

ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ

УДК 621.396.9: 551.508.855

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫХ СОЛНЕЧНЫМ ТЕРМИНАТОРОМ

А.И. ЛИТВИН-ПОПОВИЧ, Д.Б. ЕВСЕЕВ, В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, С.В. ЮДИН, К.В. СКЛЯРЕНКО

В работе рассматривается методика анализа короткопериодических колебательных процессов в атмосфере. Приводятся результаты анализа данных вертикального зондирования атмосферы во время прохождения солнечного терминатора.

Ключевые слова: радиолокационная станция вертикального зондирования атмосферы, дистанционные методы зондирования, солнечный терминатор.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный терминатор [1] – поверхность, разделяющая освещенную и неосвещенную Солнцем части поверхности планеты и атмосферы. Во время прохождения солнечного терминатора, возникает тепловой удар, вызванный скачкообразным изменением потока энергии от Солнца. В результате появляются существенные высотные градиенты температуры воздуха. Следствием этого являются процессы теплообмена, выражающиеся в колебаниях локальной плотности и диэлектрической проницаемости атмосферы. Указанные колебания повышают степень турбулизованности воздушных течений.

Повышенная степень турбулентности приводит к следующим следствиям:

1. Изменение условий распространения радиоволн во время прохождения солнечного терминатора.

2. Оптические искажения наблюдаемых малоразмерных объектов (в астрономии).

Существует ряд методов измерения, позволяющих зафиксировать описываемое явление. Наиболее перспективным является применение оптического или радиолокационного зондирования, поскольку есть возможность реализовать высокое временное разрешение, необходимое для анализа короткопериодических процессов. Поскольку рассматриваемые колебательные процессы приводят к появлению значительных градиентов плотности и диэлектрической проницаемости, радиолокационная отражаемость атмосферы возрастает. Таким образом, можно выделить основные наблюдаемые признаки возникающих процессов:

1. Колебания мощности сигнала, рассеянного атмосферными неоднородностями.

2. Короткопериодические колебания скорости ветра, регистрируемые на фоне тренда, обусловленного метеорологической обстановкой.

Актуальность данного исследования заключается в следующем: на основании анализа реакции атмосферы на ударное тепловое воздействие можно оценить частотную характеристику атмосферы как инерционной системы. Это позволит усовершенствовать методы контроля качества результатов в системах радиолокационного зондирования атмосферы.

1. АППАРАТУРА И УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Для наблюдения короткопериодических колебательных процессов в атмосфере необходима регистрация метеопараметров с временным разрешением в десятки секунд, что требует применения современных систем дистанционного зондирования атмосферы.

С помощью когерентно-импульсной доплеровской радиолокационной станции вертикального зондирования дециметрового диапазона [2] был проведен цикл измерений, охватывающий периоды заката и рассвета. Использовалось одно направление зондирования (зональное) с углом наклона ДН антенны 9 градусов от зенита. Использование одного направления зондирования позволяет повысить временное разрешение зондирования. Параметризация спектров рассеянных сигналов производилась методом наименьших квадратов [2, 3].

2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в ходе зондирования высотновременные зависимости метеопараметров подвергались спектральному анализу с целью выявления их частотной структуры. Спектральный анализ осуществлен с помощью непрерывного вейвлет-преобразования [4]:

$$S(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot \psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt,$$

$$s(t) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} S(\tau, a) \cdot \frac{1}{a^2 \cdot \sqrt{a}} \cdot \psi\left(\frac{t-a}{\tau}\right) \cdot d\tau \cdot da,$$

где $\psi(\tau, a)$ – вейвлет, как функция от сдвига (τ) и масштаба (a) [4,5].

Достоинства вейвлет-преобразования по сравнению с преобразованием Фурье в данном случае обусловлены более высоким временным разрешением для высокочастотных составляющих сигнала и более низким временным разрешением для низкочастотных составляющих. Это позволяет провести единственное преобразование, тогда как для Фурье-анализа пришлось бы применять набор преобразований с различным размером выборки для получения аналогичных результатов. Кроме того, при вейвлет-преобразовании получается частотно-временное разложение в координатах «время-период», а не «время-частота», что более удобно для анализа рассматриваемых волновых процессов.

Для анализа колебательных процессов выбран комплексный гауссовый вейвлет CGAU. Это семейство вейвлетов вычисляется взятием p -й производной от $f(x) = C_p \cdot e^{-i \cdot x} \cdot e^{-x^2}$. Коэффициент C_p вычисляется таким образом, чтобы $\left\| \frac{\partial^p f(x)}{\partial x^p} \right\|^2 = 1$. Выбор комплексного гауссового вейвлета обусловлен тем, что для гауссовой весовой функции обеспечивается минимальная площадь области неопределенности спектрального анализа, равная $\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{2}$ [6].

Определение периода при непрерывном вейвлет-преобразовании проводится по формуле $F_a = \frac{F_c}{a \cdot \Delta}$, где a – масштаб, Δ – период дискретизации, F_c – центральная частота вейвлета. Таким образом, задача выбора вейвлета сводится к поиску функции, имеющей центральную частоту, большую F_{\max} / Δ , где F_{\max} – максимальная частота анализируемых колебаний. В свою очередь, период дискретизации должен быть менее $1/2 \cdot F_{\max}$, исходя из теоремы Котельникова. Окончательно получаем $F_c \geq F_{\max}^2 / 2$. В случае атмосферных процессов, наиболее высокочастотные из анализируемых процессов имеют периоды в десятки секунд – единицы минут, так что $F_{\max} \sim 0.1 F$, следовательно, $F_c > 0.005$ Гц. Зависимость центральной частоты от номера комплексного гауссового вейвлета CGAU приведена на рис. 1.

С ростом номера вейвлета повышается вычислительная сложность, так что в данном случае применен вейвлет CGAU20.

Анализ проводился для области периодов колебаний 1–30 минут с шагом 1 минута.

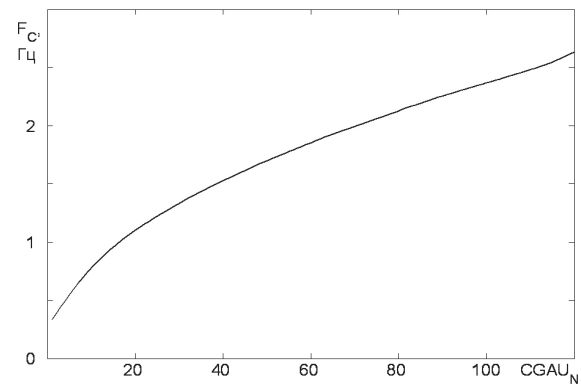


Рис. 1. Зависимость собственной частоты от индекса комплексного гауссового вейвлета

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 приведено высотно-временное поле мощности рассеянного сигнала. Здесь и далее, 1 – гражданские сумерки, 2 – навигационные сумерки.

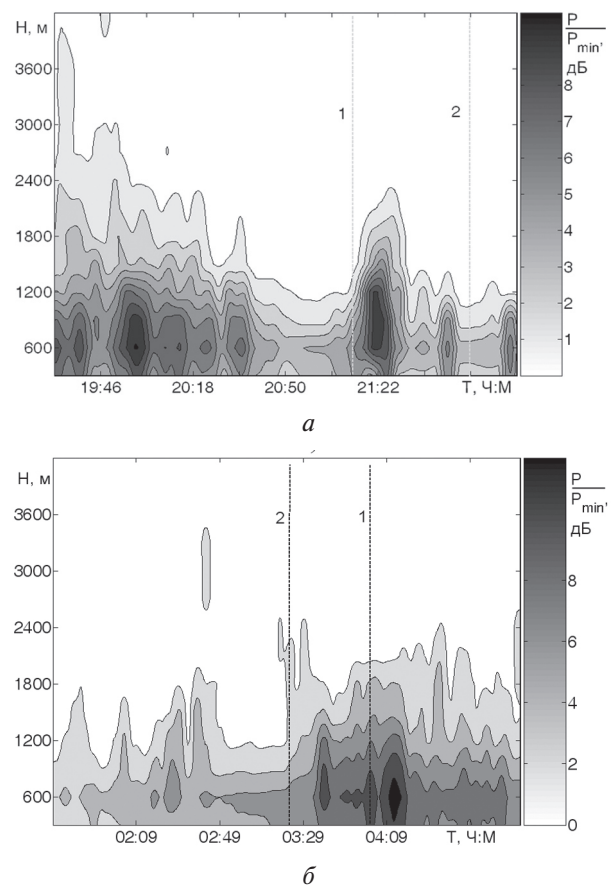


Рис. 2. Высотно-временная зависимость мощности рассеянного сигнала во время заката (а) и рассвета (б); 1 – гражданские сумерки, 2 – навигационные сумерки

В период заката и рассвета наблюдаются колебания мощности рассеянного сигнала, достигающие 10 дБ в приземном слое атмосферы. Результаты спектрального анализа вариаций мощности рассеянного сигнала для высоты зондирования 900 метров приведены на рис. 3. Анализ проведен для временного интервала, соответствующего закату (а) и рассвету (б).

Наиболее интенсивные из зарегистрированных колебаний имели периоды порядка 15–20 минут. Во время прохождения терминатора также усиливаются короткопериодические колебания мощности рассеянного сигнала с периодами порядка 2–5 минут.

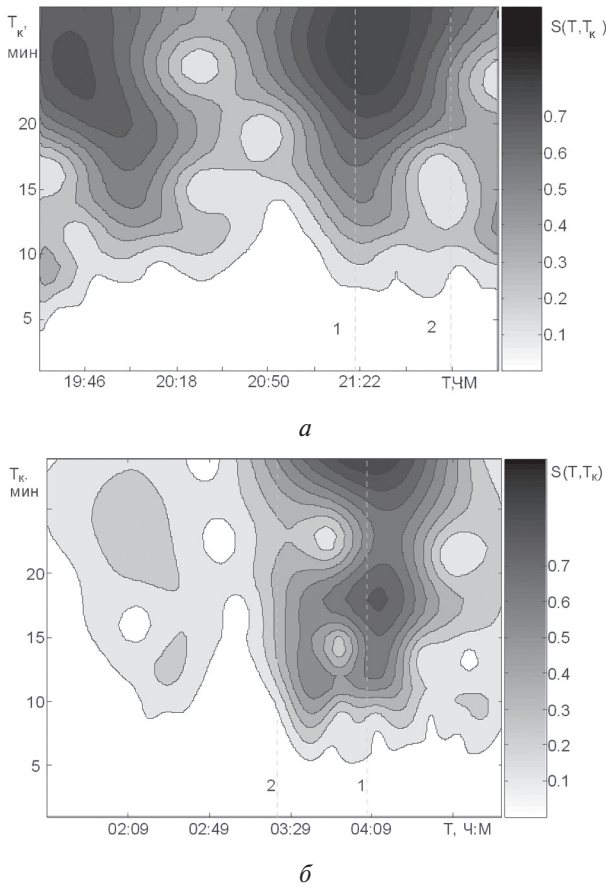


Рис. 3. Спектр вариаций мощности рассеянного сигнала для высоты 900 метров

На рис. 4 представлены спектры вариаций скорости ветра при прохождении солнечного терминатора.

Непосредственно перед закатом скорость ветра снижается. Во время заката наблюдаются интенсивные колебания скорости ветра в приземном слое. Колебания во время восхода выражены значительно слабее. Непосредственно перед наступлением гражданских сумерек регистрируется возрастание интенсивности вариаций скорости ветра, в особенности – короткопериодических. Во время рассвета хорошо заметно изменение основного периода со временем – возникают короткопериодические колебания, затем их энергия передается по спектру в область более низкочастотных колебаний. Перед закатом и рассветом интенсивность колебаний минимальна.

Рассмотрим спектры вариаций мощности рассеянного сигнала и скорости ветра во время заката, приведенные на рис. 5. Обозначения на графиках: 1 – за 1.5 часа до гражданских сумерек, 2 – гражданские сумерки, 3 – навигационные сумерки, 4 – через 1.5 часа после навигационных сумерек.

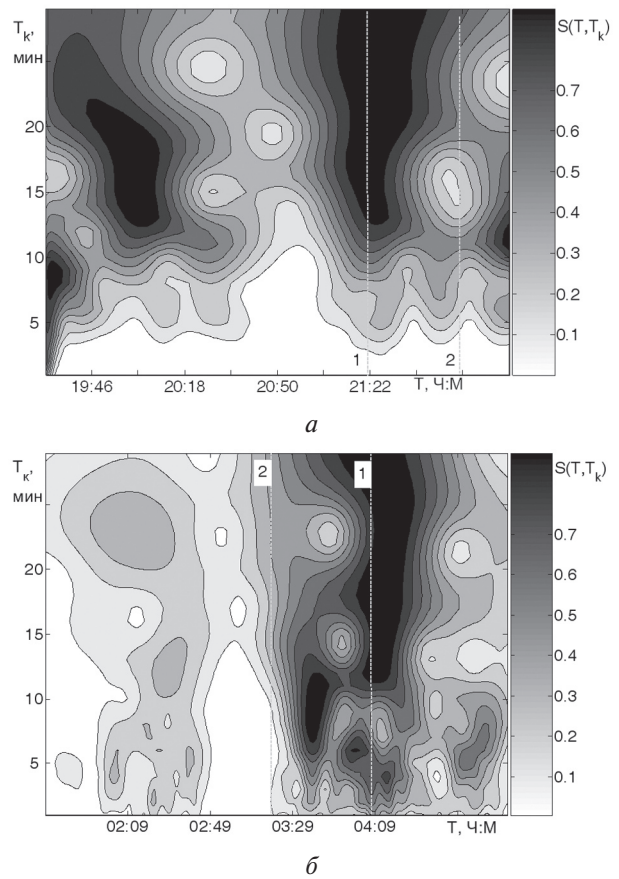


Рис. 4. Спектр вариаций скорости ветра при закате (а) и восходе (б) Солнца

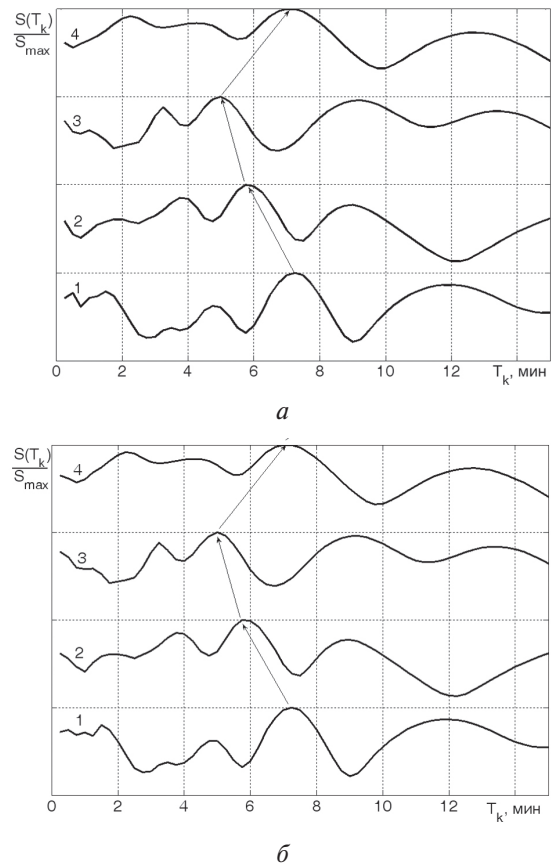
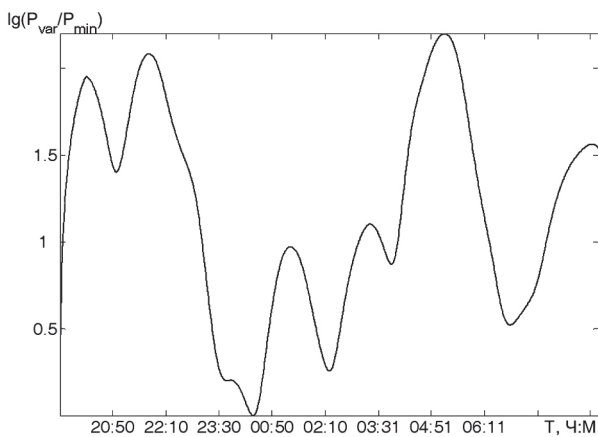


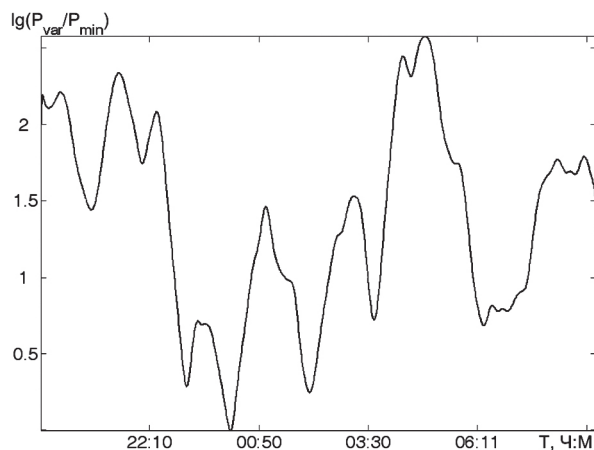
Рис. 5. Эволюция основного периода колебаний мощности рассеянного сигнала (а) и скорости ветра (б)

Во время прохождения солнечного терминатора, наблюдается снижение основного периода колебаний мощности рассеянного сигнала до 5 минут. Период колебаний восстанавливается через 1.5 часа после наступления навигационных сумерек. Спектр вариаций мощности сигнала сильно изрезан, значительная часть энергии сосредоточена в области медленных колебаний с периодами 30 минут и более. В связи с этим, рассмотрение проводится для периодов 1...15 минут, чтобы акцентировать рассматриваемые явления.

Рассмотрим временные ряды интенсивности вариаций мощности рассеянного сигнала и регистрируемой скорости ветра, приведенные на рис. 6. Наиболее интенсивные вариации скорости ветра и мощности рассеянного сигнала наблюдаются во время заката и рассвета.



а



б

Рис. 6. Временной ряд интенсивности вариаций мощности рассеянного сигнала (а) и скорости ветра (б)

ВЫВОДЫ

Из анализа результатов радиолокационного зондирования атмосферы можно сформулировать следующие выводы:

1. Солнечный терминатор является мощным источником энергии, порождающим колебательные процессы в атмосфере.

2. Обнаруженные колебания имеют более короткие периоды по сравнению с колебаниями, вызванными атмосферной циркуляцией в отсутствие ударных тепловых воздействий.

3. Наиболее интенсивные колебания во время прохождения солнечного терминатора имеют период около 5 минут.

4. Основная доля энергии колебаний в атмосфере приходится на колебания с периодами более 30 минут.

5. РЛС ВЗ обеспечивает возможность регистрации короткопериодических колебаний в тропосфере.

Литература.

- [1] Speed-resonant terminator wave generation in the Earth troposphere. V.P.Vasylyev, V.A.Sergeev. Earth, Moon and Planets, 84, 2000. — pp. 81-93.
- [2] Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под общ. ред. Б. Л. Кашеева, Е. Г. Прошкина, М. Ф. Лагутина. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ, 2002. — 426 с.
- [3] Wind profiler assessment report. — NOAA, Silver Spring, Maryland, 1994. — 141 p.
- [4] Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Изд-е 5-е, стер., М.:Высшая школа, 2005. — 462 с.
- [5] Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций. 2-е изд. / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, С.М. Арбузов и др. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 768 с.: ил.
- [6] Signal analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications. Alfred Mertins. John Wiley and Sons Ltd, 1999. ISBN 0-471-98626-7.

Поступила в редколлегию 12.04.2010



Литвин-Попович Андрей Игоревич, ассистент каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: цифровая обработка радиолокационных сигналов.



Евсеев Дмитрий Борисович, к.т.н., научный сотрудник НУЦ ОРТ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.



Олейников Владимир Николаевич, к.т.н., профессор каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: радиолокационные методы исследования атмосферных динамических процессов.



Юдин Станислав Владимирович, аспирант каф. РЭС, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: Метеорологическая радиолокация.



Скляренко Константин Валерьевич, студент радиотехнического факультета, Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Область научных интересов: метеорологическая радиолокация.

УДК 621.396.9: 551.508.855

Радиолокаційні спостереження коливальних процесів, які визвані сонячним термінатором / А.І. Літвін-Попович, Д.Б. Євсєєв, В.М. Олейніков, С.В. Юдін, К.В. Скляренко // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2010. – Т. 9. – № 2. С. 266-270.

У роботі розглянуто методику аналізу коливальних процесів у атмосфері Землі за даними радіолокаційного вертикального зондування. Показано застосованість низькопотенційних РЛС вертикального зондування для вирішення дослідницьких задач в області фізики атмосфери. Наведено результати, які отримані обробкою даних низкою сеансів зондування.

Ключові слова: радіолокаційна станція вертикального зондування атмосфери, дистанційні методи зондування, сонячний термінатор.

Лл. 6. Бібліогр.: 6 найм.

UDC 621.396.9: 551.508.855

Radar measurements of atmospheric parameter fluctuations evoked by a solar terminator passage / A.I. Litvin-Popovitch, D.B. Evseev, V.N. Oleynikov, S.V. Yudin, K.V. Sklyarenko // Applied Radio Electronics: Sci. Mag. – 2010. – V. 9. – № 2. – P. 266-270.

The paper considers methods of analyzing short-period fluctuations in the atmosphere. Results of analyzing the data of the vertical atmospheric probing in time of passing a solar terminator are given.

Key words: radar wind profiler, atmospheric remote sensing, solar terminator.

Fig. 6. Ref.: 6 items.