

УДК 550.388.2

## ДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПИВ ВО ВНЕШНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

П.Ф. Денисенко, А.А. Хомяков

В работе рассматривается методика детектирования волноподобных структур в ионосфере. Исходными данными являются ионограммы внешнего зондирования, зарегистрированные на борту ИСЗ. Для выделения квазиволновых структур использовался метод сингулярного спектрального анализа (SSA). Вычислены амплитуда, длина волны и фаза возмущения, ассоциируемого с крупномасштабным перемещающимся ионосферным возмущением.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПИВ, СПУТНИКОВОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ.

### ВВЕДЕНИЕ

Методика детектирования волновых возмущений в околоземной плазме по данным спутникового зондирования включает в себя два этапа. Первый этап — обращение ионограмм внешнего зондирования в высотные зависимости электронной концентрации,  $N_e(h)$ -профили, и получение двумерного распределения плотности плазмы вдоль орбиты ИСЗ описан в [1]. На рис. 1 показана пространственная картина распределения плазменной частоты  $f_N \propto \sqrt{N_e}$ , рассчитанная по исходным экспериментальным данным.

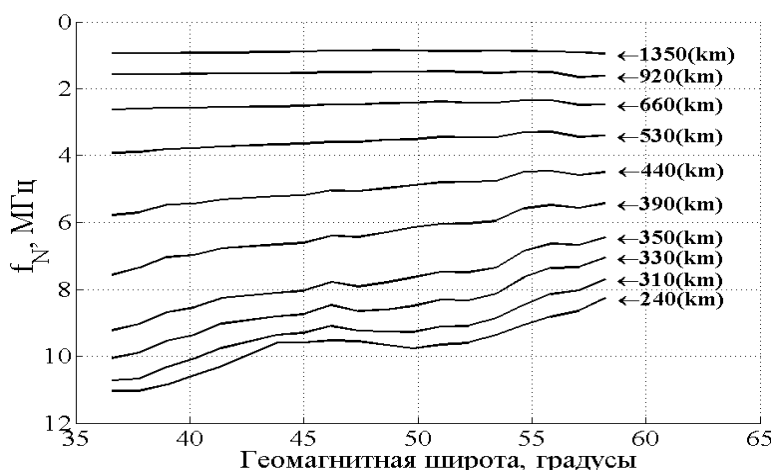


Рис. 1. Плазменные частоты  $f_N$  на фиксированных высотах в зависимости от геомагнитной широты, полученные по ионограммам ИСЗ «ISIS-2» 18.03.1973 в интервале времен с  $16^{\text{h}}28^{\text{m}}51^{\text{s}}$  по  $16^{\text{h}}35^{\text{m}}36^{\text{s}}$  UT.

Второй этап — определение квазиволновых структур, перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Центральной проблемой данного этапа является выделение ПИВ на фоне регулярных вариаций ионосферных параметров в функции какой-либо пространственной координаты.

### ВЫДЕЛЕНИЕ КВАЗИВОЛНОВЫХ СТРУКТУР НА ФОНЕ ШУМА И РЕГУЛЯРНЫХ ВАРИАЦИЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ SSA

Для выявления скрытых периодичностей на фоне тренда и шума применялся метод SSA (сингулярный спектральный анализ). Описание метода, его применений и ссылки на литературу можно найти в [2, 3]. Метод не требует стационарности ряда, знания модели тренда, а также сведений о наличии в ряде периодических составляющих и их периодах.

Пусть  $F=(f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$  – исследуемый ряд, т.е. плазменные частоты на фиксированной высоте в зависимости от геомагнитной широты. Методом SSA разложим его в сумму рядов, каждый из которых соответствует некоторой существенной стороне исследуемого явления (тренд, шум и, возможно, периодическая составляющая). Базовый алгоритм метода SSA состоит из четырех шагов [2-4]: вложение, сингулярное разложение, группировка и диагональное усреднение. Первые два в совокупности называются разложением, последние – восстановлением.

Процедура вложения позволяет получить повторяемость, не накладывая на ряд предварительных жестких ограничений. Введем целый параметр  $M$  (длина окна). Последовательно рассмотрим отрезки исследуемого ряда с первого элемента по  $M$ , со второго по  $M+1$  и т.д. Данные отрезки будут наследовать свойства ряда. Идеей метода SSA является исследование всей совокупности векторов вложений для выявления их общей структуры. Первый шаг заключается в формировании из ряда  $F$  траекторной матрицы  $X$ :

$$X = \begin{pmatrix} f_0 & f_1 & \dots & f_{K-1} \\ f_1 & f_2 & \dots & f_K \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{M-1} & f_M & \dots & f_{n-1} \end{pmatrix}$$

где  $M$  – длина окна,  $1 < M < n/2$ ;  $K = n - M + 1$  – количество векторов вложения.

Далее проводится сингулярное разложение матрицы  $X$ :

$$X = X_1 + X_2 + \dots + X_d, X_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T, \tag{1}$$

где  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_d \geq 0$  упорядоченные ненулевые собственные числа матрицы  $XX^T$ ;  $d = \max\{i : \lambda_i > 0\}$  – порядок сингулярного разложения;  $U$  и  $V$  – собственный и факторный векторы или левый и правый сингулярные векторы. Набор  $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$  называется  $i$ -й собственной тройкой сингулярного разложения. На третьем шаге проводится группировка компонент разложения:

$$X = X_{I1} + X_{I2} + \dots + X_{Im}, X_{Ij} = \sum_{k \in I_j} X_k. \tag{2}$$

Необходимо сгруппировать элементарные матрицы разложения (1) таким образом, чтобы одна группа (например,  $X_{I1}$ ) соответствовала тренду, другая ( $X_{I2}$ ) – периодической составляющей,  $X_{Ij}$  – шуму и т.д. На последнем шаге базового алгоритма SSA каждая матрица сгруппированного разложения переводится в новый ряд длины  $n$  путем диагонального усреднения [2, 3].

Результатом работы всего алгоритма SSA является разложение исходного ряда  $F$  в сумму аддитивных составляющих. В общем случае – это тренд, периодические составляющие и шум:  $F = F_{trend} + F_{cycle} + F_{noise}$ .

Результат разложения на компоненты для одного из экспериментальных рядов приведен на рис. 2, 3 (ИСЗ «ISIS-2», 18.03.1973,  $s$  – длина дуги на высоте  $h = 280$  км).

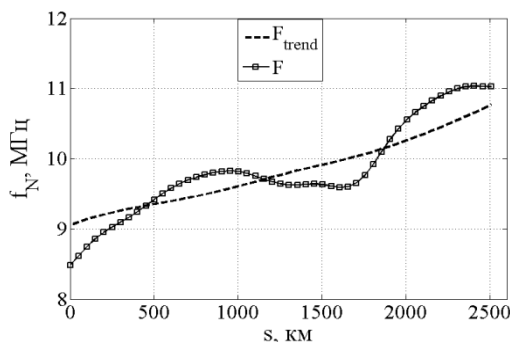


Рис. 2. Разложение экспериментальных рядов  $f_N$  на аддитивные составляющие: линия с квадратами — исходный ряд  $F$ , пунктир — тренд  $F_{trend}$ .

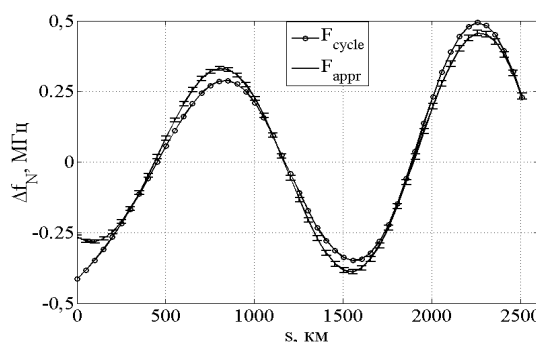


Рис. 3. Линия с кружками —  $F_{cycle}$ , Сплошная линия — аппроксимация экспоненциально модулированной гармоникой.

Общие правила группировки членов сингулярного разложения при идентификации составляющих ряда  $F$  приведены в [4]. Целью данной работы является выделение периодических составляющих и определение их параметров. Для этого необходимо во временной постановке задачи идентифицировать собственные тройки сингулярного разложения (2), соответствующие гармонике:

- компоненты, соответствующие гармоническим (и экспоненциально-модулированным гармоническим) составляющим, будут соседними, а на графике собственных чисел им будет соответствовать «ступенька»;
- периодограммы двух сингулярных векторов, соответствующих гармонике, должны иметь максимумы приблизительно при одном и том же значении частоты;
- сингулярные вектора, соответствующие гармонике, также будут гармоническими и имеют разницу в фазе примерно равную  $\pi/2$ .

После идентификации компонент ряда, соответствующих  $F_{cycle}$ , оценивается частота  $\omega$  и показатель  $\alpha$  экспоненциально модулированной гармоники. Метод определения параметров  $\omega$  и  $\alpha$  основан на использовании корней характеристического полинома линейной рекуррентной формулы (ЛРФ) [2]

$$F_{cycle} \approx Ae^{\alpha t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (3)$$

В нашем случае параметром, определяющим вариации ряда, является не время, а  $s$  — длина дуги на фиксированной высоте. Поэтому выражение (3), аппроксимирующее гармонику, трансформируется к виду:

$$F_{appr}(s) = A_p e^{\alpha s} \cos[k(s - L_0)], \quad (4)$$

где  $A_p$  — амплитуда пространственной гармоники;  $k = 2\pi/L$  — волновое число;  $L_0$  — начальная фаза. Параметры гармоники находятся путем минимизации квадратичного функционала

$$S(A_p, \alpha, L, L_0) = \sum_{i=1}^n [F_{cycle}(s_i) - A_p e^{\alpha s_i} \cos[k(s_i - L_0)]]^2$$

Пример выделения периодической составляющей отклонения от тренда плазменной частоты  $\Delta f_N$  для высоты 280 км (ИСЗ «ISIS-2», 18.03.1973,  $s$  — длина дуги на высоте  $h = 280$  км) представлен на рис. 3. Аппроксимируя гармоники для различных высот, получаем для условий эксперимента ИСЗ «ISIS-2», 18.03.1973 (геомагнитные широты  $58,2^\circ - 36,6^\circ$ ) высотный ход параметров возмущения, что отображено на рис. 4 и 5.

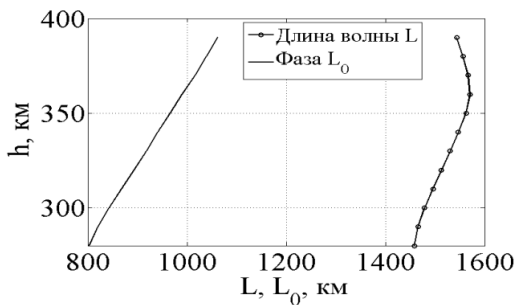


Рис. 4. Высотные зависимости длины волны  $L$  и начальной фазы  $L_0$ .

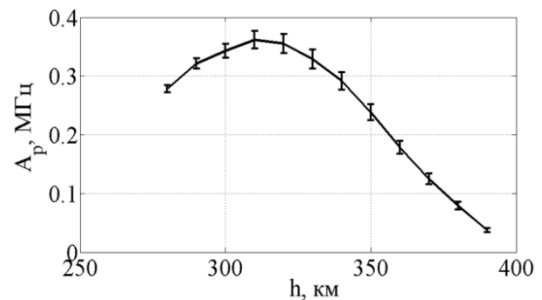


Рис. 5. Высотная зависимость амплитуды экспоненциально модулированной гармоники.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает высокую эффективность метода SSA при детектировании квази-волновых возмущений ионосферы. На примере слабых геомагнитных возмущений 18.03.1973 ( $K_p = 3$ ) выделены структуры, ассоциированные с крупномасштабными ПИВ. Определены высотные вариации параметров возмущения — длина волны, начальная фаза и амплитуда. Полученные результаты согласуются с концепцией о быстром затухании ПИВ на высотах более 500 км.

**DIAGNOSTICS OF LARGE-SCALE TID ACCORDING TO THE DATA OF SATELLITE TOPSIDE SOUNDING**

P.F. Denisenko, A.A. Khomyakov

In the paper the methodology of detecting wave like structures in ionosphere is considered. The initial data are the ionograms of topside sounding registered onboard satellite. For selection of quasi-wave structures the Singular Spectrum Analysis (SSA) is used. Amplitude, wavelength and phase of quasi-wave structures associated with the large scale travelling ionospheric disturbance are calculated.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, LARGE-SCALE TID, TOPSIDE SOUNDING.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Денисенко П.Ф., Сказик А.И., Хомяков А.А., Котов М.Ю. Выделение слабых пространственных структур ионосферы по данным внешнего зондирования// *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2010. Т. 15, № 5. С. 30–33.
2. Golyandina N., Nekrutkin V., and Zhigljavsky A. *Analysis of Time Series Structure: SSA and Related Techniques*. London: Chapman & Hall/CRC, 2001. 305 p.
3. Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница»/ Под ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. - СПб: Пресском, 1997. 308 с.
4. Голяндина Н.Э. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов. Учебное пособие. - СПб: ВВМ. 2004. 76 с.