

УДК 550.388.2

Я.Ф. АШКАЛИЕВ, С.Н. МУКАШЕВА

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРЫ

По данным станций вертикального зондирования Казахстана (Алматы, Караганда, Новоказалинск) проведен вейвлет-анализ пространственно-временных вариаций критических частот ( $f_0F2$ ) в период низкой (1986 г.) и высокой (1989 г.) солнечной активности, выявлены квази-пяти и тринадцатидневные временные периоды в F2-области ионосферы. Шестисуточная волна проявляется как отклик зональной планетарной волны в вариациях  $f_0F2(t)$  и совпадает с шестисуточными колебаниями в мезосфере и нижней термосфере.

Для выявления периодических составляющих из циклического временного ряда использован метод вейвлет-преобразования, основанный на разложении ряда по базису, сконструированному из солитоноподобной функции (вейвлета), и, соответственно, априорно не предполагает наличие какой-либо периодичности в исследуемом ряде. Вейвлет-анализ – это способ преобразования массива  $x(n)$  чисел от их фактических значений в массив  $W(a,b)$  вейвлет-коэффициентов. Основная идея вейвлет-преобразования состоит в разложении исходной функции  $f(t)$  по базису  $\psi((t-b)/a)$ , сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции [1, 2]. Здесь  $a$  – масштабный коэффициент,  $b$  – параметр сдвига. Таким образом, каждая функция  $f(t)$  может быть представлена суперпозицией масштабных преобразований и сдвига базисного вейвлета. Аналитическое выражение для вейвлет-преобразования имеет вид:

$$W(a,b) = a^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \psi((t-b)/a) f(t) dt. \quad (1)$$

В результате вейвлет-преобразования одномерного ряда  $f(t)$  получаем двумерный массив амплитуд – значений коэффициентов  $W(a,b)$  в частотно-временном пространстве. Как следует из формулы (1) возможность вейвлет-преобразования обусловлена свойствами функции, выбранной в качестве базиса разложения анализирующего вейвлет-преобразования и представляет скалярное произведение базисной функции на заданном масштабе и анализируемого ряда, то коэффициенты  $W(a,b)$  содержат суммарную информацию как о базисной функции, так и об анализируемом ряде.

Детальное описание теории вейвлет-анализа и его применения можно найти в работах [1, 3].

Далее в работе проанализированы пространственно-временные изменения критической частоты F2-слоя ионосферы по данным станции вертикального зондирования г. Алматы, г. Караганда и г. Новоказалинска за период с января по октябрь 1986 г. (год минимума солнечной активности) и с января по октябрь 1989 г. (год максимума солнечной активности), использован метод вейвлет-анализа.

Для выявления амплитуды ожидаемых временных масштабов (0.1–1.0 МГц) с периодами в несколько суток устраивались суточные вариации, для чего применялась следующая процедура обработки ионосферного параметра  $f_0F2(t)$  и формирование временных рядов  $\Delta f_0F2(t)$  используемые для вейвлет-анализа [6]. Во-первых, требуется перевести неравномерные исходные данные в равномерные без пропусков, проводя их интерполяцию. Затем, исходные данные  $f_0F2(t)$  разбиваются на интервалы по 8 суток и вычисляются почасовые средние значения в каждом интервале, которые затем вычитываются из исходных данных, а из остатков удаляется тренд, за счет подгонки линейной функции, из которой он вычитался. Таким образом, анализ ионосферного параметра  $f_0F2$  сводится к статистической обработке и формированию временных рядов  $\Delta f_0F2(t)$ , используемых как исходная информация для вейвлет-преобразования.

Нами использован комплексный вейвлет Морле [2], обычно используемый при вейвлет-преобразования геофизических временных рядов в форме:

$$\Psi(t) = \exp(i\omega_0 t/s) \exp(-t^2/2), \quad (2)$$

где  $t$  – время,  $s$  – масштаб вейвлета, а  $\omega_0$  – безразмерная частота.

На рисунке 1 представлены результаты вейвлет-преобразования временного ряда  $\Delta f_0 F2(t)$  критической частоты F-области ионосферы по данным зондирования ионосферы в г. Алматы (январь-февраль 1986 г.). Для уменьшения влияния эффекта завертывания ряд  $\Delta f_0 F2(t)$  в начале и конце дополнен средними значениями, вычисляемыми по всему ряду [1]. На рисунке 1а по вертикальной оси отложено отклонение критической частоты от среднего значения ( $\Delta f_0 F2$ ) в мегагерцах, по горизонтальной оси – время.

На рисунке 1б показан вейвлет-спектр: в результате применения вейвлет-преобразования к ряду  $\Delta f_0 F2(t)$  получен двумерный массив значений коэффициентов  $W(a,b)$ . Распределение этих величин в пространстве (частота-время) дает представление о вкладе составляющих разного масштаба и их изменениях во времени, что называется спектром коэффициента вейвлет-преобразования. По вертикальной оси откладывается масштабный коэффициент, а по горизонтальной – временная локализация или коэффициент сдвига. Вейвлет-коэффициенты содержат информацию о связи между вейвлетом и исходной функцией. Большая положительная амплитуда – высокую положительную корреляцию, а большая отрицательная амплитуда означает высокую отрицательную корреляцию. Темные области соответствуют положительным, а светлые отрицательным значениям  $W(a,b)$ . Картина коэффициентов демонстрирует, что процесс составляют компоненты разных масштабов: экстремумы  $W(a,b)$  наблюдаются в разных масштабах, интенсивность их меняется и со временем, и с масштабом.

На рисунке 1с показан глобальный спектр энергии коэффициентов вейвлет-преобразования. Вейвлет спектр энергии сигнала  $\Delta f_0 F2(t)$  – эквивалент Фурье-спектра, слаженному Морле-функцией в Фурье-пространстве [3]. Полная энергия распределена по масштабам в соответствии с глобальным спектром энергии коэффициентов вейвлет – преобразования

$$E_w = \int W^2(a,b) db \quad (3)$$

На рисунке 1 можно проследить изменение интенсивности амплитуд вейвлет-преобразования в разных масштабах, во времени, а также картины линий локальных экстремумов (так называемых "skeleton", четко выявляющих структуру анализируемого процесса).

Временные ряды  $\Delta f_0 F2(t)$  критических частот F2- области ионосферы по данным станций

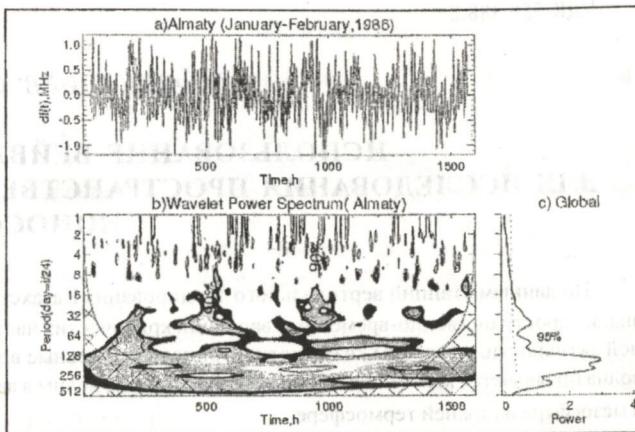


Рис.1. Пример вейвлет-преобразования  $\Delta f_0 F2(t)$  – критической частоты F-области:

(а) временной ряд  $\Delta f_0 F2(t)$ , (б) картина коэффициентов  $W(a,b)$ , (с) глобальный спектр.

вертикального зондирования в г. Караганда и Новоказалинск (январь-февраль 1986 г. и январь-февраль 1989 г.) также подвергались вейвлет-преобразованию с базисной функцией Морле.

На рисунке 2 представлены глобальные спектры энергии  $E_w$  коэффициентов вейвлет-преобразования. Они более гладкие, чем спектры

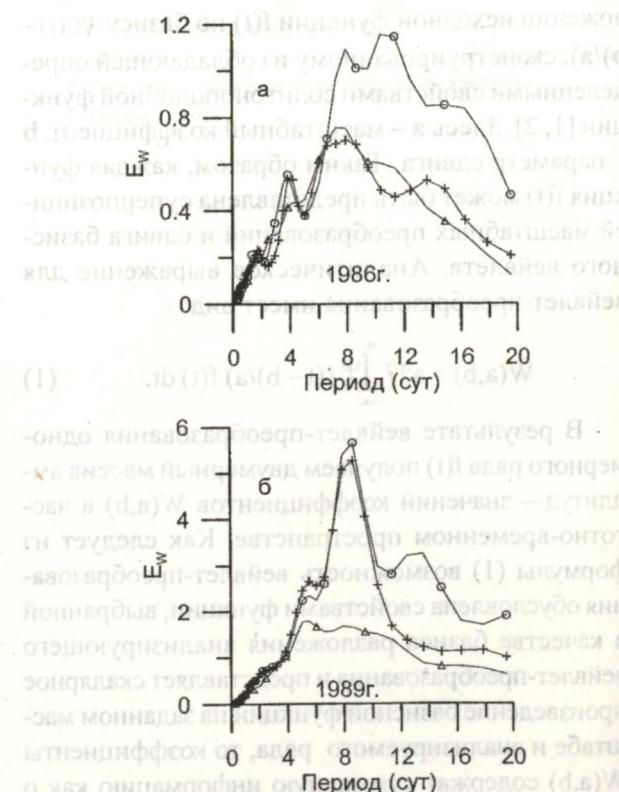


Рис.2 Глобальные вейвлет-спектры: г. Алматы (кружки), г. Караганда (крестики) и г. Новоказалинска (треугольники) в зависимости от периода в сутках.

получаемые по Фурье-преобразованию. Причина заключается в том, что вейвлет-спектр энергии сигнала  $E_w$  соответствует сглаженному спектру мощности.

Из рисунка 2а видно, что в год минимума солнечной активности пики соответствуют периодам: 1.7, 4.2, 7.9 сутки для станции вертикального зондирования в г. Алматы; 3.8, 7.9, 10.4 сутки для станции вертикального зондирования в г. Караганды; 2.7, 4.2, 7.2 сутки для станции вертикального зондирования в г. Новоказалинск. На рисунке 2б представлены глобальные спектры, вычисленные по вариациям критических частот измеренных в год максимума солнечной активности пики соответствуют периодам: 5.5 и 8.6 сутки для станции вертикального зондирования в г. Алматы; 5.5, 8.6 и 13.6 сутки для станции вертикального зондирования в г. Караганды; 5.5 и 7.9 сутки для станции вертикального зондирования в г. Новоказалинск.

По данным критических частот измеренных в Алматы пики приходятся на 5.5 и 8.6 суток, в Караганде выявлены временные масштабы 5.5, 8.6 и 13.6 суток. В Новоказалинске также проявляются 5.5, 7.9 суточные колебания критической частоты F области ионосферы над Казахстаном.

Следует отметить, что во всех трех пунктах четко проявляются квази-шестисуточные колебания, кроме того, имеются пики также с одинаковыми

периодами в 4 суток, однако со значительно меньшей амплитудой. Низкочастотная область содержит пики с неодинаковыми для отдельных станций периодами (13-дневным для Алматы, 10-дневным для Караганды и отсутствие вариаций в этом диапазоне периодов для Новоказалинска). Спектральный пик со средним периодом в 6.7 суток присутствует во всех глобальных спектрах, однако его поведение различно для разных станций. В отличие от 4-х дневного пика его период испытывает незначительные вариации со временем около среднего значения, при этом величина и знак вариаций не показывают корреляцию для различных станций. Временные вариации месячных глобальных спектров представлены на рисунке 3 (проведено вейвлет-преобразование временных рядов сформированных по часовым значениям критических частот, измеренных в месячном временном интервале с января по октябрь 1986 года). По оси абсцисс – периоды в сутках в соответствующем месяце, а по оси ординат – интенсивность  $E_w$ . Видно, что интенсивность волновых возмущений с периодами в несколько суток уменьшается по сравнению с зимними и осенними месяцами, т.е. явно проявляется сезонная зависимость. Основные периоды, проявляющиеся в глобальном спектре в соответствующем месяце, приведены в таблице.

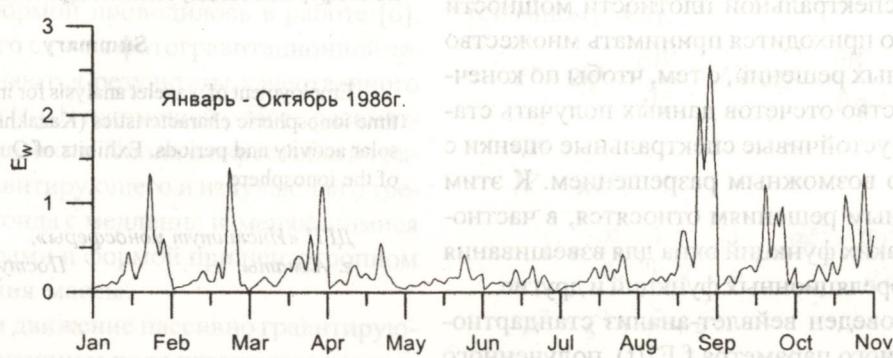


Рис.3. Сезонные вариации огибающих глобальных спектров в год минимума солнечной активности.

Таблица. Основные периоды, проявляющиеся в глобальном спектре в соответствующем месяце

Янв.	Фев.	Мар.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.
1.9	3.5	2.0	2.0	3.2	4.2	2.9	3.2	3.8	4.2
6.0	6.6	7.9	5.0	7.2	7.9	8.6	7.9	7.2	12.4
13.6	-	14.1	-	-	-	-	14.8	10.4	-

В таблице приведены основные периоды явно доминирующие в глобальных спектрах, вычисленные по вариациям часовых критических частот в соответствующем месяце. Следует отметить явную сезонную зависимость, не проявляется максимум интенсивности во всех месяцах, обнаруживаются квази-семисуточные периоды. В осенние месяцы происходит рост периодов колебания, что согласуется с [7]. Полагают, что вариации ионосферных параметров с периодами от 2 до 16 дней могут быть вызваны двумя типами источников. К первому относятся планетарные волны, генерируемые в нижних слоях атмосферы и распространяющиеся через среднюю атмосферу до ионосферных высот. Ко второму механизму, вызывающему рассматриваемые периодичности, относят вариации потока солнечного ионизирующего излучения. Рассмотрение вопроса об относительном вкладе того или другого источника выходит за рамки настоящей работы. Как показано в работе [7], аналогичные суточные периоды наблюдаются и мезосфере, и в нижней термосфере, и в зональном ветре. Это подтверждено с использованием ионосферного параметра  $f_0F2$ . Доминирующий пик с периодом в 7 суток является откликом ионосферы на вариации зонального ветра на уровне 90 км [7].

**В заключение** отметим, что при применении любого метода Фурье-преобразования для оценивания спектральной плотности мощности пользователю приходится принимать множество компромиссных решений, с тем, чтобы по конечному количеству отсчетов данных получать статистические устойчивые спектральные оценки с максимально возможным разрешением. К этим компромиссным решениям относятся, в частности, выбор таких функций окна для взвешивания данных и корреляционных функций и другие.

Нами проведен вейвлет-анализ стандартного ионосферного параметра  $f_0F2(t)$ , полученного на разнесенных пунктах станций вертикального зондирования гг. Казахстана (Алматы, Караганда, Новоказалинск). Выполнен анализ коэффициентов  $W(a,b)$  вейвлет-преобразования. Показано, что в вариациях плазменной критической частоты  $f_0F2(t)$  можно выделить несколько временных периодов, различающихся характерными масштабами.

Вейвлет-анализ с успехом может применяться для решения многих ионосферных задач.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения. //УФН, 1996. Т. 166, Т 11. С. 1145-1170.
2. Torrence C., and Compo G., P 1998: A practical guide to wavelet analysis. //Bull. Amer. Meteor. Soc. 79, 61 - 78.
3. William H.P., Saul A.T., William T.V., Brian P.F. Numerical Recipes in Fortran.// 2001, pp. 584 -596.
4. Farge, M. Wavelet transforms and their applications to turbulence. //Annu. Rev. Fluid Mech., 1992, 24, P. 395-457.
5. Torrence, C., Webster P. J. Interdecadal Changes in the ENSO-Monsoon System.// National Center for Atmospheric Research, Boulder, 1999.
6. Forbes J.M., Guffee R., Zhang X., Fritts D. Quasi 2 – day oscillation of the ionosphere during Summer 1992.// J. Geophys. Res., v.102, A4, April 1, 1997, pp. 7301 – 7303.
7. Mendillo M., Rishbeth H., Roble R. G., and Wrotten J. Modelling F-layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere.// Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2002. V. 64, N 18, P. 1911-1931.

## Резюме

Тік зондтау станциясының мөліметтері бойынша күн белсенділігінің тәмен (1986 ж.) және жоғары (1989 ж.) болған мерзіміндегі критикалық жиіліктердің ( $f_0F2$ ) кеңістікті-уақыттық түрленімдеріне вейвлет-талдау жүргізілген, оның барысында ионосфераның  $F2$ -облысында квази-бес және он үш күндік уақыттық мерзімдер байқалды. Алтысөткелік толқын зональдік галамшарлық-планеталық толқынның  $f_0F2(t)$  түрленімдерде байқалған көрінісі болып табылады. Бұл күбылыстар мезосферадағы және тәментау термосферадағы алтысөткелік тербелістерге сәйкес келеді. Зерттеулер Қазақстан аумағы үстіндегі ионосфераны зондау мөліметтеріне негізделген.

## Summary

Employment of wavelet analysis for investigations of space-time ionospheric characteristics (Kazakhstan) for low and high solar activity and periods. Exhibits of Quasi 7 – day oscillation of the ionosphere.

ДГП «Институт ионосферы»,  
г. Алматы

Поступила 22 июля 2007 г.