

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВГВ МЕТОДОМ РАДИОЛОКАЦИИ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ

Олейников А.Н., Сосновчик Д.М.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

61166, Харьков, пр. Ленина, 14, каф. ОПТ, (057) 702-14-79, sdm_apolo13@rambler.ru

In this paper is considered improvement the methods of revealing internal gravity waves (IGW) on radiometeoric data in the mesopause – lower thermosphere region. In proposed algorithm is recommended use wavelet analysis and robust least square fitting. Histograms of the IGW vertical wavelength and directions of the energy propagation, IGW period and the time moments of their occurrence during the day are submitted.

Введение. Исследования ветрового режима атмосферы Земли показали существенное влияние внутренних гравитационных волн (ВГВ) на динамические процессы и энергетический баланс в области мезопаузы – нижней термосферы. Распространяясь из нижних слоев либо зарождаясь в верхней атмосфере, ВГВ дают существенный вклад в импульс, энергию и влияют на общую циркуляцию и температурный режим в верхней атмосфере. За последние десятилетия большое количество информации о ВГВ было получено благодаря различным методам исследования.

В настоящей работе представлены результаты радиометеорных исследований, проведенных с использованием автоматического угломера метеорной радиолокационной станции в Харьковском национальном университете с целью получения индивидуальных пространственно-временных параметров ВГВ и установления особенностей их распределения.

Автоматический угломер метеорной РЛС (АУ МРЛС) предназначен для исследования динамических параметров атмосферы Земли на высотах 80-105 км с возможностью выявления высотной структуры ветровых движений. АУ МРЛС состоит из пятиэлементной антенной системы, ориентированной в восточном направлении, и производит измерение радиальной скорости дрейфа, угловых координат (азимут и угол места), наклонной дальности до отражающей области метеорного следа.

Методика обработки данных. В качестве исходного алгоритма обработки радиометеорных данных, для получения информации о ВГВ, использовался алгоритм, суть которого заключается в следующем. Зона, обозреваемая МРЛС, разбивается на отдельные слои по высоте и зоны по дальности. Для эффективного проведения спектрального анализа временной ряд горизонтальных значений скорости ветра подвергается низкочастотной и высокочастотной фильтрации. По рассчитанным спектрам горизонтальных скоростей отдельных областей, разнесенных по дальности, находится осредненный спектр для каждого высотного слоя. Одновременно производится разделение спектра на когерентную составляющую спектральной плотности и шумовую. Наличие максимума в спектре на частоте предполагаемой волны – обязательное, но недостаточное условие обнаружения ВГВ. Отождествление колебаний с ВГВ осуществляется исходя из следующих критериев:

- повторение максимумов в спектре на частоте предполагаемой волны в слоях по высоте и зонах по дальности;
- близкое к линейному изменение фазы волны по дальности и высоте;
- превышение амплитуды волновых составляющих над шумами;
- ширина максимумов в спектре не превышает полосу пропускания частотного фильтра.

Отобранные указанным образом реализации анализируются на предмет определения пространственно-временных и энергетических параметров ВГВ.

В процессе исследования работы этого алгоритма были выявлены некоторые его недостатки:

а) в алгоритме не учитывалось время существования ВГВ, что привело к ухудшению выявления волн, длительность которых меньше времени Фурье-анализа;

б) при оконном Фурье-преобразовании возникают боковые гармоники в спектре, которые затрудняют выделение соседних колебаний;

в) метод наименьших квадратов, который используется при аппроксимации зависимостей дальность-фаза и высота-фаза, приводит к существенным ошибкам, если в обрабатываемых данных встречаются резкие выбросы результатов расчета, которые неизбежно встречаются при обработке больших массивов данных.

В результате обработки большого массива данных было выявлено, что модель ВГВ можно представить в следующем виде (рис. 1). При зарождении волны её амплитуда возрастает, достигая своего апогея, после чего наступает момент её распада и амплитуда уменьшается.

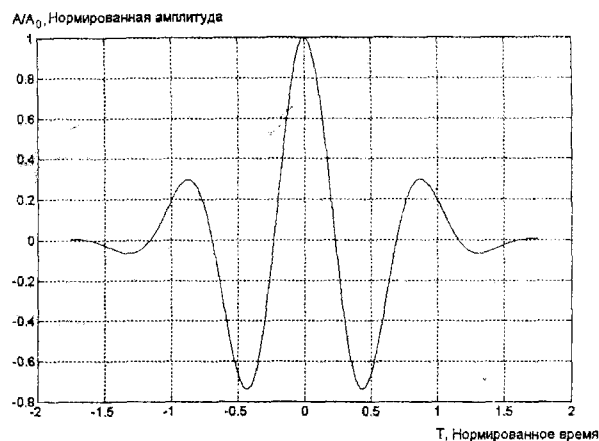
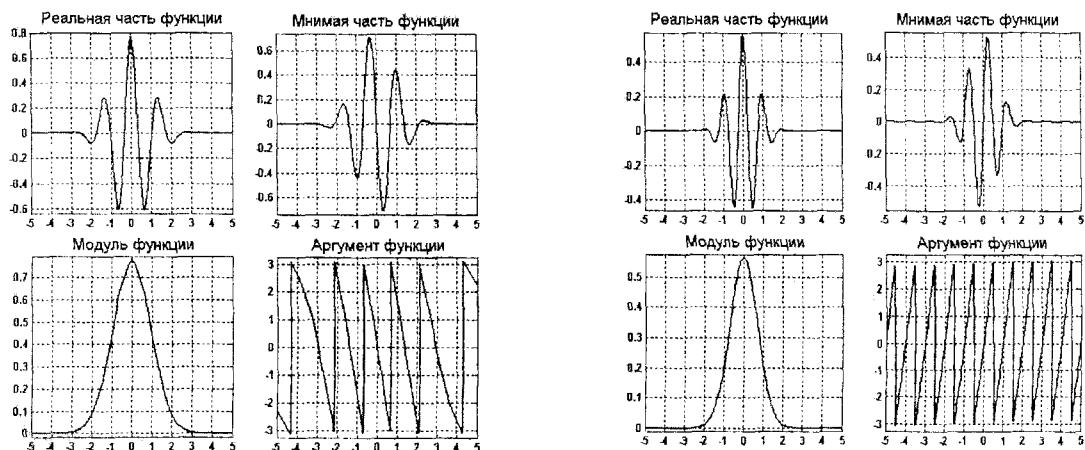


Рис. 1.

Для устранения указанных недостатков с учётом принятой модели ВГВ в модифицированном алгоритме обработки радиометеорных данных предложено использовать:

1. *Вейвлет-анализ, при нахождении амплитудного и фазового спектров.* Такой выбор спектрального анализа является предпочтительным по двум причинам. Во-первых, вейвлет-анализ можно проводить с использованием базовых вейвлет-функций, максимально подобных к структуре ВГВ (рис. 2). Во-вторых, нет необходимости производить выбор временного окна при спектральном анализе, так как вейвлет-анализ «адаптирован» к нахождению сигналов с различными длительностями. На рис. 2 представлены комплексный вейвлет Гаусса 8-го порядка и комплексный вейвлет Морлета с параметрами $f_c=1$ и $f_b=1$ и их аналитические выражения, применимые для обнаружения ВГВ.

2. *Аппроксимация фазовых зависимостей робастным методом наименьших квадратов.* В большинстве случаев ошибки измерений распределены по нормальному закону, и большие значения ошибок встречаются очень редко. Точки с большим значением ошибки принято называть промахами. Наибольший недостаток при аппроксимации методом наименьших квадратов это чувствительность к промахам. Последние сильно влияют на результат аппроксимации, вследствие того, что производится минимизация квадрата ошибки. Для уменьшения влияния промахов предложено использовать робастную аппроксимацию. Она снижает их влияние, оставляя типовой алгоритм аппроксимации метода наименьших квадратов. Робастная аппроксимация позволяет снизить погрешность определения горизонтальной и вертикальной длины гравитационной волны при наличии промахов в результатах.



$$\psi_p(x) = C_p \left(e^{-jx} e^{-\frac{x^2}{2}} \right)^p,$$

где p – порядок вейвлета;
 C_p – масштабирующий множитель

а

$$\psi(x) = \sqrt{\pi f_b} \cdot e^{j2\pi f_c x} e^{-\frac{x^2}{f_b}},$$

где f_c – центральная частота вейвлета,
 f_b – параметр полосы пропускания

б

Рис. 2

Основные результаты исследования. Ниже приведены результаты обработки радиометеорных данных полученных в период июль-август 1998 и 1999 годов (124 сут.) во время проведения программы INTAS 96-1669 Experimental and theoretical investigation of tide modulation by planetary waves, по алгоритму, в котором были использованы вейвлет-анализ и робастная аппроксимация [1]. За этот период было обнаружено более 1 500 волн и определены их пространственно-временные параметры.

На рис. 3 представлены гистограммы распределения вертикальной и горизонтальной длины ВГВ. Для удобства восприятия полученных результатов на рис. 3 положительные значения длин волн соответствуют распространению энергии ВГВ вверх и в западном направлении, а отрицательные значения – распространению энергии ВГВ вниз и на восток. Наиболее вероятные значения вертикальной длины волн λ_z составляют 10÷30 км, для любого направления распространения энергии ВГВ. Преобладающим направлением распространения энергии волн является восходящее. Соотношение между восходящими и нисходящими потоками составляет 65% к 35%, соответственно. Доминирующие горизонтальные длины волн $\lambda_x = 100÷500$ км. В отличие от вертикального распространения волн, горизонтальное – не имеет ярко выраженного характера. Соотношение между западным и восточным направлением распространения составляет 56% к 44%, соответственно.

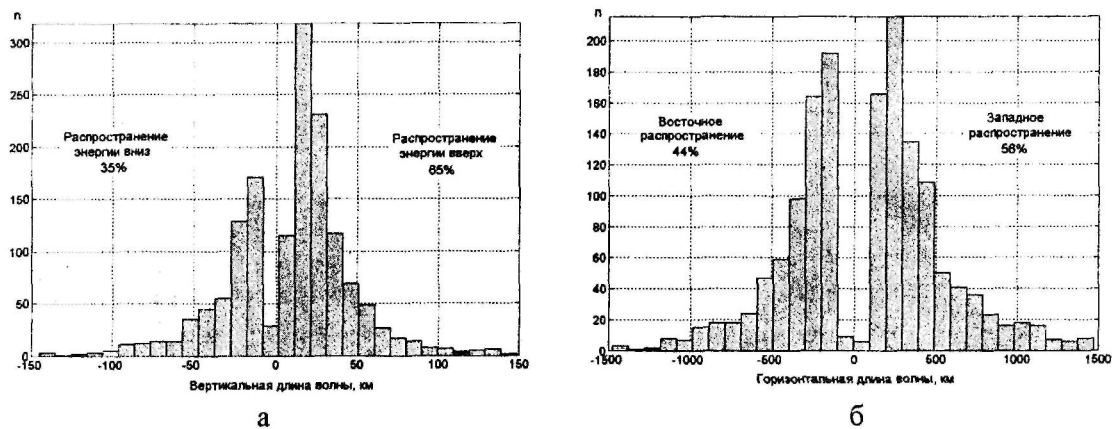


Рис. 3

На рис. 4 представлены гистограммы распределения периодов ВГВ и моментов времени их появления в течение суток. Гистограмма моментов времени появления ВГВ (рис.4б) имеет один слабо выраженный максимум, который расположен в области ранних утренних часов наблюдений. Гистограмма распределения периодов ВГВ (рис.4а) может быть описана экспоненциальной зависимостью. Преобладающими являются высокочастотные ВГВ с периодами $0,8 \div 2$ ч. Вероятность появления ВГВ с большими периодами, уменьшается с увеличением их периода.

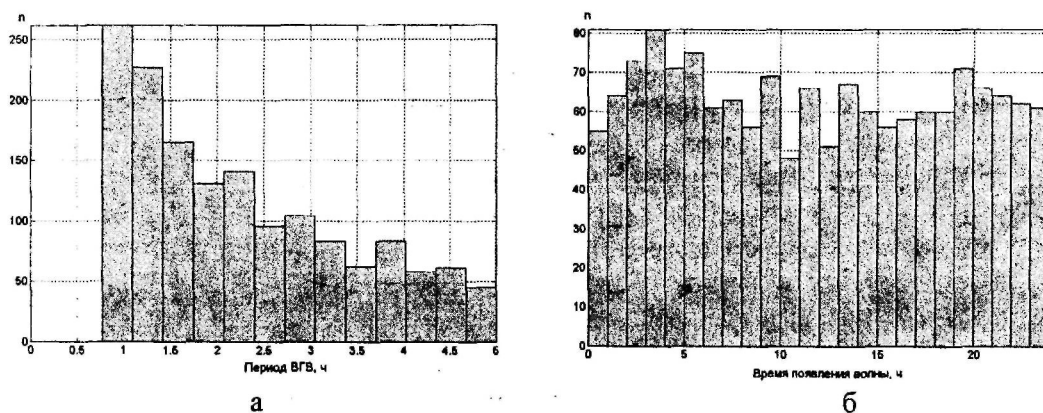


Рис. 4

Полученные распределения пространственно-временных параметров ВГВ достаточно хорошо согласуются с результатами исследования других авторов, которые представлены в более ранних работах [2-4].

В работах [2,3] распределение частот ВГВ имеет равномерный характер, в то время как полученное распределение периодов ВГВ, представленное на рис. 4, показывает доминирование высокочастотных ВГВ (короткопериодические волны).

Заключение. В данной работе представлены результаты процедуры выявления внутренних гравитационных волн по радиометеорным данным с использованием вейвлет-анализа при нахождении спектров горизонтальных скоростей ветра. Использование в алгоритме вейвлет-анализа и робастной аппроксимации, позволило увеличить количество идентифицируемых волн и снизить погрешность определения пространственно-временных параметров ВГВ.

Впервые получено распределение вертикальных длин волн и направления распространения энергии ВГВ по радиометеорным данным. На гистограмме (рис. 3а) видно яркое доминирование восходящего распространения энергии ВГВ (65%).

Найдено распределение времени появления ВГВ в течение суток (рис. 4б). Распределение имеет приблизительно равномерный характер, с небольшим максимумом в области 3÷7 часов. Гистограмма периодов ВГВ (рис. 4а) показывает явное доминирование высокочастотных ВГВ.

Литература

1. A.N. Oleynikov, Ch. Jacobi, D.M. Sosnovchik Time-spatial parameters of internal gravity waves in the mesosphere-lower thermosphere region derived from meteor radar wind measurement / Wiss. Mitt. Inst. fur Meteorol. Univ. Leipzig, 36, 125-134.2.
2. Кальченко Б.В., Кашеев Б.Л., Олейников А.Н. Радиометеорные исследования вертикальной структуры внутренних гравитационных волн и нерегулярных движений // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т.21. №2. С.123.
3. Gavrilov N.M., Fukao S., Nakamura T., Tsuda T., Yamanaka M. D. and Yamamoto M. Statistical analysis of gravity waves observed with the middle and upper atmosphere radar in the middle atmosphere: 1. Method and general characteristics // Geophys. J. Res., 101, 29 511-29 521, 1996.
4. Калов Е.Д., Гаврилов Н.М. Исследование сезонных изменений параметров гравитационных волн в метеорной зоне // Изв. АН СССР. ФАО. 1985. Т.21. №10. С.1036.