

*Г.В. ЛИЗУНОВ*, канд. физ.-мат. наук, с.н.с., зав. лабораторией, Институт космических исследований НАН и НКА Украины  
*А.А. КУЗЬМИЧ*, аспирант, Институт космических исследований НАН и НКА Украины

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ АТМОСФЕРНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

Дана работа присвячена розробці методики виділення атмосферних гравітаційних хвиль (АГХ) на фоні крупномасштабного тренду. В роботі розглянуто фільтр, що може бути застосований для виділення АГХ з даних, та оцінена точність бортових вимірювань.

This work deals with methodology of atmosphere gravity waves (AGW) extraction on the background of high-scale variation. The filter, which could be employed to AGW extraction was considered here, and data precision have been estimated.

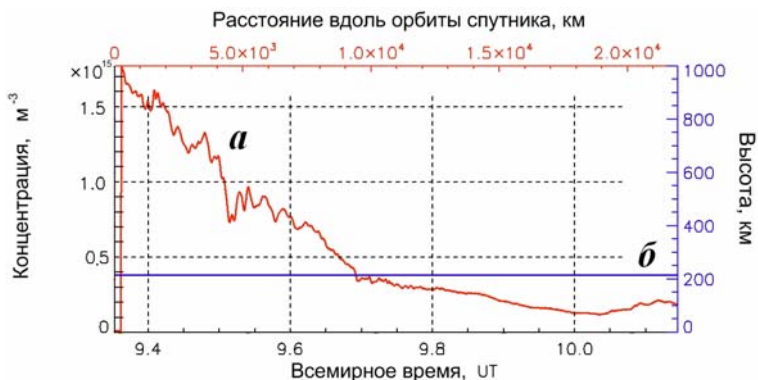
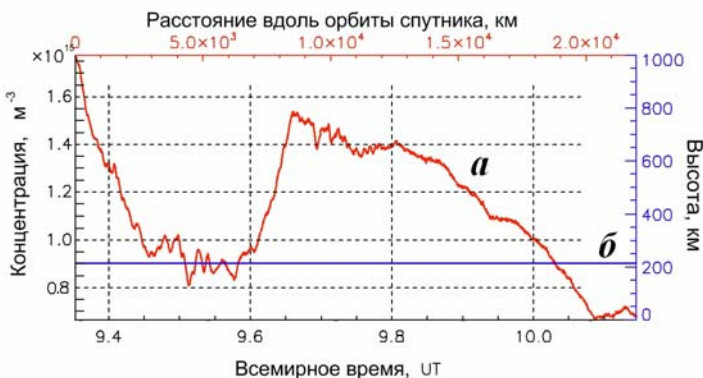
**Постановка задачи.** Атмосферные гравитационные волны (АГВ) на ионосферных высотах – основной тип свободных колебаний верхней нейтральной атмосферы с периодами десятки минут и горизонтальными длинами волн от сотен до более полутора тысяч километров. Выявление и количественный анализ АГВ являются сложной задачей.

На рис. 1 и рис. 2 визуализирован ход концентраций основных атмосферных газов [O] и [N<sub>2</sub>] вдоль одного из орбитальных витков спутника Dynamics Explorer 2 (далее DE 2). Крупномасштабное изменение концентраций отражает, преимущественно, широтный ход атмосферных параметров; мелкомасштабные вариации являются АГВ. На этих примерах рассмотрим задачи обработки спутниковых данных.

На первом этапе мы только предполагаем, что нерегулярности кривых на рис. 1 и рис. 2 вызваны АГВ, т.е. отображают свободные колебания нейтральной атмосферы. Потому что на тех же пространственных масштабах под действием сторонних сил могут происходить и вынужденные колебания (как, например, в дугах полярных сияний, где происходит нагрев и ускорение воздушных масс). Кроме того, мелкомасштабные колебания наблюдаются на фоне крупномасштабного хода параметров – “тренда”, спектр которого содержит “хвост” коротких гармоник, вообще говоря, перекрывающий и область длин волн АГВ. Поэтому задача обработки данных состоит в корректном выделении волновых форм на фоне других типов атмосферных вариаций того же спектрального диапазона, в частности – на фоне тренда.

В случае волн малой амплитуды указанные трудности становятся непреодолимыми. В литературе мы находим примеры исключительно сильных возмущений, когда на экспериментальных эпюрах АГВ видны «на глаз» и анализ параметров АГВ не требует специальной математической обработки. Являясь скорее иллюстративными, чем репрезентативными, такие

случаи не дают представления о действительной картине волновой активности: глобальном распределении АГВ, характерных параметрах волн, статистике.



**Анализ литературы.** Эксперименты с синхронной регистрацией нейтральных и заряженных компонент атмосферы осуществлялись в 70-е и начале 80-х гг. XX века на спутниках серии Atmosphere Explorer и спутнике DE 2 [1, 2]. Датчики нейтральных частиц также устанавливались на Space Shuttle (эксперимент STS) и орбитальных станциях Spacelab 2 и “Мир” [3, 4], но возмущение атмосферы при движении столь больших космических аппаратов не позволяло наблюдать на них природные волновые процессы.

Наблюдения АГВ на спутниках описаны в работах [см., например, 5 – 7 и ссылки в них], где рассматривались АГВ достаточно большой амплитуды, чьи параметры можно оценить визуально. Методика анализа АГВ произвольной амплитуды впервые развита в цикле работ [8 – 10], продолжением которых является и настоящее исследование.

**Цель статьи** – разработка методологии выявления АГВ в данных спутниковых измерениях, анализ возникающих погрешностей и спектральное оценивание волновых характеристик.

**Методика выделения волновых форм АГВ.** Введём обозначения:

$A$  – значение атмосферного параметра, измеряемого на спутнике (отсчёт);

$t$  – момент времени измерения;

$x = V_{sat}t$  – координата, исчисляемая вдоль траектории спутника. Таким образом,  $A = A(x)$ ;

$\bar{A}$  – осреднённое значение параметра  $A$ ;

$\delta A = A - \bar{A}$  – абсолютная вариация параметра;

$\delta a = \delta A / \bar{A}$  – относительная вариация;

$a_k = \delta a \exp(ik_x x)$  – спектральная плотность (амплитуда) относительной вариации.

Зададим преобразование Фурье:

$$F(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x) e^{-ik_x x} dx, \quad F(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(k_x) e^{ik_x x} dk_x \quad (1)$$

и операцию осреднения данных

$$\bar{A}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x') A(x - x') dx', \quad (2)$$

где  $u$  – окно осреднения. В случае прямоугольного окна

$$u = u_R = \begin{cases} 1/L_R, & |x| \leq L_R/2 \\ 0, & |x| > L_R/2 \end{cases} \quad (3)$$

Выражение (2) порождает скользящее среднее Рейнольдса:

$$\bar{A}(x) = \frac{1}{L_R} \int_{-L_R/2}^{L_R/2} A(x - x') dx', \quad (4)$$

где  $L_R$  – интервал осреднения. Процедура (2), очевидно, устраняет из данных коротковолновые вариации с масштабами  $\lambda_x < L_R$ . Фильтр высоких частот

$$\delta A(x) = A(x) - \bar{A}(x), \quad (5)$$

наоборот, их пропускает. Обработка данных с использованием указанных процедур искажает исследуемый спектр данных. Действительно, согласно теореме о свёртке, Фурье-образ сигнала (2) равен

$$\bar{A}(k_x) = u(k_x) A(k_x). \quad (6)$$

Таким образом, операция осреднения эквивалентна частотной фильтрации в спектральном окне  $u(k_x)$ . Если, например, осреднение осуществляется с использованием скользящего среднего (3), то из исходного спектра сигнала будет вырезаться сложная смесь гармоник, вплоть до самых высокочастотных, с различными весовыми множителями, которые пропорциональны  $\text{sinc}(k_x L_R/2)$ . Исследователь может полагать, что отсеивает только ненужную информацию (в данном случае не интересующий его низкочастотный тренд), а в действительности модифицирует весь спектр исследуемого сигнала. Для неискажающего выделения волновых форм сигнала необходимо, чтобы окно осреднения было прямоугольным в частотной области – чему соответствует “синк” в пространстве. Но такое окно плохо вписывается (зачастую не вписывается) в конечную по длительности выборку экспериментальных данных.

С учётом приведенных соображений, в данной работе предлагается фильтровать измерения АГВ с использованием специально сконструированного окна осреднения (рис. 3, 4):

$$u(x) = \frac{2}{bL} \exp\left(-\frac{x^2}{a^2 L^2}\right) \text{sinc}\left(2\pi \frac{x}{L}\right), \quad b = \text{erf}(a\pi), \quad (7)$$

где  $a$  – подгоночный параметр,  $b$  – константа нормировки (при  $a \geq 1$  значение  $b \approx 1$ ). Отметим, что окно (7) компактно в пространстве, но имеет почти прямоугольный частотный спектр.

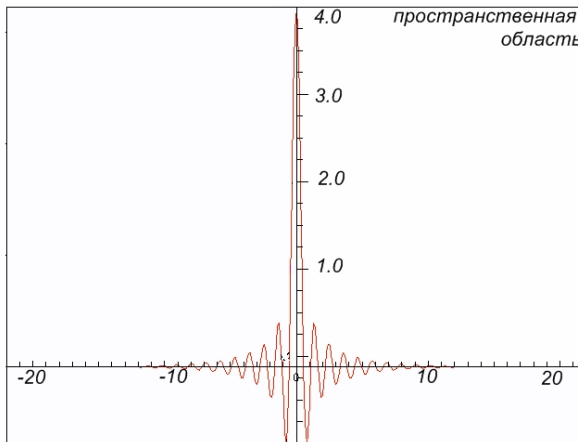


Рис. 3. Окно осреднения “модифицированный синк”

**Результаты обработки данных.** Ниже представлены результаты обработки данных DE 2 (находятся в открытом доступе на веб-ресурсе НАСА “National Space Science Data Center”). Спектральное оценивание АГВ производится с использованием дискретного преобразования Фурье, при

этом приведенные выше интегральные соотношения заменяются дискретными суммами.

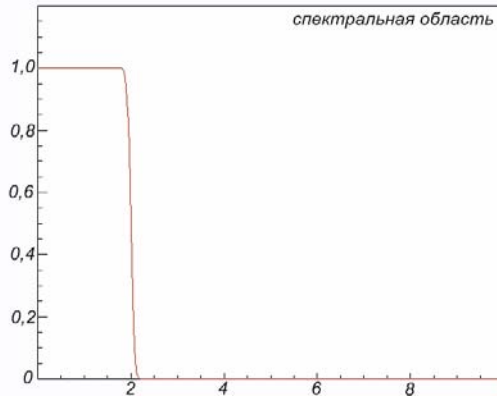


Рис. 4. коэффициент усиления фильтра, построенного на основе окна осреднения “модифицированный синк”

*Мелкомасштабные вариации*  $16 < \lambda_x < 100$  км. На рис. 5 представлен результат фильтрации данных измерений по формулам (2), (5) и (7) при значении масштаба осреднения  $L = 30$  км, близком к масштабу Найквиста. Как видно из рисунка, мелкомасштабная фильтрация выделяет шумовую дорожку, свидетельствующую, что каждый последующий отсчет случайным образом отклоняется от регулярного хода измеряемого параметра; это оценка инструментальной погрешности измерений. Аналогичные шумовые дорожки выделялись и на всех других витках измерений, причём характер шумов слабо зависел от конкретного выбора масштаба осреднения  $L$  (вплоть до среднемасштабных значений  $L \sim 100$  км).

Таким образом, была постфактум оценена инструментальная точность измерений на DE 2. В представленном на рис. 5 примере (регистрация концентрации кислорода  $[O]$  прибором NACS), относительная погрешность измерений составляла  $\delta a \sim 10^{-3}$ . Аналогичным образом были оценены погрешности измерений концентрации молекулярного азота  $[N_2]$  (прибор NACS), температуры нейтрального газа  $T$  (прибор WATS), концентрации плазмы  $[O^+]$  (прибор RPA), величины которых также составили  $\sim 10^{-3}$ . При характерных амплитудах регистрируемых АГВ порядка нескольких процентов (см. ниже), и в предположении о том что, среднее квадратичное отклонение измерений в полосе исследуемых масштабов  $16 \dots 1600$  км примерно постоянно, отношение сигнал/шум составляет  $\sim 10$ .

*Среднемасштабные вариации*  $100 < \lambda_x < 700$  км. Фильтрация производилась с окном усреднения  $L = 700$  км. Полученные таким образом волновые формы АГВ представлены на рис. 6.

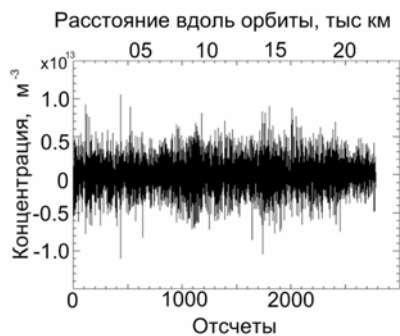


Рис. 5. Мелкомасштабные вариации, полученные с помощью окна осреднения “модифицированный синк”

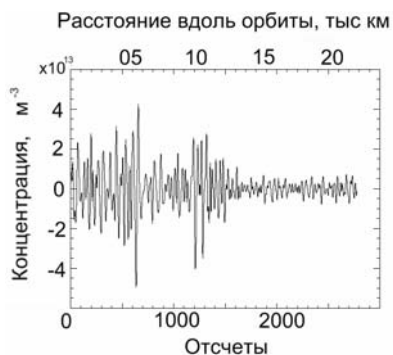


Рис. 6. Среднемасштабные вариации, полученные с помощью окна осреднения “модифицированный синк” в диапазоне длин волн 100 – 700 км

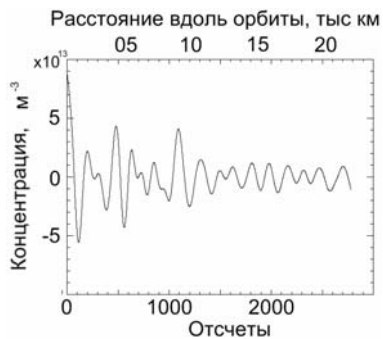


Рис. 7. Крупномасштабные вариации, полученные с помощью окна осреднения “модифицированный синк” с диапазонами длин волн 700 – 2000 км

*Крупномасштабные вариации*  $700 < \lambda_x < 2000$  км. Фильтрация данных проводилась с окном  $L = 2000$  км. Полученные таким образом волновые формы АГВ представлены на рис. 7.

**Выводы:**

1. При анализе АГВ малой амплитуды на фоне трендов возникают трудности, связанные с перекрытием коротковолнового “хвоста” тренда и спектрального состава АГВ.

2. Для селекции волновых пакетов АГВ “сконструирован” фильтр, компактный в пространственной области, разрешающий достаточно узкие спектральные полосы, и не искажающий спектр сигнала.

3. Проведена полосовая фильтрация данных спутниковых измерений в ходе которой выделены волновые формы АГВ, а также некоторые крупномасштабные вариации.

4. Оценена реальная приборная погрешность регистрации вариаций атмосферно-ионосферных параметров на DE 2, по порядку относительной величины составляющая  $\sim 10^{-3}$ .

**Список литературы:** 1. *Dalgarno A., Hanson W.B., Spencer N.W., Schmerling E.R.* The Atmosphere Explorer mission // *Radio. Sci.* – 1973. – 8. – P. 263 – 273. 2. *Kramer H.J.* Observation of the Earth and its environment: Survey of missions and sensors. – Berlin: Springer-Verlag, 2002. – 1510 p. 3. *Shawhan S.D., Murphy G.B., Pickett J.S.* PDP initial assesement of the Shuttle orbiter plasma environment // *J. Spacecraft and Rockets.* – 1984. – 21. – P. 387. 4. *Гадион В.Н., Гужва Е.Г., Шувалов В.А. и др.* Результаты исследования собственной внешней атмосферы (СВА) в окрестностях орбитального комплекса “Мир” // X Всесоюзная конференция по динамике разреженных газов. – М.: Наука, 1989. – с. 198. 5. *Del Genio A.D., Schubert G., Straus J.M.* Gravity wave propagation in a diffusively separated atmosphere with height-dependent collision frequencies // *J. Geophys. Res.* – 1979. – 84, NA8. – P. 4371 – 4378. 6. *Фаткуллин М.Н., Заруцкая Е.В., Фаткуллина В.А.* Глобальные пространственные характеристики среднемасштабных волнообразных неоднородностей на высотах области F ионосферы при различных уровнях геомагнитной активности // Препринт № 41 (926). – М.: ИЗМИРАН, 1990. 7. *Hocke K., Schlegel K.* A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // *Ann. Geophys.* – 1996. – 14. – P. 917. 8. *Федоренко А.К., Лизунов Г.В., Роткель Х.* Спутниковые наблюдения квазиволновых возмущений атмосферы на высотах области F, вызванных мощными землетрясениями // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – 45, № 3. – С. 403 – 410. 9. *Лизунов Г.В., Федоренко А.К.* Генерация атмосферных гравитационных волн солнечным терминатором по данным измерений на спутнике “Atmosphere Explorer-E” // Радиофизика и радиоастрономия. – 2006. – 11, №1. – С. 49 – 62. 10. *Федоренко А.К.* Спутниковые наблюдения среднемасштабных акустико-гравитационных волн над полярными шапками // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – 14, №5. – С. 65 – 73.

*Поступила в редколлегию 31.05.2010*