

УДК 551.510

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА РЯДОВ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НОЧНОГО МЕЗОСФЕРНОГО ОЗОНА В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ВОЛН

С. Б. Розанов, А. С. Завгородний, А. Н. Игнатъев

Для изучения вариаций излучения ночного мезосферного озона, наблюдаемых на миллиметровых волнах с поверхности Земли, разработан и испытан алгоритм частотно-временного анализа нерегулярных по времени рядов данных. Приведены некоторые результаты численных и натурных экспериментов.

Ключевые слова: озон, миллиметровые волны, мезосфера, спектрометр, выборка, частотный анализ, окно наблюдений, численное моделирование.

Введение. Атмосферный озон защищает жизнь на Земле от ультрафиолетового излучения Солнца, влияет на тепловой баланс и динамику атмосферы, на климат [1]. В ночное время содержание озона выше 50 км, в мезосфере, значительно увеличивается. Наземные измерения на миллиметровых (ММ) волнах позволяют получать данные о вертикальном распределении озона (ВРО) на высотах до 90–100 км [2, 3]. В ходе работ, проведенных в 1999–2006 гг. в ФИАН и ИФА РАН, были обнаружены быстрые вариации излучения ночного озона с периодами от нескольких минут до нескольких часов [2, 3]. Создание в ФИАН нового автоматизированного озонометра ММ диапазона с высокой чувствительностью [4] дало возможность более детально исследовать эти вариации. Целями данной работы были выбор и исследование характеристик алгоритма частотно-временного анализа *неравномерных* по времени рядов измерений спектров ночного озона на ММ волнах, позволяющих выявлять колебания интенсивности (яркостной температуры) излучения озона, определять их периоды и длительности.

Аппаратура и методика наблюдений. Единичные спектры излучения озона (линия с центральной частотой $f_0 = 142.175$ ГГц, длина волны 2.1 мм) накапливаются в течение

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: sergroz@sci.lebedev.ru.

100 с и записываются каждые 110 с с помощью 50-канального фильтрового анализатора спектра АС-50 с разрешением 0.1 МГц в центре линии [4]. Накопление спектров периодически, обычно раз в 25 минут, прерывается для калибровки озонметра и уточнения его параметров. В результате данные наблюдений представляют собой *неравномерные* во времени ряды значений яркостных температур в каналах АС-50.

Алгоритм частотно-временного анализа. В [3] показано, что ВРО в мезосфере может быть определено по разностям яркостных температур линии озона, измеренных в каналах АС-50 с отстройками частоты 0, 50, 150 и 250 кГц от центра линии. Ряды разностей яркостных температур единичных спектров и являются объектом частотно-временного анализа. Наиболее известные методы такого анализа: оконное преобразование Фурье (ПФ) [5] и вейвлет-преобразование [6], применимы только к *равномерным* выборкам. Интерполяция неравномерных данных на равномерную сетку может, как отмечалось в [7], приводить к потере в спектре мощности сигнала высоких частот, приближающихся к половине частоты дискретизации. Задача адаптации аппарата вейвлет-преобразования для анализа неравномерных выборок, а главное, последующего определения статистических характеристик получаемых результатов весьма трудоемка, её решение в рамках данной работы было признано нецелесообразным.

Метод частотного анализа *неравномерных рядов* данных, свободный от недостатков ПФ, был предложен Ломбом [8] и Скаргллом [7] с использованием результатов Барнинга [9]. Пусть выборка состоит из N измерений X_j величины $X(t)$, полученных в моменты времени $t = t_j$, $j = 1, \dots, N$, $t_{j+1} > t_j$. *Периодограмма Ломба* (спектр мощности) величины $X(t)$ определяется как [8]:

$$Q_{LX}(\omega) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) \cos \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \cos^2 \omega(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X}) \sin \omega(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^N \sin^2 \omega(t_j - \tau)} \right\}, \quad (1)$$

где ω – круговая частота, \bar{X} – среднее значение $X(t)$, временной сдвиг τ определяется как

$$\operatorname{tg}(2\omega\tau) = \frac{\sum_{j=1}^N \sin(2\omega t_j)}{\sum_{j=1}^N \cos(2\omega t_j)}. \quad (2)$$

В [7, 8] показано, что периодограмма Ломба (1) инвариантна по отношению к сдвигу шкалы времени, а её статистические свойства для неравномерных выборок оказываются

ся такими же, как свойства преобразования Фурье для равномерных выборок. Так, если $X(t)$ – случайная гауссова величина с дисперсией σ_X^2 , то плотность вероятности того, что $Q_{LX}(\omega) = z\sigma_X^2$, равна $p(z) = e^{-z}$ (порог $z \geq 0$), а среднее по частоте значение $Q_{LX}(\omega)$ равно σ_X^2 [7]. Т.к. на результаты измерений накладывается шум аппаратуры, требуется оценить вероятность появления в результатах расчёта $Q_{LX}(\omega)$ шумового выброса, превышающего уровень $z\sigma_X^2$ на одной из M контролируемых частот. В [7, 10] показано, что эта вероятность “ложной тревоги” равна

$$p_0 = 1 - (1 - e^{-z})^M.$$

Вероятность p_0 на практике выбирается достаточно малой, $p_0 \leq 0.1$. В этом случае

$$p_0 \approx Me^{-z}. \quad (3)$$

Для выборок с небольшим нарушением регулярности, как в нашем случае, принимают $M \approx N$ [10]. Тогда из (3) получаем

$$z \approx \ln(N/p_0). \quad (4)$$

Частотный анализ методом Ломба позволяет решить задачу обнаружения колебательных процессов в рядах данных, однако для изучения эволюции наблюдаемых явлений нужен частотно-временной анализ, при котором часть выборки выделяется скользящим *окном наблюдений*. При использовании окна наблюдений вместо исследуемой величины $X(t)$ берётся её произведение на некоторую весовую функцию (в нашей работе – гауссовой формы) с полушириной T_w , а в формуле (4) общее число точек выборки N заменяется на их эффективное количество в пределах окна.

Численные эксперименты. Алгоритм, созданный для анализа результатов измерений спектров излучения ночного озона, базируется на соотношениях (1) и (2) с учётом рекомендаций работ [8, 10]. В качестве величины $X(t)$ используются измеряемые в градусах Кельвина (К) разности яркостных температур линии озона в центральных каналах фильтрового анализатора спектра [4]. Для проверки разрешения алгоритма по частоте и времени использовался тестовый сигнал в виде суммы трёх гармоник с амплитудами 10, 5 и 7 К на частотах 1, 2 и 3 МГц соответственно. Каждая из гармоник “включалась” на своем интервале времени, интервалы частично перекрывались. Отсчеты времени выборки с количеством элементов $N = 1000$ формировались как сумма регулярной (с периодом 110 с) и случайной (с СКО $\sigma_t = 5$ с) составляющих. В результате обработки такого сигнала с использованием окон с полушириной $T_w = 5 - 30$ минут

были определены моменты “включения” и “выключения” гармоник, оказавшиеся в хорошем согласии с характеристиками исходного сигнала. Средние уровни спектральных составляющих гармоник соотносятся примерно как $4 : 1 : 2 \approx 10^2 : 5^2 : 7^2$, т.е. соответствуют квадратам амплитуд (мощностям) гармоник.

Чтобы смоделировать выделение гармонического сигнала из шумов аппаратуры, использовались тестовые сигналы

$$X_1(t) = S_1 \sin(2\pi F_1 t) + Gg(t) \tag{5}$$

в виде суммы гармоники с частотой $F_1 = 1$ мГц и амплитудой S_1 и центрированного гауссова шума $g(t)$ с единичной дисперсией, масштабируемого множителем $G = 1.6$ К, соответствующим шуму аппаратуры при времени накопления спектра 100 с. Число элементов выборки $N = 300$ соответствует типичному числу единичных спектров озона в течение зимней ночи. На рис. 1(а) показаны периодограммы Ломба (1) чисто шумового сигнала, когда $S_1 = 0$, для одной реализации шума (тонкая линия) и среднее по 10 реализациям (толстая линия). Горизонтальные линии на рис. 1(а) отмечают вероятности “ложной тревоги” $p_0 = 0.5, 0.1, 0.05, 0.01$. Видно, что для единичной реализации шума максимальные пики лежат между значениями 0.5 и 0.1 вероятности p_0 . Поэтому

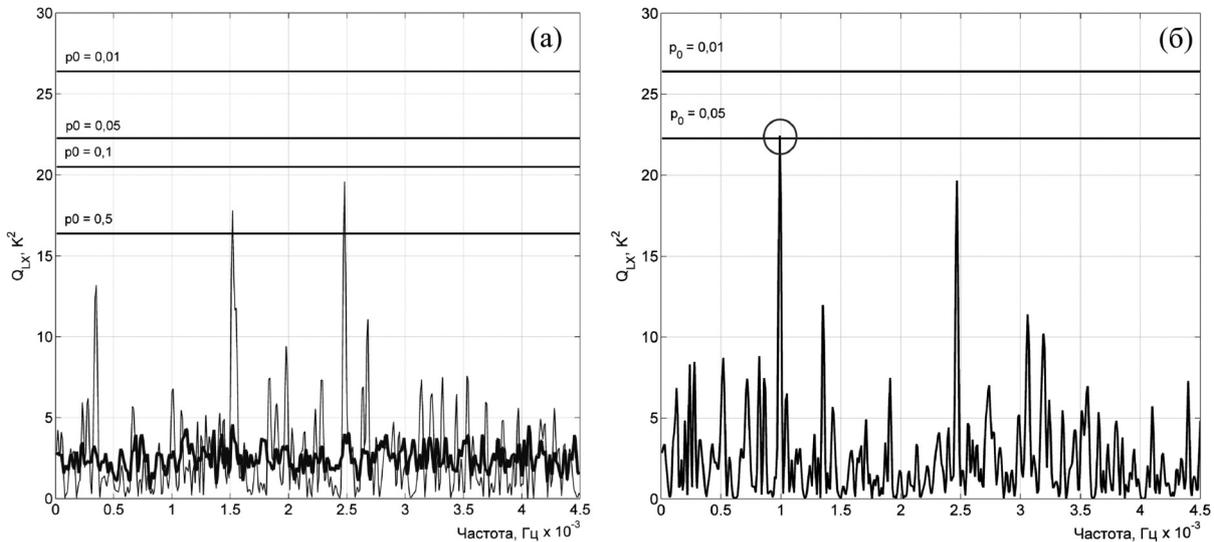


Рис. 1: (а) периодограммы Ломба (1) для центрированного гауссова шума: для одной реализации шума (тонкая линия) и средний спектр по 10 реализациям (толстая линия); (б) периодограмма Ломба для гармонического сигнала с частотой $F_1 = 1$ мГц и амплитудой $S_1 = 0.5$ К в присутствии гауссова шума с дисперсией ($G^2 = 1.6K^2$).

регистрация гармонической компоненты сигнала $X_1(t)$ в нашем случае может считаться достаточно надёжной при превышении ею уровня, соответствующего вероятности $p_0 = 0.05$. Среднее по частоте значение мощности для единичной реализации шума составило 2.57^2 , для среднего спектра по 10 реализациям – 2.49^2 , обе эти величины близки к теоретическому значению $G^2 = 2.56^2$. На рис. 1(б) приведена периодограмма Ломба (1) для сигнала $X_1(t)$ при амплитуде гармоники $S_1 = 0.5$ К. Горизонтальные линии соответствуют значениям $p_0 = 0.05, 0.01$. Видно, что спектральная составляющая на частоте 1 МГц превышает шумы и достигает порога обнаружения, соответствующего вероятности $p_0 = 0.05$ (обведено кружком). При этом отношение амплитуды сигнала к СКО шума составляет $S_1/G \approx 0.3$.

В настоящее время алгоритм частотно-временного анализа используется для обработки экспериментальных массивов спектров излучения ночного мезосферного озона. Предварительный анализ выявил колебания разностей яркостных температур в центре линии с периодами от 5 до 40 мин и “временами жизни” процессов от 1 до 8 периодов.

Заключение. Обоснован выбор алгоритма частотно-временного анализа неравномерных по времени рядов измерений спектров излучения ночного мезосферного озона в линии 142.175 ГГц, основанного на методе периодограмм Ломба. Для выявления колебаний с “временами жизни” меньше длительности сеансов наблюдений использованы скользящие временные окна гауссовой формы. Численные эксперименты показали корректность работы алгоритма. При обработке экспериментальных данных выявлены вариации излучения озона с периодами от 5 до 40 мин, которые могут быть связаны с распространением внутренних гравитационных волн (волн плавучести).

Работа поддержана программами ОФН РАН “Радиоэлектронные методы в исследованиях природной среды и человека” и “Новые источники миллиметрового и терагерцового излучения и их перспективные приложения”. Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. С. В. Соломонову и к.ф.-м.н. Е. П. Кропоткиной за полезные обсуждения работы.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Report No. 55 (WMO, Geneva, 2014), <http://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/2014/report.html>.
- [2] С. В. Соломонов, Е. П. Кропоткина, А. И. Семенов, Краткие сообщения по физике ФИАН, № 10, 31 (2001).

- [3] А. Н. Игнатъев, Радиометрия атмосферного озона и окиси хлора на миллиметровых волнах. Дисс. канд. физ.-мат. наук (МГУ, Москва, 2006).
- [4] С. Б. Розанов, А. С. Завгородний, С. В. Логвиненко и др., Известия вузов. Радиофизика **54**, (8-9), 708 (2011).
- [5] А. Б. Сергиенко, *Цифровая обработка сигналов*. 2-е изд. (Питер, Санкт-Петербург, 2006).
- [6] В. П. Дьяконов, *Вейвлеты. От теории к практике* (Солон-Р, Москва, 2002).
- [7] J. D. Scargle, *Astrophys. Space Sci. J.* **263**, 835 (1982).
- [8] N. R. Lomb, *Astrophys. Space Sci.* **39**, 447 (1976).
- [9] F. J. M. Barning, *Bulletin of the Astron. Institutes of the Netherlands* **17**, 22 (1963).
- [10] Spectral Analysis of Unevenly Sampled Data, in *Numerical Recipes, 3rd Edition*, Ed. by W. H. Press et al., (Cambridge, 1986), Chap. 13, p. 685.

Поступила в редакцию 7 июня 2016 г.