



УДК 550.388.2

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ

В.В. Алпатов¹, В.Е. Орданович², Д.Б. Рождественский³

¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Россия, г. Москва

²Радиотехнический институт имени академика Минца А.Л., г. Москва

³Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва

Проведен анализ построения эмпирических справочных моделей ионосферы типа IRI, используемых для решения задач прогнозирования состояния ионосферы. Известно, что искомые модели достаточно быстро устаревают, и их приходится корректировать. Показано, при формировании ионосферных моделей типа IRI не учитывается фактор влияния низкочастотной составляющей, связанной с 11-летним циклом солнечной активности.

Анализ методов статистической обработки экспериментальных данных измерения состояния ионосферы показал наличие искажений, возникающих в результате использования скользящих методов расчета арифметического среднего и расчета медианы. Проведена оценка прогнозируемости параметров ионосферы и индексов Солнечной активности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ, МЕТОДЫ ОСРЕДНЕНИЯ, ЦИФРОВАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ, ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ

В плане совершенствования средств радиолокационного контроля воздушно -космического пространства постоянно ведутся работы, связанные с получением более достоверной координатной информации.

Одним из основных источников искажений при определении координат с помощью РЛС является среда распространения радиоволн, в частности ионосфера. При прохождении сложного радиолокационного сигнала через ионосферу изменяются параметры сигнала, что приводит к искажению радиолокационных данных. Для исключения искажений такого рода при обработке отраженного сигнала требуется учитывать влияние состояния ионосферы. В настоящее время пытаются решать задачу компенсации влияния ионосферы с помощью использования эмпирических моделей ионосферы справочного типа, строящиеся на основе данных измерений состояния ионосферы, проведенных в заданный интервал времени. Результаты измерений, подвергнутые обработке с помощью известных статистических методов, и являются искомой эмпирической моделью, которая описывает стационарное состояние ионосферы, и для получения адекватности ее существующим условиям достаточно учесть возмущающие факторы, используя параметры Солнечной и геомагнитной активности. Однако, как показал опыт использования ионосферных моделей типа IRI, получаемые с их помощью прогностические данные, например, критической частоты могут до 1 МГц отличаться от

наблюдаемых и сами эти модели периодически нуждаются в коррекции [1,2]. Достаточно сказать, что уже существуют модели IRI 2007, 2011, 2016. Кроме того, имеющая место некоторая временная задержка между моментами получения информации о состоянии ионосферы и зондирования РЛС, также приводит к увеличению неопределенности требуемых для радиосвязи параметров.

Цель работы – выяснить причины появления этих погрешностей и наметить пути к их возможному устранению.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для выявления причин появления новых моделей и необходимости их коррекции, а также уменьшения влияние задержки или неопределенности ионосферных параметров на момент проведения радиолокационного зондирования в области ответственности РЛС стояла задача провести исследование долгопериодных вариаций ионосферных данных и солнечной активности за период 1957-1988 гг. по данным станции вертикального зондирования Москва, начиная с методов первичной обработки данных.

Для первичной обработки данных были использованы методы цифровой фильтрации и спектрального анализа, для чего создан цикл алгоритмов и программное обеспечение. Спектральный анализ ионосферных процессов позволил, на наш взгляд, выявить причину устаревания существующих эмпирических моделей. При этом объектом исследования, связанным с «устареванием», являлись процессы с неопределенным и длительным периодом, или долгопериодические процессы.

Большинство процессов, протекающих в природе, имеет периодический характер. Любой реальный процесс $y(t)$, протекающий во времени t , с достаточной высокой точностью может быть представлен в виде суммы гармонических колебаний без каких-либо ограничений относительно спектрального состава

$$y(t) = \sum_i A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где A_i – амплитуда, ω_i – частота, φ_i – фаза i -й гармоники.

Представление процесса в виде уравнения (1) позволяет использовать аппарат спектрального анализа и избежать некорректных выводов, связанных с использованием представления исследуемого процесса в качестве линейного тренда. На основе спектрального анализа можно выделять долгопериодные вариации процесса, которые являются нелинейным трендом.

Полезной операцией при исследовании процесса является операция частотной селекции, или операция цифровой фильтрации. Фильтрация позволяет более детально исследовать процесс.

Выражение (1) можно также рассматривать в качестве модели, которая описывает изменчивость состояния параметров ионосферы. Наиболее просто в данной модели выражены естественные составляющие ионосферы, связанные с суточным вращением Земли и вращением ее вокруг Солнца. Данные вариации выделяются с помощью методов цифровой фильтрации при использовании цифровых фильтров взвешенного осреднения. Другие методы первичной обработки, такие как скользящее арифметическое среднее или скользящая медиана для выделения периодических составляющих использовать не следует, поскольку результаты этих операций могут содержать ложные составляющие, не существующие в реальном процессе. Определим причины погрешностей методов первичной обработки, основанных на принципах центральных тенденций. А также сформулируем требования к характеристикам цифровых фильтров, применяемым при первичной обработке данных наблюдения.

3. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОЛЬЗЯЩЕГО НЕПРЕРЫВНОГО ОСРЕДНЕНИЯ

Частотные характеристики вычисления средних значений представляют особый интерес. Во-первых, потому, что в гидрометеорологии и системах экологического мониторинга уделяется много внимания расчетам разнообразных средних по дням, месяцам, годам и т. д. и интересно, в какой степени итоги этой большой работы могут быть свободными от неустраняемых искажений из-за дискретизации.

Во-вторых, потому, что многие считают идеальной процедуру определения средних и сравнивают с ней другие способы фильтрации как с эталоном. И кроме того, операции вычисления среднего арифметического и скользящей медианы используются математической статистикой при решении задач прогнозирования.

Определим частотные характеристики непрерывного скользящего осреднения, а затем частотные характеристики цифрового осреднения.

Рассмотрим воздействие скользящего непрерывного осреднения на гармонический процесс

$$\mathcal{G} \approx \theta \cos(\omega t + \varphi), \tag{2}$$

среднее значение $\bar{\mathcal{G}}$ за интервал времени $\left[-\frac{T}{2}; +\frac{T}{2}\right]$ отнесенное к моменту t , равно

$$\bar{\mathcal{G}}(t) = \frac{\theta}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} \cos(\omega t + \varphi) dt = \theta \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \cos(\omega t + \varphi). \tag{3}$$

На рисунке 1 представлена операция непрерывного среднего в соответствии с выражением (3).

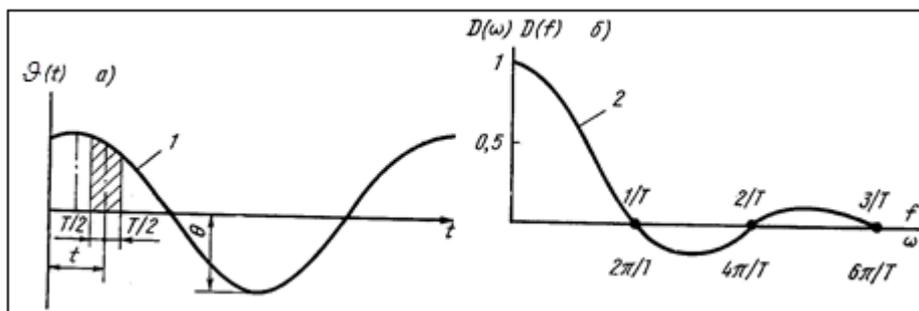


Рис. 1. Фильтр скользящего непрерывного среднего: а) – наблюдаемый процесс, б) – частотная характеристика скользящего среднего.

Выражение для $\bar{\mathcal{G}}$ может быть записано в виде:

$$\bar{\mathcal{G}}(t) = \bar{\theta}(\omega) \cos(\omega T + \varphi), \quad \text{где} \quad \bar{\theta}(\omega) = \theta \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} \tag{4}$$

откуда следует, что

$$D(\omega) = \frac{\sin \frac{\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}}, \quad D(f) = \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} \tag{5}$$

Выражение (5) названо амплитудно-фазовой характеристикой, так как собственно фазовые сдвиги отсутствуют, т. е. $\varphi(\omega) = 0$, но зато имеются инверсии фазы в точках $D(\omega) = 0$, где амплитуда $\bar{\theta}(\omega)$ меняет знак (рис. 1б). Эти особенности однозначно определяются выражением (5).

Рассмотрим на примере действие непрерывного скользящего осреднения как фильтра, уменьшающего неопределенность, для случая, когда осреднение проводится за сутки $T=1\text{сут}$, и результаты его фиксируются также раз в сутки, следовательно, частота Найквиста равна $\omega_H = \pi$,

$f_H = \frac{1}{2}$ 1/сут. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) скользящего среднего приведена на рис.

2 а. Подвергнем фильтрации процесс

$$y(t) = 20\cos\left(\frac{\pi}{180}t - \frac{\pi}{2}\right) + 5\cos(2\pi t + \varphi_2) + \cos(3\pi t + \varphi_3) + \cos(4\pi t + \varphi_4) + \cos(192\pi t + \varphi_5),$$

результатом будет (рис.2, б) $\bar{y}(t) = 20\cos\left(\frac{\pi}{180}t - \frac{\pi}{2}\right) - 0,21\cos(3\pi t + \varphi_3)$.

После дискретизации при $\Delta\tau = 1$ сут. и последующего восстановления получим:

$$\tilde{y}(t) = 20\cos\left(\frac{\pi}{180}t - \frac{\pi}{2}\right) - 0,21\cos(\pi t + \varphi_3),$$

в котором появилась отсутствовавшая ранее составляющая с двухсуточным периодом ($\omega = \pi$) и несобственной фазой (рис. 2, в). Если сдвинуть моменты, к которым относятся результаты осреднения на 16 ч, т.е. на период составляющей с частотой $\omega = 3\pi$, то восстановленный процесс будет представлен пунктирной линией. Следовательно, в результате осреднения содержится ложная составляющая с амплитудой $-0,21$.

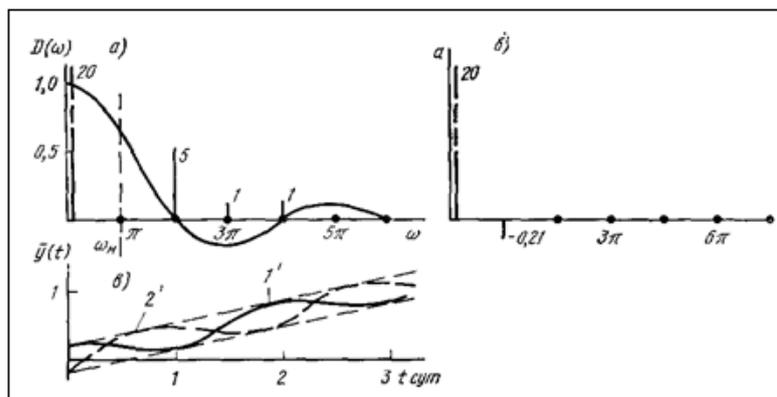


Рис. 2. Пример влияния мимикрии частот: а) – частотная характеристика скользящего непрерывного осреднения за сутки и спектр исходного процесса ($\varphi_i = 0$); б) – спектр восстановленного процесса ($\varphi_i = 0$); в) – восстановленный процесс: $1' - \varphi_3 = 0$, $2' - \varphi_3 = \pi$.

Отсюда следует, что непрерывное осреднение не лишено недостатков и не может считаться эталонным фильтром; т.е., среднесуточные данные не следует фиксировать только раз в сутки, если хотим получить результаты измерений, свободные от искажений.

4. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ МЕДИАНЫ

Метод скользящей медианы, или медианные фильтры, не лишены ряда недостатков, широко используются при обработке данных наблюдения. Операция расчета медианы последовательности дискретных отсчетов заключается в выделении центрального отсчета после упорядочивания последовательности по признаку возрастания и является полезной операцией для удаления неправдоподобных членов [3]. Медианная фильтрация является нелинейной операцией, ее целесообразно применять в сочетании с другими фильтрами, например, с низкочастотными фильтрами.

Для выявления основных свойств этих фильтров рассмотрим частотную характеристику медианного фильтра. Для этого построим зависимость амплитуды выходного сигнала медианного фильтра от частоты входного сигнала. С этой целью разработана программа расчета медианных значений и расчета спектра выходного сигнала.

Алгоритм расчета медианы будем строить путем упорядочивания данных по признаку возрастания их значений на интервале в N отсчетов. Пусть N нечетно. Из набора упорядоченных данных берется средний отсчет с номером $N/2$. Значение среднего отсчета и является медианным значением. Расчет скользящей медианы осуществляется с использованием операции свертки. Подадим на вход фильтра скользящей медианы сигнал, равный $y(t) = \sin fa \cdot t$. На рисунке 3 представлены спектры входного сигнала и спектры выходного сигнала процедуры скользящей медианы.

Как следует из рис. 3а, операция медианного осреднения является нелинейной, в результате осреднения происходит искажение спектра: возбуждаются ложные составляющие на нулевой частоте и на частотах кратных гармоник. Для построения АЧХ воспользуемся методом экспериментального определения АЧХ, путем подачи на вход оператора «медианы» синусоидального сигнала $y(t) = \sin fa \cdot t$ с разными значениями fa . Амплитудно-частотную характеристику получают путем построения амплитуды основной гармоники на выходе оператора «медианы», как функции от fa (рис.3 б), f_H - частота Найквиста.

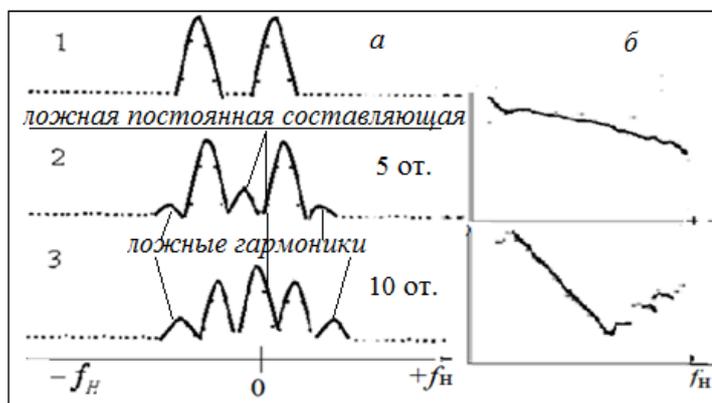


Рис. 3. Спектры входного и выходного сигналов медианного фильтра (а); б – АЧХ характеристика скользящей медианы: 1– спектр входного сигнала; 2– спектр медианного осреднения по 5-ти отсчетам; 3– спектр медианного осреднения по 10-ти отсчетам

Анализ частотных характеристик скользящего равновзвешенного и медианного осреднений говорит о существенных искажениях, присущих данным методам обработки. Специалисты по изучению геофизических процессов, которые широко используют данными методами, рискуют получить искаженные результаты, непригодные к дальнейшему использованию. Например, медианный фильтр вносит искажения в постоянную составляющую, что существенно искажает так называемый тренд процесса. Многие геофизики делают основные выводы на поведении именно трендов.

Амплитудно-частотная характеристика «медианы» не обладает избирательностью и не может использоваться, как цифровой фильтр нижних частот для решения задач частотной селекции. Любой цифровой фильтр нижних частот имеет значительно более эффективные характеристики по сравнению с медианным фильтром.

Известный в теории численных методов американский математик Дж. В. Тьюки называл операцию расчета медианы робастной оценкой скользящего среднего и использовал расчет медианы для выделения тренда (сглаживания). Кроме того, Тьюки считал, что операция «медиана» полезна для исключения неправдоподобных членов [1]. Следует, однако, отметить, что Тьюки, помимо скользящей медианы, применял дополнительно сглаживающий фильтр Хэннинга – эта совместная процедура называлась «Тьюки 53Х». А если учесть, что в «Тьюки 53Х» использовались последовательно две операции расчета медианы по 5-ти и 3-ем отсчетам, то можно утверждать, что операция сглаживания

осуществлялась цифровым фильтром Хэннинга, а «медиана» использовалась исключительно для удаления неправдоподобных отсчетов.

Таким образом, использование методов статистической обработки данных, а именно, скользящих режимов вычисления среднего арифметического и медианы в алгоритмах прогнозирования не целесообразно.

Далее определим требования к характеристикам вычисления осредненных значений данных наблюдения для решения задачи прогноза.

5. ФИЛЬТР ИСПРАВЛЕННОГО НЕПРЕРЫВНОГО ОСРЕДНЕНИЯ

Для решения задач прогнозирования необходимо предпринимать меры по подавлению эффекта Гиббса. Одним из источников возникновения колебаний Гиббса является эффект мимикрии частот, возникающий при восстановлении дискретного процесса в непрерывный в том случае, когда в дискретном процессе присутствуют частоты, превышающие частоту Найквиста. Для полного исключения эффекта мимикрии частот, возникающего из-за дискретизации во времени, необходим фильтр с АЧХ = 0 при частотах, превышающих частоту Найквиста.

Следовательно, требования к полосе среза фильтра формулируются однозначно.

Вопрос о желательных характеристиках в пределах полосы пропускания более сложен. Вообще говоря, для однозначного и обоснованного выбора фильтра необходимо знание характеристик входного процесса (например, его спектра), а также точное понимание того, какие характеристики выходного процесса необходимы. Если недопустимы искажения части процесса, спектр которой лежит в полосе пропускания, то выбор однозначен: необходим фильтр с прямоугольной АЧХ - идеальный фильтр нижних частот.

В некоторых случаях целесообразно применение фильтра нижних частот в сочетании с фильтрами другого типа. Примером обработки данных, при которой следует использовать такое сочетание, является нахождение средних значений. Одно непрерывное скользящее осреднение не обеспечивает фильтрацию, необходимую для устранения неопределенности, и это является его недостатком. Однако оно имеет и существенное достоинство: результат непрерывного осреднения соответствует физической природе таких метеорологических элементов, как температура, давление и т. п., значения которых по существу своему являются средними величинами. Последовательное применение непрерывного осреднения и идеального фильтра нижних частот сохраняет достоинства непрерывного осреднения и устраняет его недостатки.

Известно, что последовательное включение двух фильтров эквивалентно одному с АЧХ, равной произведению АЧХ составляющих фильтров. На рисунке 4 представлена АЧХ последовательного применения непрерывного осреднения и идеального фильтра нижних частот; в полосе пропускания она повторяет АЧХ непрерывного осреднения, в полосе среза АЧХ = 0.

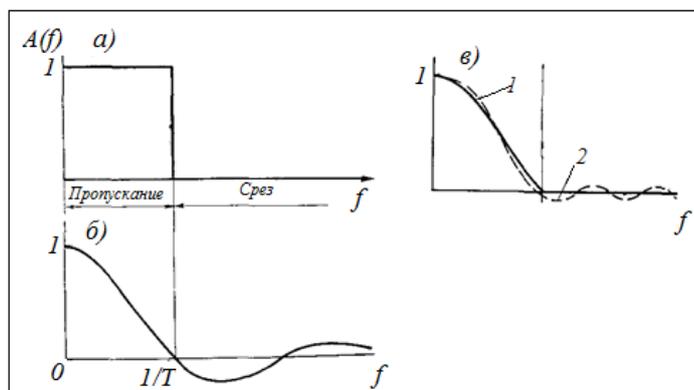


Рис. 4. Частотные характеристики фильтров: а) – идеальный фильтр нижних частот, б) – скользящее непрерывное осреднение, в) – фильтр ИНО, где:

$$1. \quad \text{частотная характеристика ИНО} = \begin{cases} D(f) = \frac{\sin \pi f T}{\pi f T} & f < \frac{1}{T} \\ D(f) = 0 & f > \frac{1}{T} \end{cases},$$

2. физически реализуемый фильтр.

Для устранения неопределенности необходимо, чтобы частота Найквиста лежала в полосе среза, т. е. чтобы результаты фильтрации, которую мы будем в дальнейшем называть исправленным непрерывным осреднением (ИНО), фиксировались не менее двух раз за время осреднения. Так, например, среднесуточные данные должны фиксироваться не менее двух раз в сутки. Учитывая достоинства фильтра типа ИНО, мы будем считать его характеристики эталонными.

6. РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ С АЧХ, БЛИЗКОЙ К ИНО. ЧЕБЫШЕВСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ

Чебышевские фильтры используются в различных радиотехнических устройствах с частотно-избирательными свойствами и в вычислительной практике как симметричные цифровые фильтры, осуществляющие взвешенное осреднение равноотстоящих отсчетов. Метод вычисления весовых коэффициентов чебышевских фильтров основан на использовании некоторых свойств полиномов Чебышева. Полином Чебышева первого рода может быть представлен согласно [4] следующим образом:

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x) \quad \text{при} \quad |x| \leq 1, \quad (6)$$

$$T_n(x) = ch(n \operatorname{arch} x) \quad \text{при} \quad |x| > 1,$$

n – порядок полинома.

Построение цифровых фильтров с аппроксимацией АЧХ с помощью полиномов Чебышева первого рода изложено в [5].

Чебышевские цифровые фильтры осуществляют взвешенное осреднение равноотстоящих отсчетов. На рисунке 5 приведены итоговые данные фильтра: весовые коэффициенты отсчетов, частотная характеристика и для сравнения характеристика ИНО. В главной части полосы пропускания отличие характеристик чебышевского фильтра и ИНО незначительно. Поэтому, для предварительной обработки данных наблюдений используются фильтры Чебышева. Для вычисления коэффициентов взвешивания фильтра b_n разработана рекуррентная схема, подобная треугольнику Паскаля для вычисления коэффициентов бинома Ньютона. Метод вычисления коэффициентов позволяет достигать величины степени подавления в полосе среза фильтра, равной 400 дБ. Оптимальные значения коэффициентов выделяющей функции подбираются опытным путем.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЦИФРОВОГО ЧЕБЫШЕВСКОГО ФИЛЬТРА

Методы цифровой фильтрации использованы для выделения долгопериодических вариаций ионосферы, связанных с одиннадцатилетними изменениями Солнечной активности. Для выделения долгопериодических вариаций процесса выбраны экспериментальные данные, измеренные на интервале, превышающем период исследуемой составляющей. В качестве исследуемого параметра ионосферы выберем ряд измерений критической частоты $foF2$, полученных с помощью станций вертикального зондирования АИС-1 в течение интервала 1957 – 1988 гг. Интервал между дискретными зондированиями на АИС-1 равен 1 часу. Обработке подвергался ряд длиной в 157752 отсчетов.

На рисунке 6 представлены результаты зондирования, полученные в течение интервала 1957 – 1988 гг. Явно выражен одиннадцатилетний цикл солнечной активности. Для выделения составляющей одиннадцатилетнего цикла воспользуемся цифровой фильтрацией, построенной с использованием нескольких последовательных КИХ фильтров и включающих механизм сжатия информации. Информация сжимается в процессе фильтрации, согласно следствию теоремы Котельникова, что позволяет избегать возникновения ложных частот из-за явления мимикрии частот. На рисунке 7 видно хорошее согласие вариаций чисел Вольфа и критической частоты, повторяющие 11-летние вариации. Результаты получены с помощью разработанных авторами алгоритмов и программного комплекса, панель управления которым представлена на рис. 8.

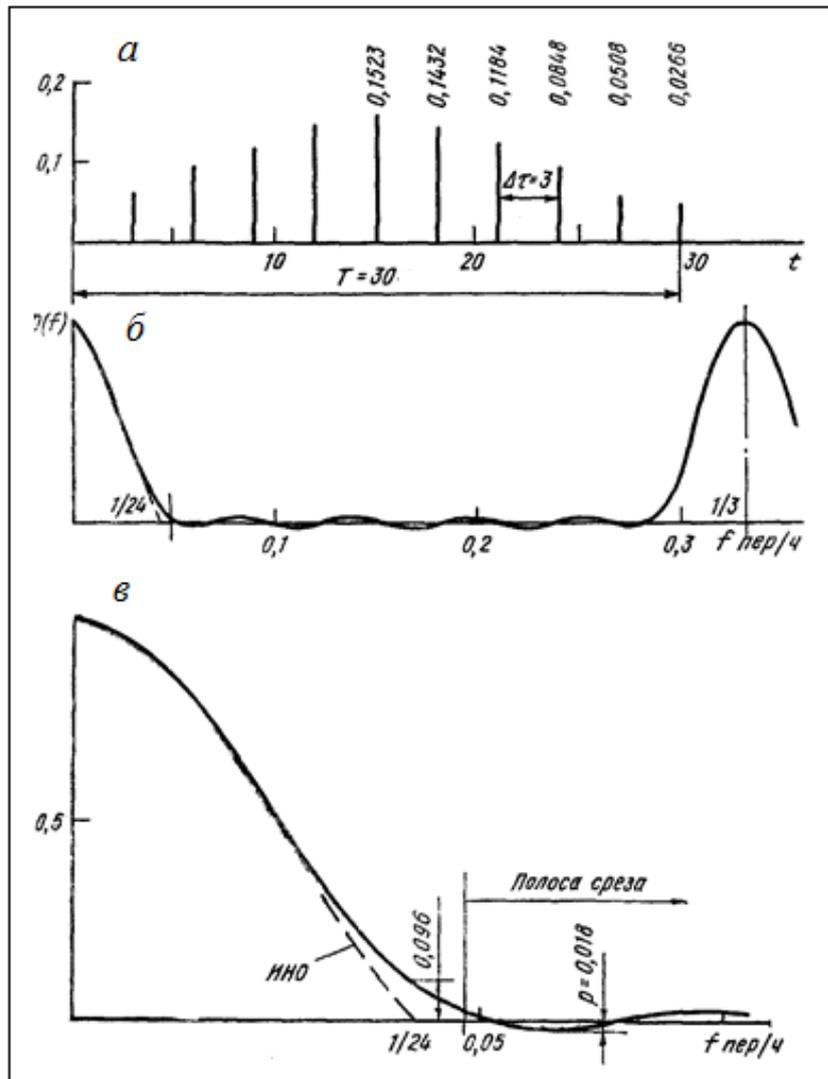


Рис. 5. Пример чебышевского фильтра: а – весовые коэффициенты для 11 отсчетов; б – частотная характеристика; в – сравнение АХЧ фильтров Чебышева и ИНО (пунктир).

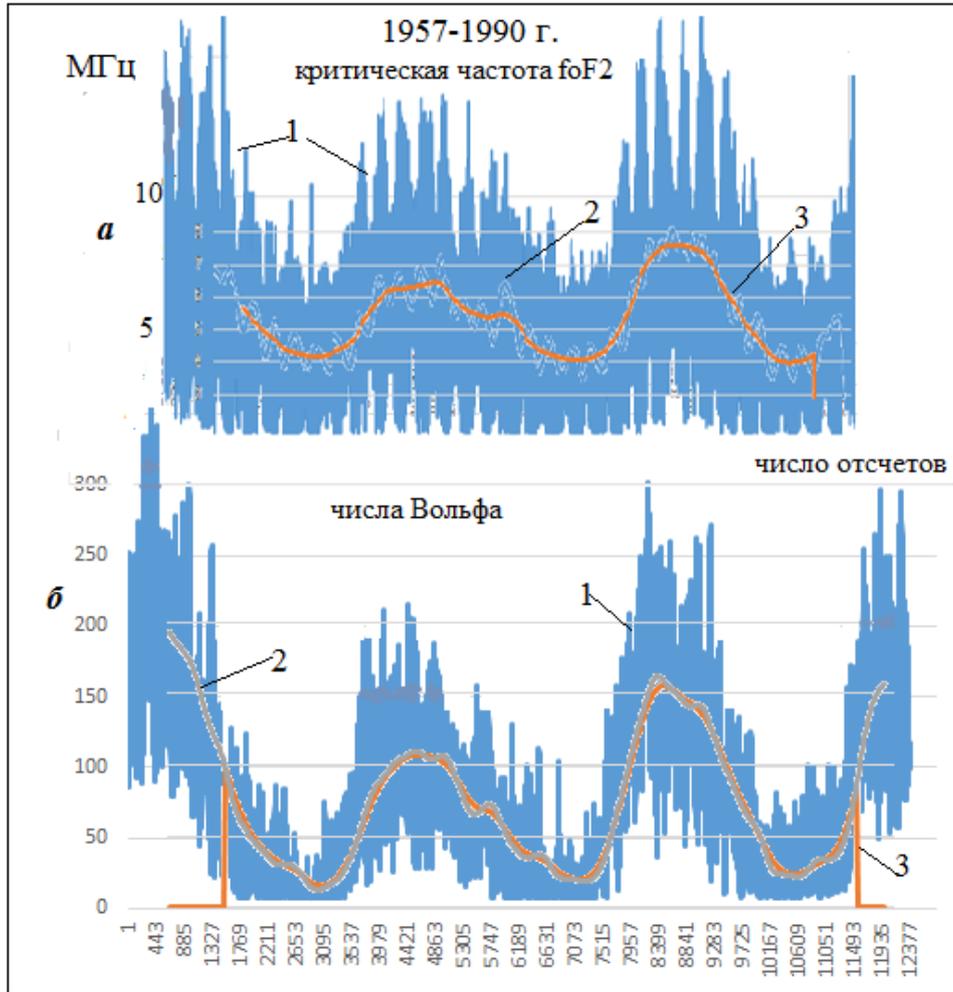


Рис.6. Результаты зондирования, полученные в течение интервала 1957 – 1988гг. 1 –измеренные данные, 2 – результат первой фильтрации, 3 – результат второй фильтрации

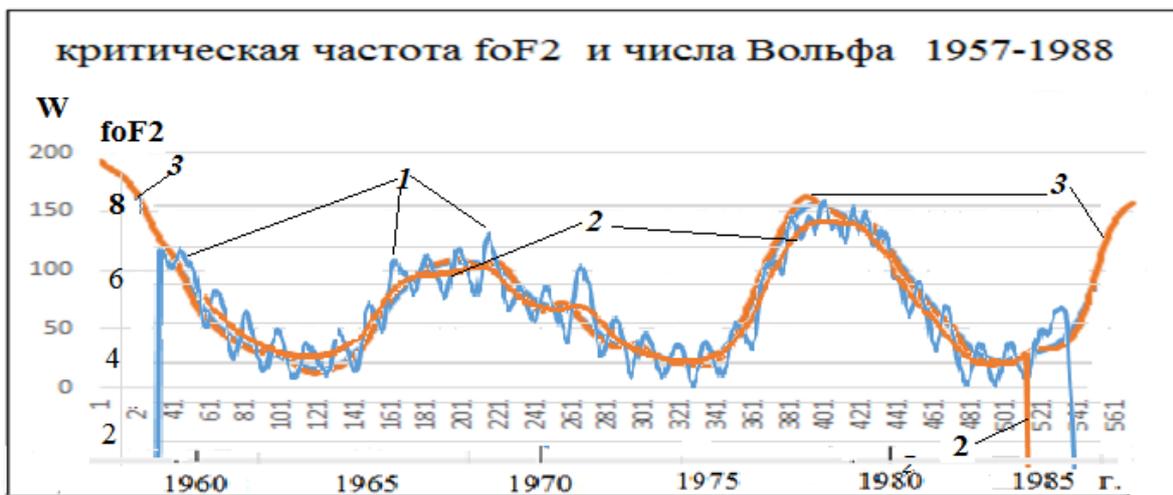


Рис. 7. Выделенные цифровыми фильтрами долгопериодные составляющие критической частоты слоя F2 и чисел Вольфа W: 1 – годовая составляющая критической частоты; медленноменяющаяся составляющая; 2 – критическая частота $foF2$; 3 – числа Вольфа W.

8. АНАЛИЗ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ПРОЦЕССА

Одной из наиболее важных операций обработки геофизических процессов является операция прогнозирования. Кроме того, операция прогнозирования, например, экстраполяция, может служить характеристикой степени прогнозируемости самого процесса. Как установлено в [6] необходимым и достаточным условием прогнозируемости является ограниченность спектра процесса (процесс является прогнозируемым, если он представляет собой произведение ограниченного по спектру процесса умноженного на прямоугольную функцию).

Опираясь на сформулированное выше предположение, подвергнем процедуре экстраполяции ряды, описывающие состояние ионосферы (значения критической частоты $foF2$, значения солнечной активности – числа Вольфа и радиоизлучения солнца на длине волны 10,7 см.).

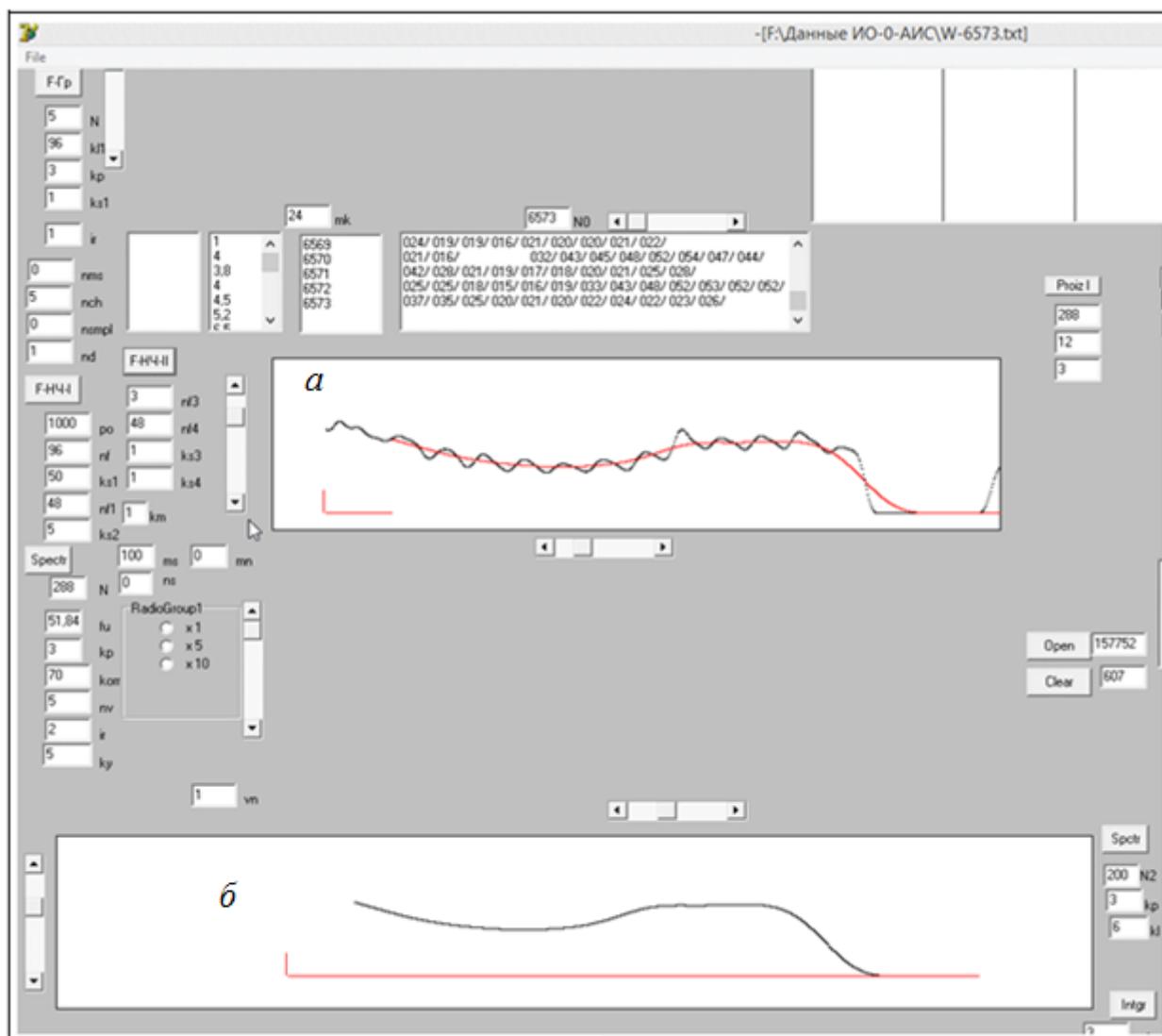


Рис. 8. Панель управления системы анализа сверхнизкочастотных составляющих критической частоты: *а* - выделение медленноменяющейся составляющей из данных критической частоты, *б* – долгопериодная вариация критической частоты (1957-1975 гг.)

На рисунке 9 представлен фрагмент результатов экстраполяции критической частоты $foF2$, чисел Вольфа W и потока радиоизлучения $F10.7$ для данных 1957-1975 гг.

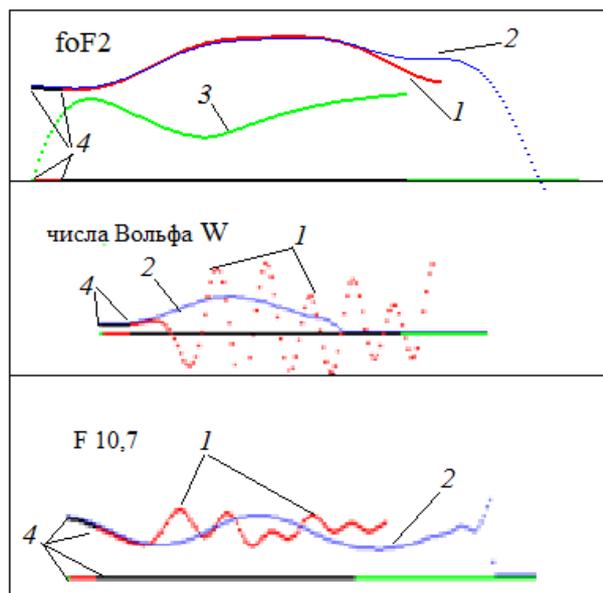


Рис. 9. Результаты прогнозирования параметров ионосферы и Солнца: 1(красная) – прогноз фильтрованных значений 2(синяя) – фильтрованные значения, 3 – дифференциальная неопределенность прогнозирования, 4 – исходная последовательность данных для прогнозирования.

Параметры Солнечной активности прогнозируются на интервал примерно 1–2 года, а для ионосферного параметра $foF2$ интервал экстраполяции в 5-10 раз больше (рис. 9).

По всей видимости, Солнце является крайне стохастической системой, по сравнению с ионосферой Земли, что затрудняет получение ограниченного по спектру процесса, предназначенного для прогнозирования.

9. ВЫВОДЫ

1. Сверхнизкочастотная составляющая критической частоты $foF2$ за пять лет может измениться от 2 до 4 МГц (см. рис.7). Скорее всего, это и является причиной «устаревания» эмпирических медианных моделей ионосферы. Если и можно ими пользоваться, то не более двух лет.
2. При первичной обработке данных наблюдения методами математической статистики (скользящие методы расчёта среднего арифметического и медианы) возможны искажения, которые могут причиной неправильных выводов.
3. Первичную обработку результатов наблюдения следует проводить с помощью фильтров с частотной характеристикой, близкой к характеристике исправленного непрерывного осреднения (ИНО).

ЛИТЕРАТУРА

1. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Какой солнечной и геомагнитной активности соответствует медиана критической частоты F2 – слоя на средних (разных) широтах // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 55, № 3. С. 343-349. 2015.(Т.56, №5. С.606-611. 2016)
2. Деминов М.Г., Деминова Г.Ф. Индекс солнечной активности для долгосрочного прогноза критической частоты F2-слоя // Геомаг. и Аэрон. 2019. – Т. 59. № 2. –С . 191–198. doi: 10.1134/S0016794019020068
3. Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Издательство «Мир», М: 1982.
4. Андре Анго. Математика для электро- и радиоинженеров. Из-во «Наука». – М: 1964.
5. Рождественский Д.Б., Проскурин С.В. Весовые коэффициенты выделяющей функции для цифрового управления. //Промышленные АСУ и контроллеры. 2012. №5. С. 16 – 22.
6. Рождественский Д.Б. Методические основы цифрового управления. //Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2011. №7 С 9 – 16.

LONG -PERIOD VARIATIONS OF IONOSPHERE PARAMETER

Alpatov V.V., Ordanovich V.E., Rozhdestvensky D.B.

The analysis of the construction of empirical reference models of the ionosphere type IRI, used to solve problems of forecasting the state of the ionosphere. It is known that the desired models quickly become obsolete, and they have to be adjusted. The existing number of IRI models allows us to make the assumption that the formation of the model does not take into account the influence of the low-frequency component associated with the 11-year cycle of solar activity. The analysis of methods of statistical processing of experimental data measuring the state of the ionosphere. The analysis showed the presence of distortions resulting from the use of moving average and median calculation methods. The predictability of the ionosphere parameters and solar activity indices is estimated.

KEYWORDS IONOSPHERE PARAMETERS, AVERAGING METHODS, DIGITAL FILTERING, PREDICTION