004. – Т. 44, № 4. – С. 518–534. 6. Бурмака В. П. Комплексная диагностика ионосферной плазмы, возмущенной удаленными стартами ракет / В. П. Бурмака, Л. Ф. Черногор // Радиофізика і радіоастрономія. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 26–44. 7. Бурмака В. П., Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор. Статистические характеристики сигналов доплеровского ВЧ радара при зондировании средней ионосферы, возмущенной стартами ракет и солнечным терминатором / В. П. Бурмака, Л. С. Костров, Л. Ф. Черногор // Радиофізика і радіоастрономія. – 2003. – Т. 8, № 2. – С. 143–162. 8. Черногор Л. Ф. Геомагнитный эффект стартов и полетов крупных космических аппаратов / Л. Ф. Черногор // Косміческие исследования. – 2013. – Т. 51, № 6. – С. 455–469. 9. Rietveld M. T. The Tromsø Dynasonde / M. T. Rietveld, J. W. Wright, N. Zobotin, M. L. W. Pitteway // Polar Science – 2008. – V. 2, No 1. – P. 55–71.

Bibliography (transliterated): 1. Chernogor L. F. Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment / L. F. Chernogor, N. Blaunstein – Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group. 2014 – 534 p. 2. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. Ionosferniye efekty v techeniye polyota rakety “Proton”: rezul'taty vertikal'nogo zondirovaniya // Kosmichna nauka i tehnologiya – 16.3 (2010): 15–21. Print. 3. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. Ionosferniye efekty v techeniye polyotov rakety “Soyuz” v spokoynyh i magnitovozmushchennyh usloviyah // Kosmichna nauka i tehnologiya. 16.3 (2010): 22–31. Print. 4. Chernogor L. F., Zhivolup T. G. Sravnitelnyy analiz ionosfernyh effektov v techeniye polyota rakety “Proton” pry razlichnyh sostoyaniyah kosmicheskoy pogody // Radiofizika i radioastronomiya – 16.4 (2011): 394–403. Print. 5. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. Volnovye vozmushheniya v ionosfere, sopushtvovavshie startam raket na fone estestvennyh perehodnyh processov // Geomagnetizm i aeronomiya – 44.4 (2004): 518–534. Print. 6. Burmaka V. P., Chernogor L. F. Kompleksnaya diagnostika ionosfernoy plazmy, vozmushchennoy udalennymi startami raket // Radiofizika i radioastronomiya. – 14.1 (2009) 26–44. Print. 7. Burmaka V. P., Kostrov L. S., Chernogor L. F. Statisticheskie karakteristiki signalov doplerovskogo VCh radara pri zondirovanii sredney ionosfery, vozmushhennoj startami raket i solnechnym terminatorom // Radiofizika i radioastronomiya. 8.2 (2003): 143–162. Print. 8. Chernogor L. F. Geomagnetnyy jeffekt startov i poletov krupnyh kosmicheskikh apparatov // Kosmicheskij issledovaniya. – 51.6 (2013): 455–469. Print. 9. Rietveld M. T. The Tromsø Dynasonde / M. T. Rietveld, J. W. Wright, N. Zobotin, M. L. W. Pitteway // Polar Science – 2008. – V. 2, No 1. – P. 55–71.

Поступила (received) 03.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Живолуп Тарас Григорович – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник Інституту іоносфери НАН і МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Живолуп Тарас Григорьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

Zhivolup Taras Grygorovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Research scientist of Institute of ionosphere, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: iion@kpi.kharkov.ua.

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.

Чорногор Леонід Феоктистович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри космічної радіофізики ХНУ імені В. Н. Каразіна МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

Черногор Леонид Феоктистович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры космической радиофизики ХНУ имени В. Н. Каразина МОН Украины, 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, Professor at Department of Space Radiophysics, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv; phone: (057) 707-55-61; e-mail: Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua.

РЕФЕРАТИ

УДК 628.396

Оцінка критичної частоти за даними радара некогерентного розсіяння / Д. В. Шаповалова, В. О. Пуляєв // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 3 – 6. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Розглянуто варіант реалізації процедури розрахунку добового розподілу критичних частот шару F2 іоносфери по константі радара некогерентного розсіяння. Через флуктуації значень константи проводиться її попереднє уточнення шляхом аналізу рівня фонового шуму на антенному вході радара. Достовірність розрахунку критичних частот підтверджується знаходженням реперних точок, для розрахунку яких використовується пошук критичної частоти по куту повороту площини поляризації радіохвилі при її випромінюванні.

Ключові слова: сигнал розсіяння, константа радара, критична частота, фонові шуми радара, поляризація радіохвилі.

УДК 550.388.1: 621.396.969

Визначення джерел перешкод від літальних апаратів та оцінка їх впливу на результати вимірювань параметрів іоносфери методом некогерентного розсіяння / Чепурний Я. М., Ємельянов Л. Я., Іскра Д. О. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 7 – 12. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

Проведено аналіз перешкод, які створюються відбиттями від літальних апаратів на відстані 100–400 км і приймаються боковими пелюстками діаграми спрямованості антени радара некогерентного розсіяння. Визначено умови, при яких можуть виникати перешкоди від літальних апаратів, що знаходяться на висоті близько 10 км над поверхнею землі. Наведено експериментальні дані, що ілюструють вплив зазначених перешкод на результати вимірювань параметрів іоносфери.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, вимірювання іоносферних параметрів, відбиття від літальних апаратів.

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

Виявлення хвильових збурень концентрації електронів у варіаціях потужності некогерентно розсіяного сигналу / С. В. Панасенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 13 – 17. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Оцінено вплив відносних амплітуд і початкових фаз гармонічних варіацій концентрації електронів, температур електронів та іонів на відносні амплітуди потужності некогерентно розсіяного сигналу. Проведено комп'ютерне моделювання та розраховано відносні систематичні похибки оцінки відносної амплітуди концентрації електронів. Продемонстровано, що для наведених у літературі співвідношень між іоносферними параметрами максимальна відносна систематична похибка визначення відносних амплітуд хвильових збурень концентрації електронів звичайно не перевищує 0.4 – 0.5.

Ключові слова: некогерентне розсіяння, квазігармонічні варіації, хвильові збурення, комп'ютерне моделювання, систематична похибка.

УДК 621.314.26

Мікропроцесорна система керування двоканальним компенсатором з fuzzy-регулятором / О. О. Левон, І. Ф. Домнин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 18 – 22. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Здійснено мікропроцесорну реалізацію системи керування двоканальним компенсатором неактивних складових повної потужності з fuzzy-регулятором на базі мікроконтролера нечіткої логіки Motorola 68HC12. Показана можливість програмної реалізації цифрового fuzzy-регулятора системи керування двоканальним компенсатором у програмі fuzzyTECH.

Ключові слова: нечіткий регулятор, мікропроцесорна реалізація, фазифікація, функції приналежності.

УДК 550.388.2

Розриви неперервності добових змін електронної концентрації, обчисленої за моделлю NeQuick / С. В. Грінченко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 23 – 29. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Моделювання дозволяє обчислювати висотні профілі електронної концентрації для будь-якої точки земної кулі в широкому діапазоні висот у будь-який час доби. При побудові профілю електронної концентрації областей E, F1, F2 застосовуються аналітичні формули, що включають вирази для опису окремих шарів. Як параметри цих формул використовуються попередньо обчислені значення електронної концентрації і висот вершин шарів. Недостатня коректність алгоритмізації побудови електронної концентрації у сферах E, F1 призводить до деяких неточностей. Наприклад, при розрахунку добового ходу електронної концентрації в моменти часу, що відповідають з'явленню чи зникненню шару F1, відбувається розрив часової неперервності обчислення електронної концентрації. У статті наведено приклад добового ходу висотного профілю електронної концентрації, проведено аналіз причин, що викликають розрив неперервності залежності електронної концентрації від часу.

Ключові слова: іоносфера, іоносферні моделі, електронна концентрація, NeQuick, IRI.

УДК 621.372

Математичне та програмне забезпечення для імітаційного моделювання багатоступневих генераторів імпульсів напруги / В. П. Северин, О. М. Нікуліна, М. І. Ахтирцев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 30 – 35. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9998.

З використанням базової моделі одноступеневого генератора імпульсів напруги розроблена математична модель багатоступеневого генератора в режимі розряду з довільною кількістю каскадів. На основі створеної математичної моделі запропоноване програмне забезпечення для імітаційного моделювання електричних процесів, що протікають у генераторі. Проведений аналіз перехідних процесів в багатоступеневому генераторі показує його здатність формувати імпульси високої напруги з короткою тривалістю фронту.

Ключові слова: генератор імпульсів напруги, математична модель, диференціальні рівняння, системний метод інтегрування, імітаційне моделювання, програмне забезпечення.

УДК 550.388

Оцінка впливу іоносферних бур на іоносферні канали поширення радіохвиль по даним спостереження на харківському радарі некогерентного розсіяння / С. В. Кацко, Л. Ф. Черногор // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 36 – 40. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-9998.

Оцінено вплив іоносферних бур на іоносферні канали поширення радіохвиль. Підтверджено, що варіації параметрів іоносфери під час іоносферних бур викликають значну перебудову каналу поширення радіохвиль, а основні характеристики радіохвиль (фаза, амплітуда й ін.) при цьому значно змінюються. Проведено розрахунок зміни частоти зіткнень електронів з іонами, показника поглинання радіохвиль і частотної смуги іоносферного каналу для негативних і позитивних збурень під час магнітних бур 1998–2012 рр.

Ключові слова: іоносфера, іоносферна буря, канал поширення радіохвиль, коефіцієнт поглинання, частота зіткнень, частотна смуга.

УДК 621.39, 004.457

Мережевий додаток для автоматичної передачі даних результатів вимірювань обсерваторії Інституту іоносфери / С. С. Козлов, А. А. Лукашенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 41 – 44. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Розглянута можливість побудови локальної мережі на території комплексу некогерентного розсіяння. Представлено аналіз обсягів, часу утворення і внутрішніх структур файлів, які містять вихідні дані іоносферних вимірювань. Сформульовано основні вимоги до клієнт-серверного додатку для передачі даних на сервер. Розглянута реалізація мережевого додатку для автоматичної передачі результатів вимірювань. Реалізована мережева бібліотека динамічного компонування DLL.

Ключові слова: мережевий додаток, клієнт, сервер, електронна бібліотека, передача даних, алгоритм.

УДК 53.088.6:53.088.228:550.388

Систематичні похибки вимірювання концентрації електронів в іоносфері методом фарадеевського обертання та спосіб їх компенсації / Т. О. Скворцов, Л. Я. Ємельянов, А. В. Фисун // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 45 – 49. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Розглядається спосіб вимірювання концентрації електронів в іоносфері радарними некогерентного розсіяння з використанням ефекту Фарадея. Досліджуються систематичні похибки вимірювання, які з'являються у наслідок неточності поляризаційного налаштування приймальної антени. Отримано формулу для оцінки вказаних похибок і запропоновано спосіб, який дозволяє їх компенсувати навіть за неточним поляризаційним налаштуванням. Спосіб дозволяє також контролювати точність поляризаційного налаштування приймальної антени.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, концентрація електронів, ефект Фарадея, поляризаційний еліпс, помилки виміру, спосіб компенсації помилок.

УДК 621.396

Модернізація програмного забезпечення автоматичної станції вертикального зондування «Базис» / В. В. Барабаш, О. І. Лялюк, Г. М. Тіняков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 50 – 53. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Представлені результати зміни програмного забезпечення при обробці файлів, які містять експериментальні дані отримані за допомогою станції вертикального зондування, що входить до складу вимірювального комплексу Інституту іоносфери. Викладено причини для модернізації програмного забезпечення. Описано переваги та особливості розробленого програмного забезпечення для обробки експериментальних даних. Наведено опис функцій нового програмного забезпечення та їх зовнішній вигляд. Зроблено висновки про зниження помилок при обробці іонограм, збільшенні швидкості з якою здійснюється обробка, і часткової автоматизації збереження значень критичної частоти.

Ключові слова: обробка, експериментальні дані, програмне забезпечення, вертикальне зондування, програма, профіль

УДК 621.396

Практичні особливості та обмеження часового та висотного усереднення даних радара некогерентного розсіяння / О. В. Богомаз, Д. В. Котов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 54 – 58. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Розглянуто особливості часового і висотного усереднення автокореляційних функцій некогерентно розсіяного сигналу. Оцінено зверху допустимі значення інтервалів усереднення, при яких ще не виникають істотні зміщення оцінок параметрів іоносферної плазми. Обґрунтовано можливість часового усереднення даних на інтервалі до 60 хвилин. Показано, що при використанні простого довгого зондувального радіоімпульсу додаткове висотне усереднення може привести до неприпустимих спотворень висотно-часових варіацій параметрів іоносфери.

Ключові слова: іоносфера, метод некогерентного розсіяння, обробка даних, усереднення, трапецієподібне підсумовування.

УДК 550.388.2

Висотно-часові варіації руху нейтрального газу над Харковом / С. В. Грінченко, Д. А. Дзюбанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 59 – 63. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Наводяться розрахунки нейтрального вітру в інтервалі висот 110–300 км згідно моделі HWM93. Показано варіації величини та напрямку вітру протягом доби на різних висотах в умовах низької та високої сонячної активності.

Ключові слова: верхня атмосфера, іоносфера, вітер в іоносфері, модель горизонтальних вітрів HWM93.

УДК 550.388.2

Регіональна модель іоносфери CERIM ІОН за даними харківського радара некогерентного розсіяння: розрахунок температури електронів та іонів / М. В. Ляшенко, О. В. Сіладі // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 64 – 78. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2078-9998.

Для розробки модельного блоку регіональної моделі іоносфери CERIM ІОН, призначеного для розрахунку температури електронів та іонів, виконано аналіз експериментальних даних харківського радара некогерентного розсіяння у період з 1997 по 2013 рр. На основі експериментальних даних побудовано регресійні залежності температури електронів T_e та іонів T_i від індексу сонячної активності $F_{10,7}$ для місцевого півдня та півночі на висотах 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 і 750 км. Виконано аналіз отриманих залежностей. Приведено результати порівнювального аналізу експериментальних висотних залежностей температури електронів та іонів з висотними залежностями, розрахованими за регіональною моделлю іоносфери CERIM ІОН і глобальною моделлю іоносфери IRI-2007 для характерних геофізичних періодів – весняного та осіннього рівнодень, літнього та зимового сонцестоянь для фази мінімуму 23-го циклу сонячної активності.

Ключові слова: регіональна модель іоносфери, температура електронів та іонів, індекс сонячної активності

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

Квазіоптимальний прийом сигналів некогерентного розсіяння / Л. Я. Ємельянов, О. В. Богомаз, І. М. Касимов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 79 – 86. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2078-9998.

В результаті проведеного для широкого діапазону висот і різного стану космічної погоди аналізу спектральних характеристик некогерентно розсіяного (НР) іоносферою сигналу обґрунтовано необхідність квазіоптимальної фільтрації корисного сигналу. Розроблено

пристрій для квазіоптимальної фільтрації НР сигналів, призначений для роботи в складі радару НР для підвищення відношення сигнал/шум з мінімальними спотвореннями спектра корисного сигналу.

Ключові слова: радар некогерентного розсіяння, сигнал некогерентного розсіяння, фільтрація випадкових сигналів, спектр випадкового сигналу, іоносфера, пристрій квазіоптимальної фільтрації.

УДК 621.396, 004.032, 004.031

Розробка бази даних автоматичної іоносферної станції «Базис» інституту іоносфери та розробка системи моніторингу космічної погоди, що працює в режимі реального часу / А.Є. Мірошніков // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 87 – 93. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Описується розроблене програмне забезпечення, яке дозволяє отримати в зручному для користувача форматі параметри космічної погоди і дані автоматичної іоносферної станції "Базис" Інституту іоносфери. Розроблене оригінальне програмне забезпечення інтегровано з системою експрес-обробки Інституту іоносфери і якісно доповнює її.

Ключові слова: web-додаток, космічна погода, обробка, база даних, іоносферна станція.

УДК 550.388.2

Збурення критичних частот F-області іоносфери, що супроводжували старту ракети «Союз» з космодрому Плесецьк / Т. Г. Живолуп, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 94 – 99. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2078-9998.

Проаналізовано часові залежності критичних частот F-області іоносфери для трьох стартів ракети «Союз» з космодрому Плесецьк за даними двох іонозондів, що розташовані поблизу м. Тромсьо (Норвегія) і м. Лонг'їр (архіпелаг Свалбард, Норвегія). Виявлено квазіперіодичні варіації цих частот, що спостерігалися після стартів із запізненнями 30 – 60 хв і близько 70 хв для іонозондів поблизу м. Тромсьо та м. Лонг'їр відповідно. Періоди хвильових збурень склали 30 – 60 хв, а амплітуди дорівнювали 0.05 – 0.2 МГц. Горизонтальні швидкості поширення збурень відповідали швидкостям акустико-гравітаційних хвиль на висотах максимуму концентрації електронів.

Ключові слова: іонозонд, критичні частоти, старту ракет, хвильові збурення.

РЕФЕРАТЫ

УДК 628.396

Оценка критической частоты по данным радара некогерентного рассеяния / Д. В. Шаповалова, В. А. Пуляев // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 3 – 6. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Рассмотрен вариант реализации процедуры расчета суточного распределения критических частот слоя F2 ионосферы по константе радара некогерентного рассеяния. Из-за флуктуаций значений константы производится ее предварительное уточнение путем анализа уровня фоновых шумов на антенном входе радара. Достоверность расчета критических частот подтверждается нахождением реперных точек, для расчета которых используется поиск критической частоты по углу поворота плоскости поляризации излучаемой радиоволны.

Ключевые слова: сигнал рассеяния, константа радара, критическая частота, фоновые шумы радара, поляризация радиоволны.

УДК 550.388.1: 621.396.969

Определение источников помех от летательных аппаратов и оценка их влияния на результаты измерений параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния / Я. Н. Чепурный, Л. Я. Емельянов, Д. А. Искра // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 7 – 12. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9998.

Проведен анализ помех, создаваемых отражениями от летательных аппаратов на расстоянии 100–400 км и принимаемых боковыми лепестками диаграммы направленности антенны радара некогерентного рассеяния. Определены условия, при которых могут возникать помехи от летательных аппаратов, находящихся на высоте около 10 км над поверхностью земли. Приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие влияние указанных помех на результаты измерений параметров ионосферы.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, измерение ионосферных параметров, отражения от летательных аппаратов.

УДК 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

Выявление волновых возмущений концентрации электронов в вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала / С. В. Панасенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 13 – 17. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Оценено влияние относительных амплитуд и начальных фаз гармонических вариаций концентрации электронов, температур электронов и ионов на относительные амплитуды мощности некогерентно рассеянного сигнала. Проведено компьютерное моделирование и рассчитаны относительные систематические погрешности оценки относительной амплитуды концентрации электронов. Продемонстрировано, что для приведенных в литературе соотношений между ионосферными параметрами максимальная относительная систематическая погрешность определения относительных амплитуд квазигармонических вариаций концентрации электронов обычно не превышает 0.4 – 0.5.

Ключевые слова: некогерентное рассеяние, квазигармонические вариации, волновые возмущения, компьютерное моделирование, систематическая погрешность.

УДК 621.314.26

Микропроцессорная система управления двухканальным компенсатором с fuzzy-регулятором/ Е. А. Левон, И. Ф. Домнин // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 18 – 22. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN

Осуществлена микропроцессорная реализация системы управления двухканальным компенсатором неактивных составляющих полной мощности с fuzzy-регулятором на базе микроконтроллера нечеткой логики Motorola 68HC12. Показана возможность программной реализации цифрового fuzzy-регулятора системы управления двухканальным компенсатором в программе fuzzyTECH.

Ключевые слова: нечеткий регулятор, микропроцессорная реализация, фазификация, функции принадлежности.

УДК 550.388.2

Разрывы непрерывности суточных изменений электронной концентрации, вычисленной по модели NeQuick / С. В. Гринченко // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 37 (1146). – С. 23 – 29. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Модель NeQuick позволяет вычислять высотные профили электронной концентрации для любой точки земного шара в широком диапазоне высот в любое время суток. При построении профиля электронной концентрации областей E, F1, F2 применяются аналитические

формулы, включающие в себя выражения для описания отдельных слоёв. В качестве параметров этих формул используются предварительно вычисляемые значения электронной концентрации и высот вершин слоёв. Недостаточная корректность алгоритмизации построения профиля электронной концентрации в областях E, F1 приводит к некоторым неточностям. Например, при расчёте суточного хода электронной концентрации в моменты времени, соответствующие появлению или исчезновению слоя F1, происходит разрыв временной непрерывности вычисления электронной концентрации. В статье приведен пример суточного хода высотного профиля электронной концентрации, проведен анализ причин, вызывающих разрыв непрерывности зависимости электронной концентрации от времени.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные модели, электронная концентрация, NeQuick, IRI.

УДК 621.372

Математическое и программное обеспечение для имитационного моделирования многоступенчатых генераторов импульсов напряжения / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Н. И. Ахтырцев // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 30 – 35. – Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2078-9998.

При использовании базовой модели одноступенчатого генератора импульсов напряжения разработана математическая модель многоступенчатого генератора в режиме разряда с произвольным количеством каскадов. На основе созданной математической модели предложено программное обеспечение для имитационного моделирования электрических процессов, протекающих в генераторе. Проведенный анализ переходных процессов в многоступенчатом генераторе показывает его способность формировать импульсы высокого напряжения с короткой длительностью фронта.

Ключевые слова: генератор импульсов напряжения, математическая модель, дифференциальные уравнения, системный метод интегрирования, имитационное моделирование, программное обеспечение.

УДК 550.388

Оценка влияния ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн по данным наблюдения на харьковском радаре некогерентного рассеяния / С. В. Кацко, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 36 – 40. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2078-9998.

Оценено влияние ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн. Подтверждено, что вариации параметров ионосферы во время ионосферных бурь вызывают существенную перестройку каналов распространения радиоволн, а основные характеристики радиоволн (фаза, амплитуда и др.) при этом значительно изменяются. Проведен расчет изменения частоты соударений электронов с ионами, показателя поглощения радиоволн и частотной емкости ионосферного канала для отрицательных и положительных ионосферных возмущений во время магнитных бурь 1998–2012 гг.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферная буря, канал распространения радиоволн, коэффициент поглощения, частота соударения, частотная емкость.

УДК 621.39, 004.457

Сетевое приложение для автоматической перечачки данных результатов измерений обсерватории Института ионосферы / С. С. Козлов, А. А. Лукашенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 41 – 44. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Рассмотрена возможность построения локальной сети на территории комплекса некогерентного рассеяния. Представлен анализ объемов, время образования и внутренних структур файлов, содержащих исходные данные ионосферных измерений. Сформулированы основные требования к клиент-серверному приложению для передачи данных на сервер. Рассмотрена реализация сетевого приложения для автоматической передачи результатов измерений. Реализована сетевая библиотека динамической компоновки DLL.

Ключевые слова: сетевое приложение, клиент, сервер, электронная библиотека, передача данных, алгоритм.

УДК 53.088.6:53.088.228:550.388

Систематические ошибки измерения концентрации электронов в ионосфере методом фарадеевского вращения и способ их компенсации / Т. А. Скворцов, Л. Я. Емельянов, А. В. Фисун // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 45 – 49. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Рассматривается способ измерения концентрации электронов в ионосфере радарными некогерентного рассеяния с использованием эффекта Фарадея. Исследуются систематические ошибки измерения, которые возникают из-за неточной поляризационной настройки приемной антенны. Получена формула для оценки указанных ошибок и предложен способ, который позволяет их скомпенсировать даже при неточной поляризационной настройке. Способ позволяет также контролировать точность поляризационной настройки приемной антенны.

Ключевые слова: радар некогерентного рассеяния, концентрация электронов, эффект Фарадея, поляризационный эллипс, ошибки измерения, способ компенсации ошибок.

УДК 621.396

Модернизация программного обеспечения автоматической станции вертикального зондирования «Базис»/ В. В. Барабаш, А. И. Лялюк, Г. М. Тиняков // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 50 – 53. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2078-9998.

Представлены результаты изменения программного обеспечения обработки файлов содержащих экспериментальные данные полученные при помощи станции вертикального зондирования входящей в состав измерительного комплекса Института ионосферы. Изложены причины для модернизации программного обеспечения. Описаны преимущества и особенности разработанного программного обеспечения для обработки экспериментальных данных. Приведены описание функций нового программного обеспечения и их внешний вид. Сделаны выводы о снижении ошибок при обработке ионограмм, увеличении скорости с которой осуществляется обработка, и частичной автоматизации сохранения значений критической частоте.

Ключевые слова: обработка, экспериментальные данные, программное обеспечение, вертикальное зондирование, программа, профиль

УДК 621.396

Практические особенности и ограничения временного и высотного усреднения данных радара некогерентного рассеяния / А. В. Богомаз, Д. В. Котов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – X.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 54 – 58. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2078-9998.

Рассмотрены особенности временного и высотного усреднения автокорреляционных функций некогерентно рассеянного сигнала. Оценены сверху допустимые значения интервалов усреднения, при которых ещё не возникают существенные смещения оценок параметров ионосферной плазмы. Обоснована возможность временного усреднения данных на интервале до 60 минут. Показано, что при использовании

простого длинного зондирующего радиоимпульса дополнительное высотное усреднение может привести к недопустимым искажениям высотно-временных вариаций параметров ионосферы.

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

УДК 550.388.2

Высотно-временные вариации движения нейтрального газа над Харьковом / С. В. Грищенко, Д. А. Дзюбанов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 59 – 63. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Приводятся расчеты нейтрального ветра в интервале высот 110–300 км согласно модели HWM93. Показаны вариации величины и направления ветра в течение суток на различных высотах в условиях низкой и высокой солнечной активности.

Ключевые слова: верхняя атмосфера, ионосфера, ветер в ионосфере, модель горизонтальных ветров HWM93.

УДК 550.388.2

Региональная модель ионосферы CERIM ION по данным харьковского радара некогерентного рассеяния: расчет температуры электронов и ионов / М. В. Ляшенко, А. В. Силади // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 64 – 78. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2078-9998.

Для разработки модельного блока региональной модели ионосферы CERIM ION, предназначенного для расчета температуры электронов и ионов, выполнен анализ экспериментальных данных харьковского радара некогерентного рассеяния в период с 1997 по 2013 гг. На основе экспериментальных данных построены регрессионные зависимости температуры электронов T_e и ионов T_i от индекса солнечной активности $F_{10,7}$ для местного полдня и полуночи на высотах 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 и 750 км. Выполнен анализ полученных зависимостей. Приведены результаты сравнительного анализа экспериментальных высотных зависимостей температуры электронов и ионов с высотными зависимостями, рассчитанными по региональной модели ионосферы CERIM ION и глобальной модели ионосферы IRI-2007 для характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний для фазы минимума 23-го цикла солнечной активности.

Ключевые слова: региональная модель ионосферы, температура электронов и ионов, индекс солнечной активности

УДК 53.088.6:550.388, 621.396

Квазиоптимальный прием сигналов некогерентного рассеяния / Л. Я. Емельянов, А. В. Богомаз, И. М. Касымов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 79 – 86. – Библиогр.: 14 назв. – ISSN 2078-9998.

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

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

УДК 621.396, 004.032, 004.031

Разработка базы данных автоматической ионосферной станции «Базис» института ионосферы и разработка системы мониторинга космической погоды, работающей в режиме реального времени / А. Е. Мирошников // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 87 – 93. – Библиогр.: 10 назв. – ISSN 2078-9998.

Описывается разработанное программное обеспечение, которое позволяет получить в удобном для пользователя формате параметры космической погоды и данные автоматической ионосферной станции «Базис» Института ионосферы. Разработанное оригинальное программное обеспечение интегрировано с системой экспресс-обработки Института ионосферы и качественно дополняет ее.

Ключевые слова: статистические данные, обработка, класс, классификация, социологический опрос, алгоритм.

УДК 550.388.2

Возмущения критических частот F-области ионосферы, сопровождавшие старты ракеты «Союз» с космодрома Плесецк / Т. Г. Живолуп, С. В. Панасенко, Л. Ф. Черногор // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. – № 37 (1146). – С. 94 – 99. – Библиогр.: 9 назв. – ISSN 2078-9998.

Проанализированы временные зависимости критических частот F-области ионосферы для трех стартов ракеты «Союз» с космодрома Плесецк по данным двух ионозондов, расположенных вблизи г. Тромсе (Норвегия) и г. Лонгьер (архипелаг Свалбард, Норвегия). Обнаружены квазипериодические вариации этих частот, наблюдавшиеся после стартов с запаздываниями 30 – 60 мин и около 70 мин для ионозондов вблизи г. Тромсе и г. Лонгьер соответственно. Периоды волновых возмущений составили 30 – 60 мин, а амплитуды равнялись 0.05 – 0.2 МГц. Горизонтальные скорости распространения возмущений соответствовали скоростям акустико-гравитационных волн на высотах максимума концентрации электронов.

Ключевые слова: ионозонд, критические частоты, старты ракет, волновые возмущения.

ABSTRACTS

UDC 628.396

Determination of the critical frequency according Incoherent Scatter Radar / D. V. Shapovalova, V. A. Pulyayev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 3 – 6. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Examined a variant of the procedure realization for calculating the critical frequency, which is obtained by analysis a constant for the incoherent scatter radar. Due to fluctuations of the constant necessary of its preliminary refinement by analyzing the level of background noise at the radar antenna input. The accuracy of the calculation of the critical frequencies confirmed finding the reference points. For their calculate the search for the critical frequency from the angle of rotation of the polarization plane of the radiated radio waves is a necessary.

Keywords: scattering signal, a constant radar, the critical frequency, the radar background noises, the polarization of the radio waves.

UDC 550.388.1: 621.396.969

Determination of the sources of interference from the aircrafts and estimation of their impact on the results of ionospheric parameters measurement by incoherent scatter technique / Ya. M. Chepurnyy, L. Ya. Emelyanov, D. O. Iskra // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 7 – 12. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2078-9998.

We have analyzed the radio interference caused by reflections from aircrafts being at a distance of 100–400 km from incoherent scatter (IS) radar. The interference signals are received by side lobes of IS radar antenna pattern. Its duration is up to several minutes. The conditions for interference from aircrafts being at altitude of about 10 km were defined. We showed that interference are mainly received by IS radar of Institute of Ionosphere (Kharkiv) from the east and north-east directions. The experimental data illustrating the impact of interference from aircrafts on the results of ionosphere parameters measurement are presented.

Keywords: incoherent scatter radar, measurement of ionosphere parameters, reflections from aircraft.

UDC 550.388.2, 551.510.535, 537.874.4

Detection of wave disturbances of electron density in power variations of incoherent scatter signal / S. V. Panasenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 13 – 17. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

We estimated the effect of the relative amplitudes and initial phases of harmonic variations in the electron density, electron and ion temperatures on the relative power amplitudes of incoherent scatter (IS) signal. We obtained its dependence from the relative amplitudes of the ionospheric parameters (assuming they to be much less than unity), and the initial phase of the harmonic variations. It is shown that if the electron and ion temperatures vary in phase with the same relative amplitudes, the relative amplitude of the IS power signal is equal to a relative amplitude of the electron density. We performed a computer simulation and calculated the relative biases of estimates of the electron density relative amplitudes. The maximum relative bias in determining the relative amplitudes of quasi-harmonic variations of the electron density is demonstrated to not exceed generally 0.4 – 0.5 for the relations between ionospheric parameters from the published literature.

Keywords: incoherent scattering, quasi-harmonic variations, wave disturbances, computer simulation, bias.

UDC 621.314.26

Microprocessor control system implementation for dual-channel compensator with fuzzy-regulator/ O. O. Levon, I. F. Domnin // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 18 – 22. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

Implemented microprocessor implementation of fuzzy-control management system based on the dual-channel equalizer fuzzy logic microcontroller Motorola 68HC12. The possibility of a software implementation of digital fuzzy-regulator control system dual-channel equalizer in the program fuzzyTECH.

Key words: fuzzy-controller, microprocessor realization, fuzzification, membership functions.

UDC 550.388.2

Daily variation discontinuities of the electron density calculated from the model NeQuick / S. V. Grinchenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 23 – 29. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

NeQuick model allows to calculate the altitude profiles of the electron density for any point of the globe in a wide range of altitudes at any time. Analytical formulas for the description of the separated E, F1, F2 layers are applied in the construction of electron density profile for whole altitude region. The formula parameters used previously calculated the values of electron density and height of the layer peaks. The insufficient correctness of algorithmization results in some inaccuracies of construction of electron density profile in E, F1 regions. For example, when calculating of the daily variations of the electron density at the times corresponding to the appearance or disappearance of layer F1, there are time discontinuities. There are made an example of the daily variation of the electron density profile and the analysis of discontinuity causes.

Keywords: ionosphere, ionospheric models, electron density, NeQuick, IRI.

UDC 621.372

Mathematical model and software for the simulation of multi-stage voltage pulse generators / V. P. Severin, O. M. Nikulina, M. I. Ahtyrtsev // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 30 – 35. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2078-9998.

A mathematical model of multi-stage voltage generator in discharge mode with an arbitrary number of stages is designed using the basic model of a single-stage generator. Based on Kirchhoff's laws the mathematical model of multistage generator is written as an algorithm for an arbitrary number of stages. Based on the established mathematical model and the matrix method of integrating systems of differential equations the software for simulation of electrical processes in the generator is proposed in the programming environment Delphi. User-friendly interface allows the user to enter the number of stages and the parameter values of the generator and to receive graphics of transients of discharge of storage capacitors of the generator. The analysis of the transients in a multi-stage generator, conducted on the basis of the graphs for the generator with 10 stages indicates its ability to generate high-voltage pulses with a short rise time of a few nanoseconds.

Keywords: voltage pulse generator, mathematical model, differential equations, system integration method, simulation, software.

UDC 550.388

Estimation of the ionospheric storms influence on ionosphere radio waves propagation channel by the observation data at the Kharkiv incoherent scatter radar / S. V. Katsko, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 36 – 40. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

The ionospheric storms influence on ionosphere radio waves propagation channel is estimated. It is confirmed, that ionosphere parameters variations during ionospheric storms cause essential reconstruction of the radio waves propagation channel and at that main parameters of radio waves (phase, amplitude et al.) change. The calculation of variations of the electrons and ions collision frequency, the index of radio wave absorption and the frequency capacity of ionosphere channel for negative and positive ionospheric disturbances during magnetic storms of 1998–2012 are performed.

Key words: ionosphere, ionosphere storm, radio waves propagation channel, index of absorption, collision frequency, frequency capacity.

UDC 621.39, 004.457

Network application for automatic data peredachi measurements Observatory Institute ionosphere / S. S. Kozlov, A. A. Lukashenko // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 41 – 44. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

The possibility of building a network within the complex of incoherent scattering. An analysis of the volume, and the formation of the internal structures of the file containing the raw data of ionospheric measurements. The basic requirements for client-server applications to send data to the server. Realization of network application for the automatic transmission of measurement results. Implementing networking dynamic link library DLL.

Keywords: web application, client, server, e-library, data algorithm.

UDC 53.088.6:53.088.228:550.388

Bias errors of the ionospheric electron density measurement by the method of Faraday rotation and method for compensating these errors / T. A. Sckvortsov, L. Ya. Emelyanov, A. V. Fesun // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 45 – 49. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

The technique of measurement of the ionosphere electron density by incoherent scatter radars with the use of Faraday Effect is considered. Bias errors of electron density measurement that arise because of the inexact polarization adjustment of receiving antenna are studied. A formula for the estimation of the referred errors is obtained. The method for compensating these errors is offered. The method allows obtaining good estimation of the electron density even if polarization adjustment of the antenna is not accurate. The method allows also to control accuracy of the polarization adjustment of receiving antenna. The results of numerical simulation and experimental results obtained by incoherent scatter radar of Institute of Ionosphere (Kharkiv) are presented.

Keywords: incoherent scatter radar, electron density, Faraday Effect, polarization ellipse, measuring errors, technique for error compensation.

UDC 621.396

Software upgrades of the automatic station the vertical sounding "Basis" / V. V. Barabash, O. I. Lialuk, G. M. Tinyakov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 50 – 53. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2078-9998.

The changes to the software for processing files containing experimental data obtained by the station of vertical sounding which is part of the measuring complex of the Institute of ionosphere are presented. The reasons for software upgrades are described. The benefits and features developed software for the processing of experimental data are presented. Are descriptions of the functions of the new software, and their outward appearance. The methods of electron density profile calculation are listed and analyzed, for further automate processing. The conclusions on reducing the processing errors ionogram, increasing the processing speed, and partial automation of the conservation values of the critical frequency are made.

Keywords: processing, experimental data, software, vertical sounding, program, profile.

UDC 621.396

Practical features and limitations of time and altitude averaging of the incoherent scatter radar data / O. V. Bogomaz, D. V. Kotov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 54 – 58. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2078-9998.

The features of temporal and altitudinal averaging of the autocorrelation functions of the incoherently scattered signal are considered. An upper range of allowable values of averaging intervals in which has not had a substantial bias of the estimates of parameters of the ionospheric plasma is estimated. The possibility of temporal averaging of the incoherent scatter data over the interval up to 60 minutes is justified. It is shown that extra altitudinal averaging in case of using a simple long probing radio pulse can lead to unacceptable distortions of altitude-temporal variations of such parameters of ionospheric plasma as ionic composition, electron temperature and ion temperature.

Keywords: ionosphere, incoherent scatter technique, data processing, integration, trapezoidal summation.

UDC 550.388.2

Altitudinal and temporal neutral gas velocity variation over Kharkiv / S. V. Grinchenko, D. A. Dziubanov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 59 – 63. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9998.

Calculations of neutral wind velocity in height interval 110–300 km according HWM93 are demonstrated. Value and direction diurnal variations at different altitudes under low and high solar activity are shown.

Keywords: upper atmosphere, wind in the ionosphere, horizontal wind model HWM93.

UDC 550.388.2

Regional model of ionosphere CERIM ION based on Kharkov incoherent scatter radar database: electron and ion temperatures calculation / M. V. Lyashenko, O. V. Siladi // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 64 – 78. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2078-9998.

To develop the model block of the regional model of the ionosphere CERIM ION, destined to calculate the electron and ion temperatures, the analysis of experimental data of the Kharkov incoherent scatter radar in the period from 1997 to 2013 was carried out. On the basis of experimental data, the regression of temperature of electrons T_e and ions T_i from the solar activity index $F_{10.7}$ for the local noon and midnight at altitudes of 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700 and 750 km were constructed. The analysis of the obtained dependences was performed. The results of comparative analysis of experimental altitude dependences of the electron and ion temperatures with altitude dependences, calculated by the regional model of the ionosphere CERIM ION and global ionospheric model IRI-2007 for characteristic geophysical periods – the vernal and autumnal equinoxes, the summer and winter solstices for the 23d solar activity cycle minimum phase were presented.

Keywords: regional model of ionosphere, electron and ion temperatures, solar activity index.

UDC 53.088.6:550.388, 621.396

Compensation, estimation and control of influence of errors the polarization tuning of aerial on exactness of measuring of electrons density in an ionosphere by the method of Faraday rotation / L. Ya. Emelyanov, O. V. Bogomaz, I. M. Kasymov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 79 – 86. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2078-9998.

The necessity of quasi-optimal filtering of the incoherent scatter (IS) signal was grounded as a result of analyzing the spectral characteristics of the signal. The analysis was carried out for a wide range of heights of the ionosphere and for different space weather. For the analysis, we used the parameters of the ionosphere calculated using the international ionosphere model IRI-2007 and experimental data obtained by IS radar of Institute of Ionosphere (Kharkiv). Principles of filtering were developed. We have proposed to use low-pass filters with different characteristics to filter IS signals from several altitude ranges. A choice of a number of altitude ranges (number of filters) and their boundaries for each filter depends on the specific conditions of the ionosphere parameters measurements. If there are several processing units, the same number of filters can be simultaneously used for filtering the receiver output signal. With a single processing device, outputs of the filters are switched in moments of radar scan corresponding to the boundaries of altitude ranges. A device for the quasi-optimal filtering IS signals was developed for operation in the IS radar to improve the signal-to-noise ratio with minimal distortion of the useful signal spectrum.

Keywords: ionosphere, incoherent scatter radar, random signal filtering, random signal spectrum, quasi-optimal filtering device.

UDC 621.396, 004.032, 004.031

Development a automatic ionospheric station "Basis" database of the Institute of the ionosphere and the development a space weather online monitoring system / A. E. Miroshnikov // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 87 – 93. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2078-9998.

Describes developed software that allows you to get user parameters of space weather data and automatic ionospheric station "Basis" of the Institute of the ionosphere in a user-friendly format. An original software integrated with the express processing of the Institute of Ionosphere.

Keywords: web-application, space weather, processing, database, ionospheric sounding system.

UDC 550.388.2

Disturbances of F-region critical frequencies accompanying “Soyuz” rocket launches from Plesetsk cosmodrome / T. G. Zhivolup, S. V. Panasenko, L. F. Chernogor // Bulletin of NTU «KhPI». Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – No. 37 (1146). – P. 94 – 99. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2078-9998.

We analyzed temporal dependences of the F region critical frequencies of the ionosphere for three “Soyuz” rocket launches from the Plesetsk cosmodrome using data acquired by two ionosondes located near Tromsø (Norway) and Longyearbyen (Svalbard archipelago, Norway). We detected quasi-periodic variations of these frequencies observed with delays of 30 – 60 minutes and about 70 min after rocket launches for ionosondes near Tromsø and Longyearbyen, respectively. Periods of wave disturbances were 30 - 60 min and amplitude were equal to 0.05 – 0.2 MHz. The horizontal velocities of disturbance propagation corresponded to the velocities of acoustic-gravity waves on the heights of the maximum of electron density.

Keywords: ionosonde, critical frequencies, rocket launches, wave disturbances.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Шановалова Д.В., Пуляев В.А.</i> Оценка критической частоты по данным радара некогерентного рассеяния.....	3
<i>Чепурный Я.Н., Емельянов Л.Я., Искра Д.А.</i> Определение источников помех от летательных аппаратов и оценка их влияния на результаты измерений параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния	7
<i>Панасенко С.В.</i> Выявление волновых возмущений концентрации электронов в вариациях мощности некогерентно рассеянного сигнала	13
<i>Левон Е.А., Домнин И.Ф.</i> Микропроцессорная система управления двухканальным компенсатором с fuzzy-регулятором.....	18
<i>Гринченко С.В.</i> Разрывы непрерывности суточных изменений электронной концентрации, вычисленной по модели NeQuick.....	23
<i>Северин В.П., Нікуліна О.М., Ахтирцев М.І.</i> Математичне та програмне забезпечення для імітаційного моделювання багатоступеневих генераторів імпульсів напруги	30
<i>Кацко С.В., Черногор Л.Ф.</i> Оценка влияния ионосферных бурь на ионосферные каналы распространения радиоволн по данным наблюдения на харьковском радаре некогерентного рассеяния	36
<i>Козлов С.С., Лукашенко А.А.</i> Сетевое приложение для автоматической передачи данных результатов измерений обсерватории Института ионосферы	41
<i>Скворцов Т.А., Емельянов Л.Я., Фисун А.В.</i> Систематические ошибки измерения концентрации электронов в ионосфере методом фарадеевского вращения и способ их компенсации	45
<i>Барабаш В.В., Лялюк А.И., Тиняков Г.М.</i> Модернизация программного обеспечения автоматической станции вертикального зондирования «Базис».....	50
<i>Богомаз А.В., Котов Д.В.</i> Практические особенности и ограничения временного и высотного усреднения данных радара некогерентного рассеяния	54
<i>Гринченко С.В., Дзюбанов Д.А.</i> Высотно-временные вариации движения нейтрального газа над Харьковом.....	59
<i>Ляшенко М.В., Силади А.В.</i> Региональная модель ионосферы CERIM ION по данным харьковского радара некогерентного рассеяния: расчет температуры электронов и ионов.....	64
<i>Емельянов Л.Я., Богомаз А.В., Касымов И.М.</i> Квазиоптимальный прием сигналов некогерентного рассеяния..	79
<i>Мирошников А.Е.</i> Разработка базы данных автоматической ионосферной станции «Базис» Института ионосферы и системы мониторинга космической погоды, работающей в режиме реального времени	87
<i>Панасенко С.В., Живолуп Т.Г., Черногор Л.Ф.</i> Возмущения критических частот F-области ионосферы, сопровождавшие старты ракеты “Союз” с космодрома Плесецк.....	94
Рефераты	100
Рефераты.....	102
Abstracts.....	104

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
«ХПІ»**

Збірник наукових праць

Серія:
Радіофізика та іоносфера

№ 37 (1146) 2015

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

Відповідальний та технічний редактор: к.ф.-м.н. Ляшенко М.В.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук І.Б. Обухова

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61001, м. Харків, МСП, вул. Червонопрапорна, 16
тел. +38 (057) 707-65-27; *e-mail: iion@kpi.kharkov.ua*

Обл.-вид. № 36–15.

Підписано до друку 23.09.2015 р. Формат 21×29,7 1/8.
Папір офсетний. Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 6,5. Наклад 300 прим. Зам. № 067447.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вил Фрунзе, 21

Надруковано у ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРИНТ»
Свідоцтво № 24800170000040432 від 21.03.2001 р.
61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 16