

## ВЫДЕЛЕНИЕ ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ФИЛЬТРАМИ ЧЕБЫШЕВА

Д.Б. Рождественский, В.А. Телегин, В.И. Рождественская

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн, Россия, г.Троицк  
e-mail: veraro2011@yandex.ru

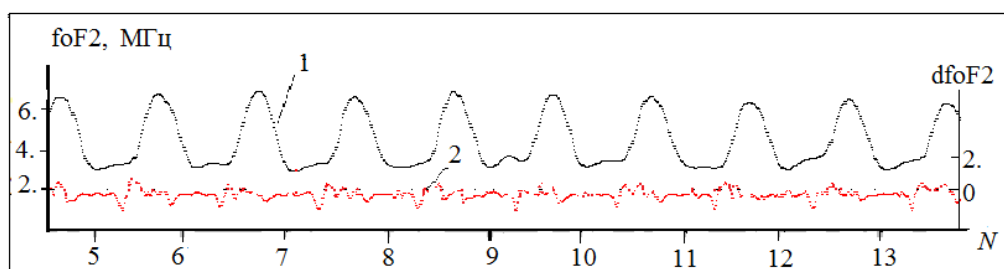
**Введение.** Анализ методов прогнозирования, показал, что адекватность прогнозирования в значительной степени зависит от спектрального состава прогнозируемого процесса и от его стабильности. Интервал прогнозирования определяется спектральной полосой процесса и увеличивается при ее уменьшении. При наличии периодических составляющих обработку целесообразно проводить специальными цифровыми фильтрами (Рождественский, Телегин, 2015). Для успешного прогноза  $f_oF2$  важным вопросом является выбор интервала дискретизации, т.е. как часто, для каких целей и на каком интервале необходимо проводить измерения. Выделение отдельных составляющих из данных критической частоты  $f_oF2$ : суточных, сезонных, годовых, многолетних проводилось по единой методике методами спектрального анализа. Так, для ионосферных параметров, измеренных с наивысшей частотой  $f_{\max}$  возможны диапазоны разбиения с минимальной частотой дискретизации: высокочастотный - 1/3 часа, суточный - 1/24 часа, сезонный - 1/3 мес., низкочастотный - 1/3 года и сверхнизкочастотный - 1/20 лет. Максимальная частота определяется интервалом дискретизации в данном диапазоне:  $[f_{\max}]_i = 1/2\Delta\tau_i$ . Разбиение процесса на отдельные частотные области позволило унифицировать технологию прогнозирования, увеличить точность прогнозирования, поскольку интервал экстраполяции пропорционален числу интервалов дискретизации, определить правила дальнейшей цифровой обработки с помощью численных методов.

### Фильтры Чебышева для выделения отдельных спектральных составляющих

При обработке ионосферных данных наиболее широко используются расчет медианных значений и вычисление средних значений (Cander, Mihailovic, 1998; Deminov et al., 2009; Bilitza, 2000).

Для выделения медленно меняющихся составляющих процесса, осреднения данных и их сглаживания применяются цифровые фильтры скользящего арифметического среднего, особенности частотной характеристики которого в полосе среза могут привести к появлению ложных составляющих из-за мимикрии частот.

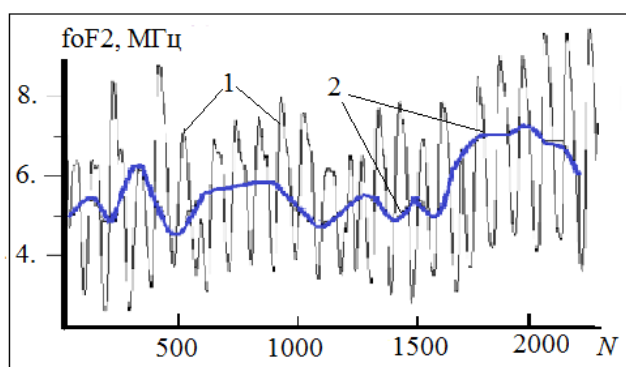
Алгоритм расчета медианы строится упорядочиванием данных по признаку возрастания их значений. Из возрастающей последовательности в качестве медианного значения берется средний отсчет. Операция расчета медианных значений сопровождается появлением кратных гармоник частотных составляющих исследуемого процесса, а также постоянной составляющей.



**Рисунок 1.** Суточный ход критической частоты после фильтрации (кривая 1), выделенная высокочастотная составляющая (кривая 2) для 5-13 дня марта 2012 г. Правая ось ординат для  $dfoF2$  кривой 2.

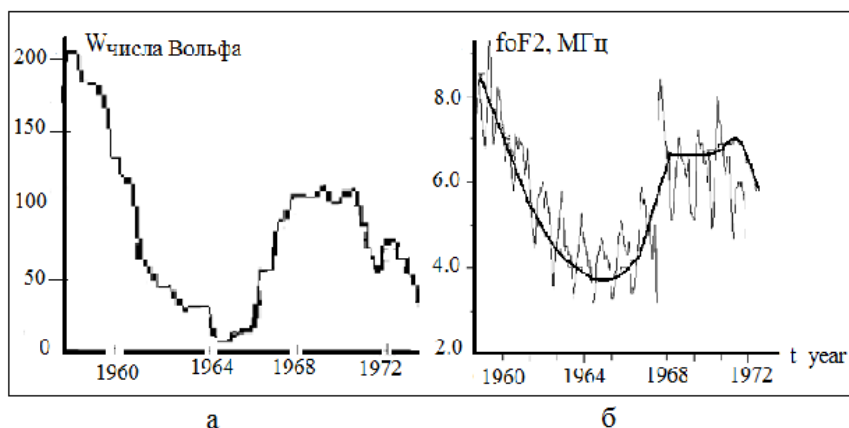
Спектральный анализ показал, что оптимальным оператором первичной обработки данных наблюдений является идеализированный фильтр исправленного непрерывного осреднения (ИНО), сочетающий фильтр скользящего среднего и идеальный фильтр низких частот, практическая реализация которого осуществляется так же цифровыми фильтрами Чебышева. Для полного исключения эффекта мимикрии частот, возникающего из-за дискретизации во времени, необходим фильтр с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) равной нулю при частотах, превышающих частоту Найквиста. В качестве частотной характеристики в полосе пропускания желаемого цифрового фильтра выбрана частотная характеристика непрерывного осреднения. Известно, что последовательное применение двух фильтров эквивалентно одному с АЧХ, равной произведению АЧХ составляющих фильтров. Следовательно, для выделения низкочастотных составляющих

можно рекомендовать цифровые фильтры, состоящие из последовательного применения фильтра непрерывного осреднения и идеального фильтра. Такой фильтр назовем фильтром исправленного непрерывного осреднения (ИНО) и будем считать его характеристики эталонными. Цифровой фильтр с частотной характеристикой, близкой к характеристике ИНО синтезирован с помощью методов аппроксимации. Цифровой фильтр Чебышева имеет частотную характеристику близкую к ИНО и степень подавления в полосе среза может достигнуть величины в 400 дБ (Rozhdestvenskii et al., 2015; Рождественский, 2011). На рис. 1 представлено выделение высокочастотной составляющей и составляющей суточного хода из измеренных значений  $foF2$ . Видно, что высокочастотная составляющая имеет максимальную амплитуду, не превышающую 1 МГц. При этом наибольшие значения наблюдаются в утренние часы и, как правило, они минимальны в ночные часы. Разделение спектральных составляющих, приведенное на рис. 2, позволяет проводить дальнейшие исследования и прогнозирование отдельно каждой составляющей в соответствии с поставленной задачей. На рис. 2 приведены выделение среднесуточных значений критической частоты ионосферного слоя F2 по ее 15-минутным измерениям.



**Рисунок 2.** Суточные составляющие критической частоты  $foF2$  для сентября 2012 г. (кривая 1), среднесуточные значения (кривая 2). По оси абсцисс отложены отсчеты 15-ти минутных значений по оси ординат значения критической частоты.

Среднесуточные вариации в сентябре не превышают 2 МГц. На рис. 3 приведено сравнение вариаций чисел Вольфа и среднегодовых вариаций  $foF2$  для одиннадцати лет 1958 -1972 гг.



**Рисунок 3.** Вариации чисел Вольфа (а) и многолетние вариации  $foF2$  (б) за 1960 -1972 гг.

На рис. 3б сплошная кривая получена осреднением часовых значений критической частоты за 11 лет с помощью цифровых фильтров Чебышева и последующим сжатием данных (Rozhdestvenskii et al., 2015). Видно хорошее соответствие приведенных характеристик. Нетрудно видеть, что долгопериодные составляющие  $foF2$  определяются только солнечными вариациями.

### Заключение

Технология цифровой фильтрации с высокой степенью подавления и получения процессов с ограниченным спектром, позволяет проводить качественный анализ экспериментальных данных, выделение различных спектральных составляющих, в том числе долгопериодных трендов для конкретных практических задач. На

основе 15-минутных ( $\Delta t$ ) данных критической частоты для среднеширотной станции Москва. проведен анализ данных с помощью фильтров Чебышева со степенью подавления 250 – 300 дБ, для решения задач организации надежных каналов радиосвязи и определения точек отражения волны от ионосферы. Приведенные вариации критической частоты демонстрируют широкие возможности методов фильтрации для исследования процессов в ионосфере и оценки вкладов отдельных составляющих.

### **Литература**

1. Cander L.R., Mihailovic S.J. Forecasting ionospheric structure during the great geomagnetic storms // J. Geoph. Res. V.103, No. A1, p.391-398. 1998
2. Zolesi B., Cander L.R. Ionospheric prediction and forecasting. Berlin.: Springer-Verlag, 240 p. 2014
3. Rozhdestvenskii D. B., Telegin V.A. Method of digital processing ionospheric data “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, pp. 153-156, 2015.
4. Rozhdestvenskii D.B, Rozhdestvenskaya V.I., Telegin V.A. Methods of digital filtration for processing ionospheric data “Physics of Auroral Phenomena”, Proc. XXXVIII Annual Seminar, Apatity, pp. 149-152, 2015.
5. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Какой солнечной и геомагнитной активности соответствует медиана критической частоты F2 – слоя на средних (разных) широтах // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 55, № 3. С. 343-349. 2015.(Т.56, №5. С.606-611. 2016)
6. Рождественский Д.Б. Аппроксимация функции с разрывами. Явление Гиббса. //Промышленные АСУ и контроллеры.2011, №4. С.32-36. ISSN 1561-1531
7. Рождественский Д.Б. Аппроксимация функции с разрывами. Метод демодуляции сложного сигнала. //Промышленные АСУ и контроллеры. 2011, № 10. С.15-24 ISSN 1561-1531.