

А. Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, Д. М. СОСНОВЧИК, канд. техн. наук,
В. Д. КУКУШ, С. Н. JACOBI, prof, K. FRÖHLICH, dr

РАДИОМЕТЕОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН НАД ХАРЬКОВОМ (49°30'N, 36°51'E)

Введение

Постоянно растет интерес к атмосферным волновым процессам, которые играют существенную роль в энергетическом балансе верхней атмосферы, являясь связующим звеном между верхними и нижними ее слоями [1, 2].

Наиболее существенный вклад в энергетический обмен вносят внутренние гравитационные волны (ВГВ) – колебания с частотами между частотой Брента Вайсяля до Кориолисового параметра. Определение параметров ВГВ и их вариаций необходимо для создания адекватных моделей атмосферы.

В настоящее время радиометеорный метод исследования динамических процессов в области мезосферы нижней термосферы является одним из наиболее информативных, позволяющий проводить круглосуточный мониторинг ветрового режима и выявлять пространственно-временную структуру движения воздушных масс различного временного масштаба.

Радиометеорный метод исследования ВГВ для угломерных метеорных РЛС (МРЛС) предложен Гавриловым Н.М. [3] и развитый в работах [1, 4]. Предложенный в данной работе алгоритм дает возможность, используя современные методы цифровой обработки сигналов, выявлять ВГВ на высотах 80 – 100 км (область мезосферы нижней термосферы) и определять их пространственно-временные параметры.

В данной работе исследуются сезонные вариации пространственно-временных параметров ВГВ по результатам радиометеорных измерений, выполненных в рамках международных геофизических программ в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЕ) на автоматическом угломере МРЛС (АУ МРЛС).

Описание радиометеорной измерительной установки

Для исследования сезонных вариаций параметров ВГВ использовались радиометеорные данные, полученные с помощью АУ МРЛС ХНУРЭ в течение 1987 г. В среднем каждый месяц указанного периода измерений представлен десятью днями непрерывных измерений.

Радиометеорные данные АУ МРЛС включают в себя время наблюдения (t), координаты (высоту H , дальность L , азимут θ и угол места ϵ) и радиальную скорость дрейфа (V_r) отражающей области метеорного следа, регистрируемого в области мезосферы нижней термосферы.

Передающая антенна АУ МРЛС представляет собой пяти элементную антенну типа волновой канал, направленную на восток. Приемная антенная система АУ МРЛС это многошкала измерительная система, состоящая из пяти антенн типа волновой канал, расположенных в виде «креста». В точке пересечения базовых линий, ориентированных по странам света, находится общая для всех баз антенна. Все антенны приемной системы также ориентированы на восток.

Среднеквадратические погрешности определения параметров метеорного следа приведены в табл. 1 [1].

Таблица 1

Параметр	Среднеквадратическая погрешность
угловые координаты, угл. мин	17
радиальная дальность, м	200
высота, км	1
радиальная скорость, м/с	3

Для примера на рис. 1–3 представлены гистограммы распределения количества (N) метеорных отражений по высоте и дальности, а также суточные вариации часовой численности метеорных отражений. Гистограммы построены по результатам обработки радиометеорных данных, полученных в 1987 г в Харькове.

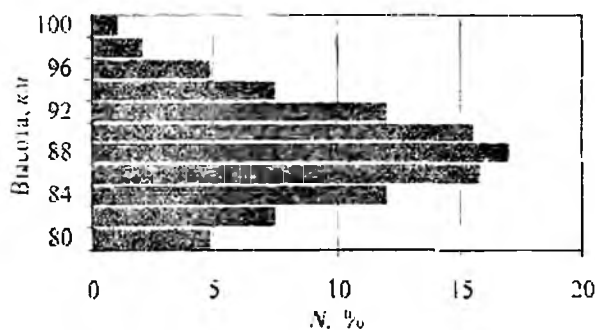


Рис. 1

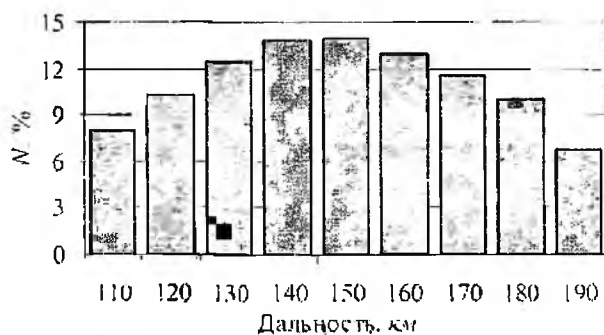


Рис. 2



Рис. 3

Алгоритм выявления ВГВ по радиометеорным данным

В основе алгоритма выявления и определения параметров ВГВ по угломерным радиометеорным данным лежит методика, предложенная Гавриловым Н.М. [3].

Для определения пространственных характеристик ВГВ область мезосферы нижней термосферы, обзреваемая МРЛС, делится на горизонтальные слои высотой 6 км с взаимным перекрытием соседних слоев на 4 км. Каждый слой в свою очередь разбивается по дальности на подобласти длиной 60 км с взаимным перекрытием на 50 км.

В каждой из выделенных подобластей производится расчет зональной компоненты скорости дрейфа метеорного следа V_z [1] в предположении географичности ветровых движений [5]:

$$V_z = \frac{V_r}{\sin(\theta) \cos(\epsilon)}$$

Все расчеты динамических параметров атмосферы делаются в предположении, что зональная составляющая скорости дрейфа метеорного следа соответствует зональной компоненте скорости ветра (далее скорости ветра) в мезосфере нижней термосфере [6,7].

Отсчеты скорости ветра в каждой подобласти приводятся к равноотстоящим во времени. Время осреднения $T_s = 5 \text{ мин}$.

Задача выявления пространственно-временных параметров ВГВ заключается в совместном анализе отсчетов скорости ветра в выделенных подобластях.

В [3] выявление ВГВ заключалось в оконном преобразовании Фурье отсчетов скорости ветра с последующим поиском максимумов в полученной спектрограмме. Известно, что для выявления колебаний с помощью оконного преобразования Фурье необходимо, чтобы искомыми колебаниями были стационарны в рамках временного окна [8]. Однако, как показали предыдущие исследования, ВГВ представляет собой дуг колебаний с априорно неопределенными

длительностью и периодом. То есть при фиксированном размере временного окна одни из искомым ВГВ будут удовлетворять условию стационарности, а другие – нет, что может быть причиной пропуска высоко и низкочастотных ВГВ.

Для результативного поиска с одинаковой эффективностью высоко-, средне- и низкочастотных ВГВ необходимо выполнять оконное преобразование Фурье с изменяемой длительностью окна либо вейвлет преобразование (ВП) отсчетов скорости ветра:

$$\underline{C}(\tau, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} V(t) \cdot \underline{\psi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt, \quad (2)$$

где $\underline{C}(\tau, a)$ – коэффициент вейвлет спектра (ВС) колебания $V(t)$, a – параметр масштабирования, пропорционален периоду (Т) $\underline{\psi}\left(\frac{t-\tau}{a}\right)$, $V(t)$ – отсчеты скорости ветра, $\underline{\psi}(t)$ – базисная вейвлет функция, t – время, τ – параметр сдвига, соответствует времени от начала наблюдения.

Вейвлет преобразование имеет преимущество перед оконным преобразованием Фурье с изменяемой длительностью окна как по скорости расчета, так и по возможности выбора базисной вейвлет функции максимально подобной ВГВ. Выбор базисных функций подобных анализируемым колебаниям позволяет уменьшить ошибку аппроксимации отсчетов скорости ветра их вейвлет преобразованием [9].

В работе для поиска ВГВ использовалось ВП с наиболее подобным по виду ВГВ [1.4] комплексным базисным вейвлетом CGAU8. Базисный вейвлет CGAU8 образован путем взятия восьмой производной от функции Гаусса [9]:

$$\underline{\psi}(t) = (-1)^8 \cdot \frac{1}{\left\| \frac{d^8}{dt^8} \left[e^{-t} e^{-t^2} \right] \right\|^2} \cdot \frac{d^8}{dt^8} \left[e^{-t} e^{-t^2} \right], \quad (3)$$

где t – обобщенное время.

Однако максимум в вейвлет спектре скорости ветра может быть вызван как наличием ВГВ, так турбулентными явлениями в обозреваемой области атмосферы [2, 3].

Решение о причине возникновения максимума в ВС $\underline{C}(\tau_{\max}, a_{\max})$ производится на основе анализа на предмет линейности фазо-дальностных и фазо-высотных характеристик (ФДХ, ФВХ) колебания с периодом пропорциональным a_{\max} в момент времени τ_{\max} .

Фазо-дальностная характеристика представляет собой зависимость фазы колебания от дальности в определенный момент времени. ФДХ строится для каждого горизонтального слоя путем расчета фазы коэффициента $\underline{C}(\tau_{\max}, a_{\max})$ вейвлет спектров в соответствующих подобластях.

Построение фазо-высотной характеристики максимума вейвлет спектра скорости ветра аналогично построению его фазо-дальностной характеристики.

Если максимум в ВС скорости ветра вызван присутствием ВГВ, то его ФДХ и ФВХ должны описываться линейными зависимостями вида

$$\varphi(x) = -k \cdot x + \varphi_0, \quad (4)$$

где $\varphi(x)$ – значение фазы колебания, x – расстояние от точки наблюдения, k – волновое число, $k = (2\pi)/\lambda$, λ – длина волны, φ_0 – начальная фаза.

Гипотеза о линейности фазо-дальностной характеристики проверяется с помощью робастного метода аппроксимации [10]. При аппроксимации вычисляются коэффициенты линейной зависимости k и φ_0 .

Если ФДХ как минимум трех горизонтальных слоёв обозреваемой области могут быть описаны линейными зависимостями, тогда максимум в вейвлет спектре скорости ветра вызван присутствием ВГВ. По известным коэффициентам линейной зависимости рассчитываются пространственные характеристики ВГВ. А именно: горизонтальное и вертикальное

волновые числа, горизонтальная и вертикальная длины ВГВ (λ_z, λ_v). По наклону фазодальностной характеристики определяются направления распространения ВГВ.

Если вычисленные выше пространственно-временные характеристики удовлетворяют дисперсионному соотношению

$$c \leq c_{\max} = 2 \cdot N \cdot H, \quad (5)$$

где c – горизонтальная фазовая скорость, $c = \lambda_z/T$; T – период ВГВ, N – частота Брента-Вайсяля, $N^2 = 5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-2}$ для области мезосферы нижней термосферы, то можно считать [2], что максимум в вейвлет спектре вызван ВГВ.

Предложенный алгоритм был опробован на наборе модельных радиометеорных данных.

При создании модельных радиометеорных данных полагали одновременное существование нескольких ВГВ в обозреваемой области. ВГВ представлялась как цуг гармонического колебания с огибающей в виде гаусианы [2]:

$$V(t, H, L) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t-t_{0i}}{t_{\text{сущ}i}} \right)^2} \cdot \cos \left[2\pi \cdot \left(\frac{t}{T_i} + \frac{L}{\lambda_{zi}} + \frac{H}{\lambda_{vi}} \right) + \varphi_i \right], \quad (6)$$

где $V(t, H, L)$ – скорости ветра, м/с; t – время, мин; H – высота, м; L – дальность, м; N – количество ВГВ, заданное при моделировании; A_i – максимальное значение амплитуды скорости ветра

обусловленной ВГВ, м/с; t_{0i} – время максимума амплитуды i -й ВГВ, мин; $t_{\text{сущ}i}$ – длительность существования i -й ВГВ, мин; T_i – период i -й ВГВ, мин; λ_{zi} – горизонтальная длина i -й ВГВ, м; λ_{vi} – вертикальная длина i -й ВГВ, м; φ_i – начальная фаза i -й ВГВ, рад.

Параметры ВГВ принимали значения: $A_i = 10 \dots 80 \text{ м/с}$; $t_{\text{сущ}i} = 30 \dots 240 \text{ мин.}$; $T_i = 5 \dots 60 \text{ мин.}$; $\lambda_{zi} = 60 \dots 600 \text{ м}$; $\lambda_{vi} = 10 \dots 100 \text{ м}$. Значения t_{0i} , φ_i выбирались случайно.

Для создания модельных радиометеорных данных использовались результаты радиометеорных измерений двухсуточной длительности, в которых для каждого метеорного отражения вместо истинных зональных компонент скорости ветра подставлялись модельные значения вычисленные по (6).

С помощью модельных данных были оценены погрешности определения параметров ВГВ предложенным алгоритмом. Для этого проведено сравнение значений параметров ВГВ выявленных алгоритмом в модельных данных, с заданными при моделировании. В результате получены следующие значения относительных погрешностей определения параметров ВГВ: время максимума амплитуды – 1 % (на интервале 24 часа), период – 10 %, горизонтальная длина волны – 8 %, вертикальная длина волны – 14 %.

Результаты исследования сезонных вариаций параметров ВГВ в Харькове в 1987 году

В результате обработки радиометеорных данных за 1987 г. выявлено свыше 1000 ВГВ. Обнаруженные волны были сгруппированы по сезонам (зима (З), весна (В), лето (Л), осень (О)). Для каждого из сезонов и для года в целом были построены гистограммы распределения и вычислены среднестатистические пространственно-временные параметры ВГВ. На рис. 4, 5 приведены распределения вертикальных и горизонтальных длин ВГВ для каждого из сезонов 1987 г. соответственно.

Среднесезонные значения вертикальных длин волн изменяются на протяжении года в пределах 20–40 км, незначительно преобладает восходящее направление распространения ВГВ. Среднесезонные значения горизонтальных длин волн изменяются на протяжении года в пределах 250–300 км. Весной и летом преобладает западное направление распространения

ВГВ. осенью – восточное. На рис. 6 и 7 приведены распределения вертикальных и горизонтальных фазовых скоростей ВГВ для каждого из сезонов 1987 г.

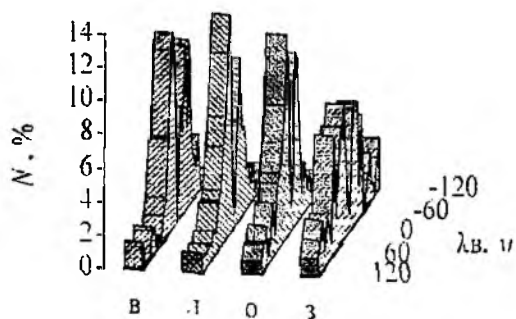


Рис. 4

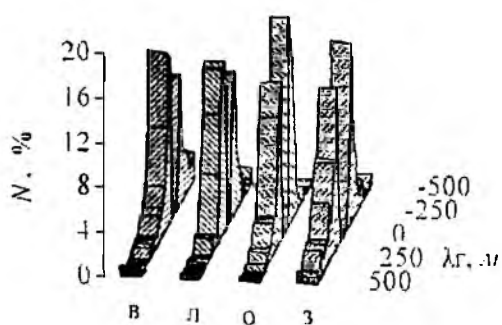


Рис. 5

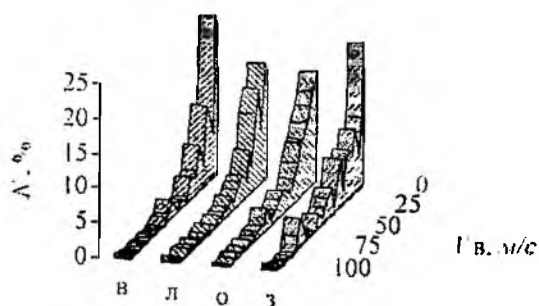


Рис. 6

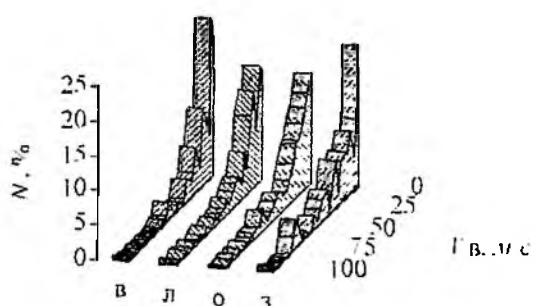


Рис. 7

Значения вертикальной фазовой скорости ВГВ принимают значения между 3-20 м/с и не изменяются со временем года. Гистограммы распределения горизонтальных фазовых скоростей ВГВ, приведенные на рис. 6, показывают, что весной и летом среднесезонные значения скорости больше, чем осенью и зимой и составляют 75 и 65 м/с соответственно. Осредненные за год распределения пространственно-временных параметров ВГВ приведены на рис. 8-12. Средние значения пространственно-временных параметров ВГВ за год следующие: период 1,5 часа; горизонтальная и вертикальная длины волн 250 и 70 км соответственно. горизонтальная и вертикальная фазовые скорости 58 и 14 м/с соответственно.

Гистограммы распределения среднечасового количества ВГВ по времени суток и среднесуточного количества ВГВ по месяцам года приведены на рис. 13, 14 соответственно.

Из гистограмм на рис. 13, 14 можно сделать вывод, что вариации интенсивности ВГВ в масштабах года (сезонные вариации) выражены резче, чем суточные. Также из сопоставления гистограмм на рис. 13 и 1 можно сделать вывод, что количество выявленных ВГВ зависит от статистической обеспеченности радиометеорных данных. Так, к примеру, низкая численность обнаруженных ВГВ в 18 – 22 часов может быть вызвана минимальным (см. рис. 1) числом метеорных отражений.

Среднесуточное количество обнаруженных ВГВ менее зависит от суточных изменений числа метеорных отражений и определяется другими факторами, поскольку характер суточного изменения числа метеорных отражений постоянен со временем года за исключением времени прихода метеорных потоков [1]. Также известно [1], что в августе наблюдается метеорный поток Персеид, что обеспечивает большее число метеорных отражений по сравнению с другими месяцами года. Однако, как следует из рис. 14, в августе регистрировалось минимальное среднесуточное количество ВГВ. Также из приведенного на рис. 14 распределения следует, что максимум активности ВГВ приходится на апрель и ноябрь. Это, как и минимум активности ВГВ зимой, соответствует результатам, опубликованным Jacoby в 2006 для высот свыше 90 км [11].

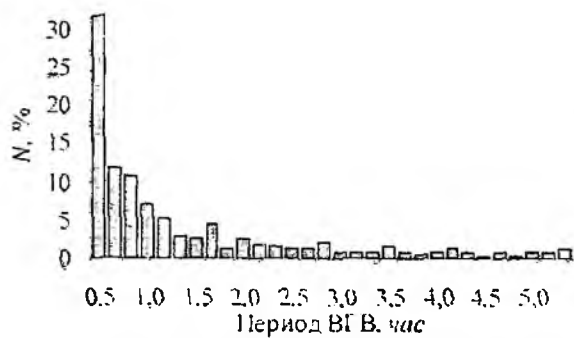


Рис. 8

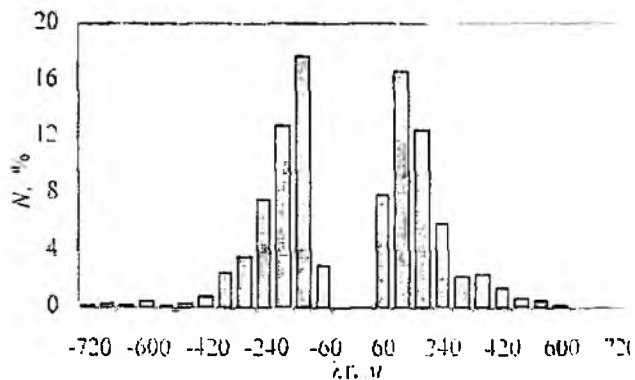


Рис. 9

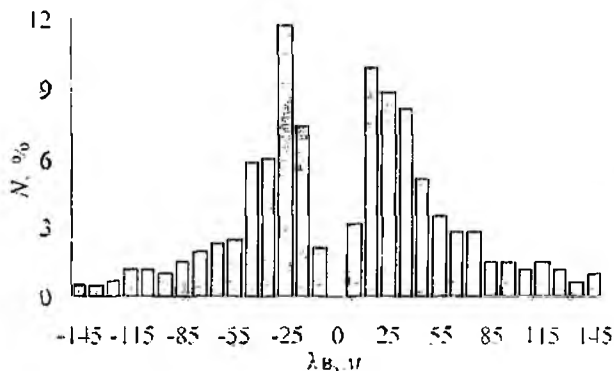


Рис. 10

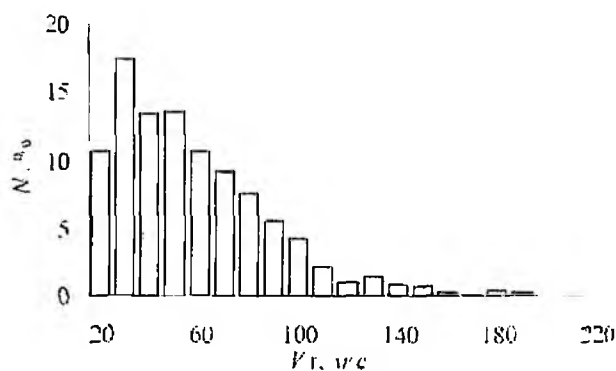


Рис. 11

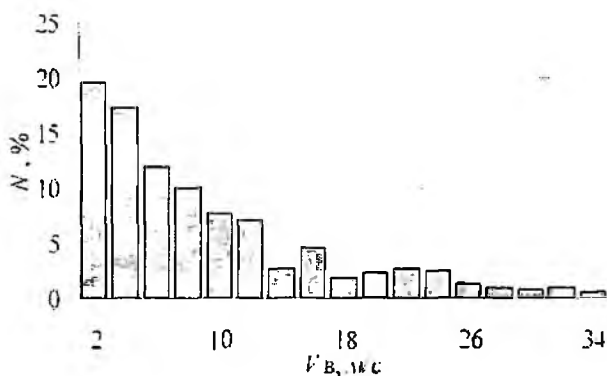


Рис. 12

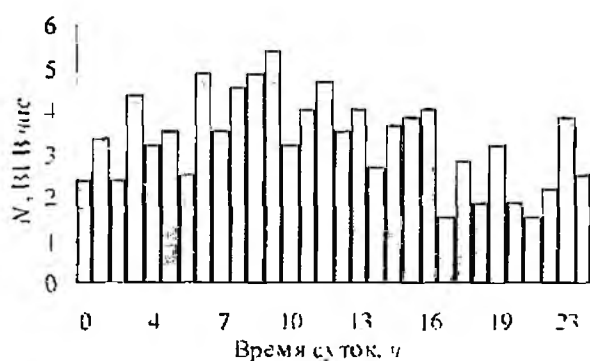


Рис. 13

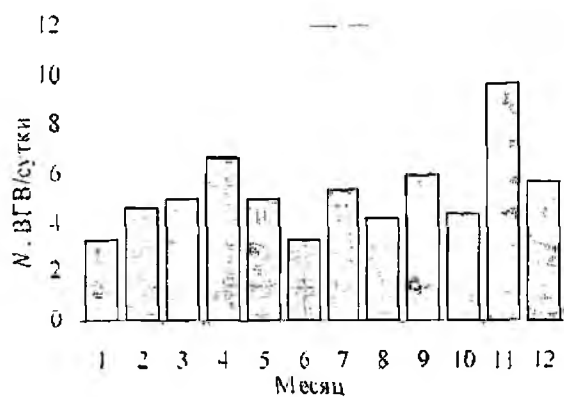


Рис. 14

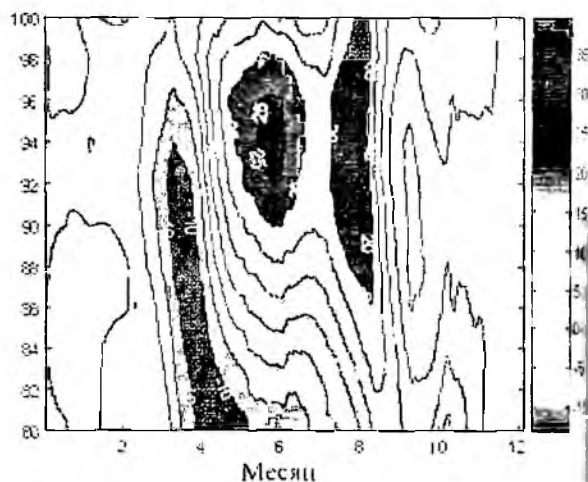


Рис. 15

Сопоставление приведенной гистограммы и значений среднего ветра в метеорной области (рис. 15) дает возможность предположить связь между сменой направления среднего ветра в мезосфере нижней термосфере и максимумом интенсивности ВГВ. Полученные результаты согласуются с изложенными в литературе [11, 12, 13].

Выводы

В результате применения современных методов цифровой обработки сигналов к анализу радиометеорных данных достигнуто увеличение количества выявленных ВГВ по сравнению с ранее используемыми алгоритмами в 4 раза.

Впервые получены сезонные вариации пространственно-временных параметров ВГВ по радиометеорным данным автоматического угломера метеорной РЛС. Вычислены средние за год параметры ВГВ, такие как период 1.5 часа, горизонтальная длина волны 250 км, вертикальная длина волны 70 км, горизонтальная фазовая скорость 58 м/с, вертикальная фазовая скорость 14 м/с. Обнаружено увеличение интенсивности ВГВ в апреле и ноябре, преобладание восточного направления распространения осенью и зимой и западного весной и летом. Горизонтальные фазовые скорости ВГВ весной и летом имеют большие значения, чем осенью и зимой и составляют 75 м/с и 65 м/с соответственно. Обнаруженные сезонные вариации интенсивности ВГВ на протяжении года могут быть связаны с изменениями среднего ветра.

Выявленные закономерности и распределения пространственно-временных параметров ВГВ могут быть использованы при создании динамических моделей атмосферы в области мезосферы – нижней термосферы.

Список литературы: 1. *Олейников А.Н., Кащеев Б.Л.* Исследование атмосферных динамических процессов в области мезопаузы нижней термосферы методом радиолокации метеорных следов // Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли / Под ред. Кащеева Б.Л. Прошкина Е. Г., Лагутина М. Ф. Харьков: Коллегиум, 2002. 2. *Carmen J.Nappo.* An introduction to atmospheric gravity waves. London: Elsevier Science, 2002. 264 с. 3. *Гаврилов Н.М.* Алгоритм для определения параметров внутренних гравитационных волн в метеорной зоне // Физика атмосферы и океана. Известия АН СССР. 1980 г. 4. *Oleynikov A.N., Jacobi Ch., Sosnovchick D.M.* Parameters of internal gravity waves in the mesosphere-lower thermosphere region derived from meteor radar wind measurements // Ann. Geophysicae. 2005 №23. С. 3431-3437. 5. *Измерение* ветра на высотах 90-100 км наземными методами / Под ред. Портнягина Ю.И. Шпренгера К. Ленинград: Гидрометеиздат 1978 г. 342 с. 6. *Докучаев В.П.* О влиянии магнитного поля земли на ветры в ионосфере // Известия АН СССР, серия геофизика. 1959 №5. С.783. 7. *Докучаев В.П.* Движение ионизированного газа в верхней атмосфере // Известия вузов. Сер. радиофизика. 1961, №4. С.5. 8. *Волощук Ю.И.* Сигналы и процессы в радиотехнике. Том 1. Харьков: Смит, 2003. 550с. 9. *Дьяконов В.П.* Вейвлеты. От теории – к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448с. 10. *Грановский В.А., Сирая Т.Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Ленинград: Энергоатомиздат 1990г. 288 с. 11. *Jacobi, Ch., Gavrilov N.M., Kürschner D., Frohlich K.* Gravity wave climatology and trends in the mesosphere/lower thermosphere region deduced from low-frequency drift measurements 1984-2003 (52.1°N, 13.2°E) // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2006. №68. С. 1913-1923. 12. *Medeiros A F, Takahashi H., Batista P.P., Gobbi D., Taylor M.J.* Observations of atmospheric gravity waves using airglow all-sky CCD imager at Cachoeira Paulista, Brazil (23°S, 45°W) // Geofisica Internacional. 2004. №43. С. 29-39. 13. *Gavrilov N.M., Jacobi Ch.* A study of seasonal variations of gravity wave intensity in the lower thermosphere using LF D1 wind observations and numerical model // Annales Geophysicae 2004. №12 С. 35-45.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 30.11.2007