

ПАРАМЕТРЫ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В МЕЗОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ХАРЬКОВСКОГО РАДАРА СРЕДНЕЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

А.И. Гритчин, С.В. Панасенко

PARAMETERS OF THE MESOSPHERE WAVE DISTURBANCES AS INFERRED FROM KHARKIV MF RADAR DATA

A.I. Gritchyn, S.V. Panasenko

Развиты теоретические основы активного и пассивного методов выявления волновых возмущений (ВВ) в мезосфере. Приведены результаты статистического и спектрального анализов параметров ВВ. Проанализированы зависимости параметров от времени суток, сезона и уровня магнитной активности.

The theoretical foundations of active and passive techniques for identification of wave disturbances (WD) in the mesosphere are developed. The results of the statistical and spectral analysis of WD parameters are given. The parameter dependences on the time of day, season and the level of magnetic activity are analysed.

Введение

Атмосферные волны играют важную роль при взаимодействии подсистем в системе Земля–атмосфера–геокосмос [1]. При своем распространении они вызывают квазипериодические вариации атмосферных и ионосферных параметров: давления, концентрации и температуры электронов, ионов и нейтралов, частот соударения нейтральных и заряженных частиц. Такие вариации именуется волновыми возмущениями (ВВ). Исследование ВВ является актуальной задачей. Дело в том, что они не только являются индикатором мощных природных и антропогенных процессов (выбросов корональной массы, землетрясений, извержений вулканов, циклонов, стартов ракет, взрывов и др.), но и существенно воздействуют на радиосигналы, ограничивая тем самым точность систем телерадиокоммуникации, радиолокации и радионавигации. Наименее изученными являются ВВ в мезосфере с периодами $T \approx 1$ мин – 3 ч, порождаемые акустико-гравитационными волнами (АГВ).

Целью работы является развитие теоретических основ новых методов выявления ВВ, основанных на статистическом и спектральном анализах временных вариаций огибающих обратно-рассеянных (ОР) радиосигналов (активный метод) и радиопомех (пассивный метод), а также анализ результатов исследования параметров ВВ данными методами.

Теоретические основы активного и пассивного методов

Активный метод

В качестве исходных выберем соотношение для среднеквадратичных значений огибающих ОР-сигналов $\overline{A_{\pm}^2}$ на определенной высоте [2]

$$\overline{A_{\pm}^2} = C \frac{\overline{\Delta N^2}}{\Omega_{\pm}^2 + \nu^2} e^{-4K_{\pm}}. \quad (1)$$

и уравнение для дисперсии флуктуаций электронной концентрации $\overline{\Delta N^2}$ [3]

$$\frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \overline{\Delta N^2} + D_a (\text{grad} \Delta N)^2 + \frac{\overline{\Delta N^2}}{t_N} = D_i (\text{grad} N)^2. \quad (2)$$

Здесь знаки \pm обозначают обыкновенную и не-обыкновенную поляризации; C – величина, зависящая

от параметров радара, характеристик канала распространения и высоты исследуемой области ионосферы; N – концентрация электронов; ν – эффективная частота соударений электронов с нейтралами; $\Omega_{\pm} = \omega \pm \omega_L$, ω – циклическая частота радиоволны, ω_L – продольная составляющая гирочастоты электронов; K_{\pm} – интегральный коэффициент поглощения при однократном прохождении сигнала; t – текущее время; D_a и D_i – коэффициенты амбиполярной и турбулентной диффузии соответственно; $t_N = (t_{N1}^{-1} + t_{N2}^{-1})^{-1}$ – время изменения N за счет процессов прилипания (t_{N1}) и рекомбинации (t_{N2}) электронов. Черта сверху обозначает усреднение по времени.

Если пренебречь фазовыми сдвигами, для квазипериодических вариаций параметров среды справедливы соотношения

$$N = N_0(1 + \delta_N), \quad N_n = N_{n0}(1 + \delta_N),$$

$$T_{e,i,n} = T_{e0,i0,n0}(1 + \delta_N), \quad \nu = \nu_0(1 + \delta_N)^{11/6}, \quad (3)$$

где N_n – концентрация нейтральных частиц; T_e, T_i, T_n – температуры электронов, ионов и нейтралов соответственно; $\delta_N = \sum \delta_{Nmj} \cos \Phi_j$, $\Phi_j = \Omega_j t - \mathbf{k}_j \mathbf{r} + \Phi_{0j}$,

где Ω , \mathbf{k} , Φ_{0j} и δ_{Nm} – частота, волновой вектор, начальная фаза и относительная амплитуда ВВ, \mathbf{r} – радиус-вектор. Здесь и далее нулевым индексом обозначается значение параметра в отсутствие гармонических возмущений. В (3) учтено, что $\nu \sim N_n T_e^{5/6} \sim N_n T_n^{5/6}$ [4].

Можно показать (см., например, [5]), что в верхней мезосфере (80–90 км) для $\overline{\Delta N^2}$ и K_{\pm} справедливы следующие приближенные выражения:

$$\overline{\Delta N^2} \approx \overline{\Delta N_0^2} (1 + \delta_N)^{5/2}, \quad K_{\pm} \approx K_{\pm 0} (1 + \delta_N)^{\alpha_{\kappa}}, \quad (4)$$

$$\alpha_{\kappa} = 17/6 \approx 3.$$

Подставим (3), (4), в (1) и после преобразований и упрощений получим

$$\delta_{\pm \ln a} = \ln(a_{\pm} / a_{\pm 0}) \approx \alpha_{\pm} \delta_N - \beta_{\pm} \delta_N^2, \quad (5)$$

где $a_{\pm} = (\overline{A_{\pm}^2})^{1/2}$, $a_{\pm 0} \approx C^{1/2} \Omega_{\pm}^{-1} (\overline{\Delta N_0^2})^{1/2} \exp(-2K_{\pm 0})$, $\alpha_{\pm} = 5/4 - 6K_{\pm 0}$, $\beta_{\pm} = 5/8 + 6K_{\pm 0}$.

Пассивный метод

Как известно [6–7], радиопомехой в среднечастотном диапазоне является шумоподобное радиоизлучение, распространяющееся в волноводе Земля – ионосфера. При этом можно показать (см., например, [5]), что выражение для среднеквадратичного значения огибающих обыкновенной и необыкновенной волн радиопомехи $A_{\pm n}^2$ имеет приближенный вид

$$\begin{aligned} A_{\pm n}^2 &\approx \sum_j A_{\pm ij}^2 \cos^2 \varphi_{\pm ij} + \sum_j A_{ej}^2 \cos^2 \varphi_{ej} = \\ &= a_{\pm in0}^2 e^{-2K_{\pm in}} + a_{en0}^2 e^{-2K_{en}}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $A_{\pm ij}$ и A_{ej} – огибающие ионосферной и земной волн радиопомехи; $\varphi_{\pm ij}$ φ_{ej} – их начальные фазы; $K_{\pm in}$ и K_{en} – эффективные интегральные коэффициенты поглощения ионосферных и земных волн. Здесь и далее индекс n соответствует параметрам радиопомехи, а индексы i и e – ионосферной и земной волнам.

АГВ вызовут модуляцию $K_{\pm in}$ согласно закону изменения для K_{\pm} в (4). Подставляя выражение для $K_{\pm in}$ в (6), после преобразований и упрощений получим

$$\delta_{\pm ln} = \ln \frac{(1 + \beta_{\pm ie}^2) a_{\pm n}^2 - a_{\pm n0}^2}{\beta_{\pm ie}^2 a_{\pm n0}^2} \approx \alpha_{\pm n} (\delta_N + \delta_N^2), \quad (7)$$

где $\beta_{\pm ie}^2 = (a_{\pm in0} / a_{en})^2 e^{-2(K_{\pm in0} - K_{en})}$ – отношение мощностей ионосферной и земной волн в отсутствие АГВ; $\alpha_{\pm n} = -6K_{\pm in0}$.

Заметим, что при $\delta_N \ll 1$ в выражениях (5) и (7) можно пренебречь квадратичными слагаемыми, что приведет к линеаризации зависимостей $\delta_{\pm ln}$ и $\delta_{\pm ln}$ от δ_N .

Результаты наблюдений ВВ

Исследования параметров ВВ проводятся при помощи среднечастотного радара (рабочая частота 2–3 МГц), расположенного в Радиофизической обсерватории Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Описание радара и его технические характеристики приведены в работах [8–9]. Непрерывные продолжительные (не менее 5 ч) измерения проводились в 2000–2005 гг. во все времена суток, сезоны и при различной геомагнитной обстановке (индекс $K_p = 0–9$). Всего было обработано более 250 ч активным и более 450 ч пассивным методами. Методика обработки исходных данных детально описана в работе [5]. Для нахождения значений относительных амплитуд ВВ применялось преобразование Фурье вида [5]

$$X_{\pm a,n}(T, t_m) = \frac{2\gamma\Delta t}{t_w} \sum_{t_1=t_m-t_w/2}^{t_m+t_w/2} \delta_{\pm ln a,n} w(t_1) e^{-i\Omega t_1},$$

где t_m – середина временного интервала обработки; t_w – его ширина, зависящая от T ($t_w = 3T$ в нашем случае); Δt – шаг по времени, $w(t_1) = 0.54 + 0.46 \cos[2\pi(t_1 - t_m)/t_w]$ – окно Хэмминга, $\gamma \approx 1.6$ – нормировочный множитель, i – мнимая единица. Решение о присутствии ВВ принималось на основании критерия Фишера (см., например, [5, 10]).

На рис. 1 представлены примеры временных зависимостей относительных изменений электронной

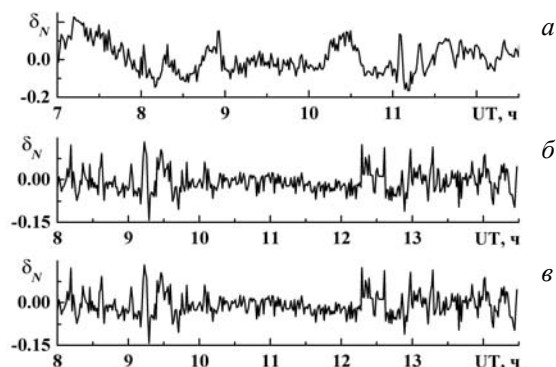


Рис. 1. Примеры временных зависимостей δ_N от времени, полученные активным (а) и пассивным (б, в) методами для 13.11.2004 г. (а), 15.08.2001 г. (б), 06.02.2001 г. (в).

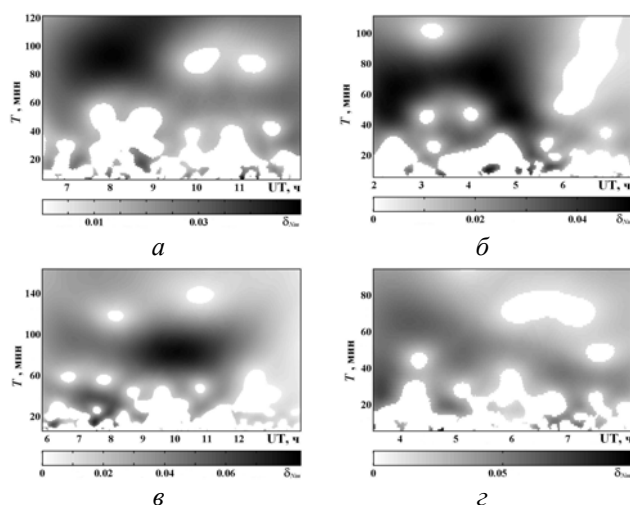


Рис. 2. Примеры динамических спектров относительных амплитуд ВВ для 22.01.2005 г. (а), 15.05.2002 г. (б), 23.07.2003 г. (в), 31.10.2002 г. (г).

концентрации, полученных активным и пассивным методами. Видно, что имели место квазипериодические процессы с различными периодами, амплитудами и имеющие различную длительность (часто 2–3 периода). Максимальные значения δ_{Nm} обычно не превышали значения 0.2.

Результаты спектрального анализа приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что ВВ в мезосфере с $T \approx 5–120$ мин существуют во все сезоны года. Их относительные амплитуды и периоды испытывают существенные вариации за время наблюдения. Не выявлена четкая зависимость параметров ВВ от сезона.

Результаты статистического анализа параметров ВВ изображены на рис. 3. В качестве статистических характеристик использовались относительная частота амплитуд δ_{Nm} и относительная суммарная продолжительность ВВ. Анализ показал, что распределения δ_{Nm} близки к распределению Рэля. Средняя относительная амплитуда ВВ равнялась 2–4 %, а максимальная – 7–15 %. Проявляется тенденция к увеличению средних значений и дисперсий ВВ с ростом магнитной активности. Для ВВ с $T = 5–35$ мин

обнаружена квазилинейная зависимость v_δ от периода.

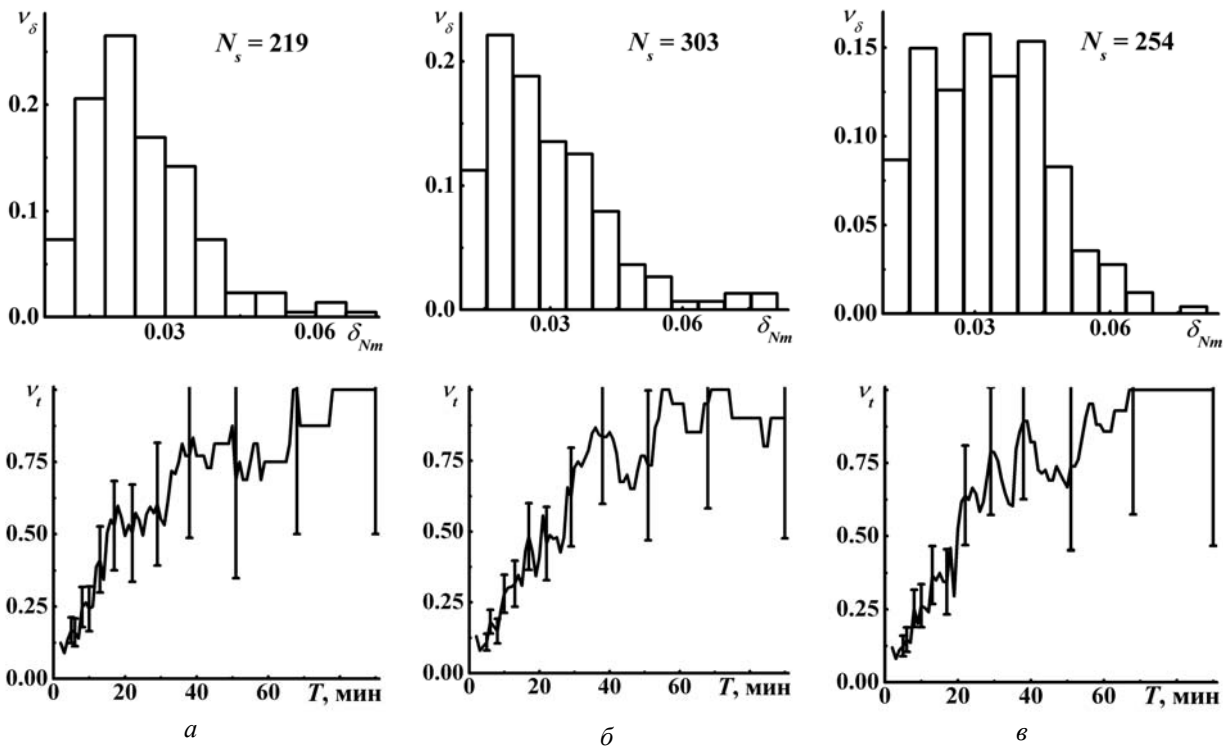


Рис. 3. Примеры относительных частот v_δ и зависимостей относительной суммарной продолжительности колебаний v_t от их периода для слабовозмущенных (а), возмущенных (б) и сильновозмущенных (в) дней.

Обсуждение

Преимущества и недостатки активного и пассивного методов

Радарные методы выявления ВВ получили широкое распространение, поскольку позволяют проводить непрерывный мониторинг ВВ в течение суток. При их использовании информация о параметрах ВВ обычно получают по временным зависимостям горизонтальной скорости ветра $V(t)$ или реже электронной концентрации $N(t)$ (см., например, [11–12]). При расчете таких зависимостей решается достаточно сложная система нелинейных уравнений, что приводит к значительным и трудно контролируемым погрешностям определения параметров ВВ с малыми периодами ($T \leq 20\text{--}30$ мин). Активный и пассивный методы позволяют определять параметры ВВ с $T \geq 2$ мин и относительной погрешностью менее 30 % [12].

Активный метод обладает достаточно хорошим разрешением по высоте (около 3 км), в отличие от методов метеорных отражений [13], лидарных методов [14] и пассивных методов, основанных на анализе характеристик радиопомех ОНЧ- и НЧ-диапазонов [15]. К недостаткам метода относятся ограниченное время наблюдения (в ночное время область D исчезает), узкий диапазон исследуемых высот (обычно 70–90 км), а также необходимость в достаточно сложном приемопередающем оборудовании.

Достоинством пассивного метода является отсутствие радиопередающего устройства, что делает его экономически выгодным. Данный метод при благоприятных условиях применим в течение всего времени суток. Его недостатками являются отсутствие

высотного разрешения, некоторое «смазывание» картины ВВ из-за интерференции радиопомех, входящих с разных направлений, а также уменьшение чувствительности в дневное время и при наличии близко расположенных мощных радиостанций, что приводит к возникновению достаточно интенсивных земных волн радиопомехи.

Результаты анализа квазипериодических процессов

Анализ показал, что наблюдаемые в мезосфере ВВ условно можно разделить на два типа.

1. ВВ с периодами 5–25 мин имели продолжительность 15–50 % времени наблюдения. Такие ВВ могут быть вызваны локальными источниками, такими как ветровые сдвиги, турбулентность, неоднородностями рельефа, антропогенными воздействиями и др.

2. ВВ с периодами 30–120 мин наблюдались в 75–90 % случаев. Они, вероятно, вызваны глобальными процессами: вариациями космической погоды в высоких широтах, циклонической активностью, прохождением солнечного терминатора и др. В этот диапазон периодов попадают также собственные моды колебаний Земли и атмосферы [16–17].

Близость распределения амплитуд колебаний закону Рэлея указывает на большое количество факторов, оказывающих совместное влияние на генерацию и распространение ВВ. Увеличение суммарной относительной продолжительности ВВ с ростом их периода, по-видимому, вызвано меньшей диссипацией ВВ с большими периодами по сравнению с короткопериодными.

Выводы

1. Развита теоретическая основа активного и пассивного методов выявления ВВ в мезосфере. Продемонстрировано, что эти методы позволяют исследовать параметры АГВ с периодами 2–120 мин на протяжении всего времени суток. Они расширяют возможности радаров среднечастотного диапазона по изучению динамических процессов в мезосфере.

2. На основании сравнительно больших массивов данных проанализированы особенности ВВ в мезосфере. Выявлены два типа ВВ, имеющие, по-видимому, различные источники генерации. Показано, что ВВ существуют на протяжении всего времени наблюдения. Их средняя относительная амплитуда составила 2–4 %, а ее максимальное значение равнялось 7–15 %. Обнаружена тенденция к увеличению относительных амплитуд ВВ с ростом магнитной активности. Не выявлена зависимость параметров ВВ от времени суток и сезона.

Авторы выражают благодарность проф. Черногору Л.Ф., предложившему активный и пассивный методы выявления волновых возмущений, за помощь при подготовке работы и интерпретации результатов измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 1. С. 59–106.

2. Иванов В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений. Йошкар-Ола: ВИНТИ, 1985. 196 с.

3. Черногор Л.Ф. Возмущение неоднородной структуры в нижней ионосфере под действием мощного радиоизлучения // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28, № 1. С. 17–26.

4. Госсард Э.Э., Хук У.Х. Волны в атмосфере. М.: Мир, 1978. 532 с.

5. Панасенко С.В., Черногор Л.Ф. Результаты радиофизических исследований волновых возмущений в нижней ионосфере // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 7. С. 38–56.

6. Алебастров В.А., Гойхман Э.Ш., Заморин И.М. и др. Основы загоризонтной радиолокации. М.: Радио и связь, 1984. 256 с.

7. Комарович В.Ф., Сосунов В.Н. Случайные радиопомехи и надежность КВ-связи. М.: Связь, 1977. 136 с.

8. Панасенко С.В. Параметры динамических процессов в области мезопаузы по данным харьковского радара частичных отражений // Труды VII Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом», БШФФ, 13–15 сентября 2004 г. Иркутск 2004. С. 148–151.

9. Панасенко С.В., Розуменко В.Т., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Результаты исследования динамических процессов в мезосфере при помощи радара частичных отражений // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 3. С. 36–54.

10. Андерсон Т. Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 755 с.

11. Manson A.H., Meek C.E., Koshyk J. et al. Gravity wave activity and dynamical effects in the middle atmosphere (60–90 km): observations from an MF/MLT radar network, and results from the Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM) // J. Atm. Sol. Terr. Phys. 2002. V. 64, N 1. P. 65–90.

12. Данилов А.Д., Казимировский Э.С., Вергасова Г.В., Хачикян Г.Я. Метеорологические эффекты в ионосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 344 с.

13. Кашеев Б.Л., Олейников А.Н. Пространственно-временная структура внутренних гравитационных волн в области мезопаузы – нижней термосферы по радиолокации метеоров // Геомагнетизм и аэрномия. 2001. Т. 41, № 3. С. 382–387.

14. Аушев В.М., Ашкалиев Я.Ф., Винс Р.Х. и др. Спектр атмосферных гравитационных волн в мезосфере и термосфере // Геомагнетизм и аэрномия. 2002. Т. 42, № 4. С. 560–568.

15. Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Дружин Г.И., Капустина О.В. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44, № 2. С. 245–253.

16. Karpova N.V., Petrova L.N., Shved G.M. Statistical study of seismic and ground pressure oscillations with steady frequencies in the 0.7–5 period range // Ann. Geophys. 2002. V. 20, N 6. P. 823–833.

17. Shved G.M., Petrova L.N., Polyakova O.S. Penetration of the Earth's free oscillations at 54 minute period into the atmosphere // Ann. Geophys. 2000. V. 18, N 5. P. 566–572.