

*А.А. Власов, К. Кауристе, А.И. Погорельцев*

**ИЗУЧЕНИЕ ВНУТРЕННИХ АТМОСФЕРНЫХ  
ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН  
ПРИ ПОМОЩИ EISCAT Svalbard Radar**

*А.А. Vlasov, K. Kauristie, A.A. Pogoreltsev*

**A STUDY OF INTERNAL ATMOSPHERIC GRAVITY WAVE  
USING EISCAT Svalbard Radar**

*В работе представлены результаты исследований внутренних атмосферных гравитационных волн (ВГВ) по данным наблюдений EISCAT Svalbard Radar за май 2007 г. Приводится статистика повторяемости ионосферных возмущений, вызванных ВГВ.*

*Ключевые слова: гравитационные волны, распространение волн, взаимодействие атмосферы и ионосферы.*

*The results of Internal Atmospheric Gravity Waves (AGW) using data collected by EISCAT Svalbard Radar during May 2007 are presented. The occurrence statistics of AGW-induced ionospheric disturbances is shown.*

*Key words: gravity waves, wave propagation, ionosphere-atmosphere interactions.*

## **Вступление**

История исследования внутренних атмосферных гравитационных волн (ВГВ) как явления, вызывающего возмущения в ионосфере, насчитывает почти полвека [Hines, 1960]. На данный момент известно, что: 1) ВГВ наблюдаемые на ионосферных высотах обладают периодами в диапазоне от десятков минут до нескольких часов [Троицкий, 1983], [Hunsucker, 1987], 2) в соответствии с теорией [Hines, 1960] ВГВ обладают характерным наклоном фазового фронта (фазовая скорость направлена вниз), что хорошо согласуется как с результатами наблюдений [Williams, 1989], [Djuth et al., 1997], так и с результатами более реалистичных моделей [Kirchngast et al, 1995], [Kirchengast, 1997]; 3) на основе горизонтальных масштабов можно выделить две основные группы ВГВ – крупномасштабные (длины волн порядка тысяч километров, горизонтальные скорости распространения порядка 1000 м/с) и среднемасштабные (длины волн порядка сотен километров, горизонтальные скорости распространения 100–200 м/с), [Hunsucker, 1987], [Kersley, 1989], [Williams, 1989]. Считается, что основными источниками ВГВ являются как процессы в авроральной ионосфере [Crowley, 1987], [Lewis, 1996], так и динамические процессы в нижней атмосфере [Hunsucker, 1987], [Bristow et al., 1996], однако относительный вклад каждого из данных механизмов на данный момент не до конца ясен. Основной трудностью является отсутствие необходимого количества эмпирических данных.

**Метод исследования**

В данной работе были использованы данные радара обратного некогерентного рассеяния EISCAT Svalbard Radar (ESR), расположенного на архипелаге Шпицберген (широта  $78^{\circ}09'11''$  N, долгота  $16^{\circ}01'44''$  E). Радар посылает зондирующие импульсы в дециметровом диапазоне, которые рассеиваются электронами ионосферной плазмы в соответствии с законами некогерентного рассеяния [Farley, 1971]. Анализ формы спектра принятого сигнала позволяет получить профили основных параметров ионосферной плазмы: электронной концентрации, ионной и электронной температур, скорости дрейфа ионов (Ne, Ti, Te, Vi, соответственно) в E- и F-областях ионосферы (диапазон высот 95–450 км).

Взаимодействуя с ионосферной плазмой, ВГВ приводят к появлению перемежающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [Hines, 1960], которые проявляются в виде вариаций ионосферных параметров с периодами от десятков минут до нескольких часов [Hunsucker, 1987] и наблюдаются во всей толщине E- и F-областей ионосферы [Williams, 1989], [Djuth et al., 1997]. Для выявления таких вариаций к временным рядам данных, полученных с помощью ESR на каждом вертикальном уровне, применялся спектральный анализ с использованием периодограмм Ломба-Скаргла [Lomb, 1976], [Press, 1988], [Scargle, 1992]. Данный метод был реализован следующим образом: после удаления квадратичного тренда оценивалась наиболее мощная гармоника, затем она удалялась из исходного ряда и описанная процедура повторялась до тех пор, пока выделяемая гармоника оставалась статистически значимой.

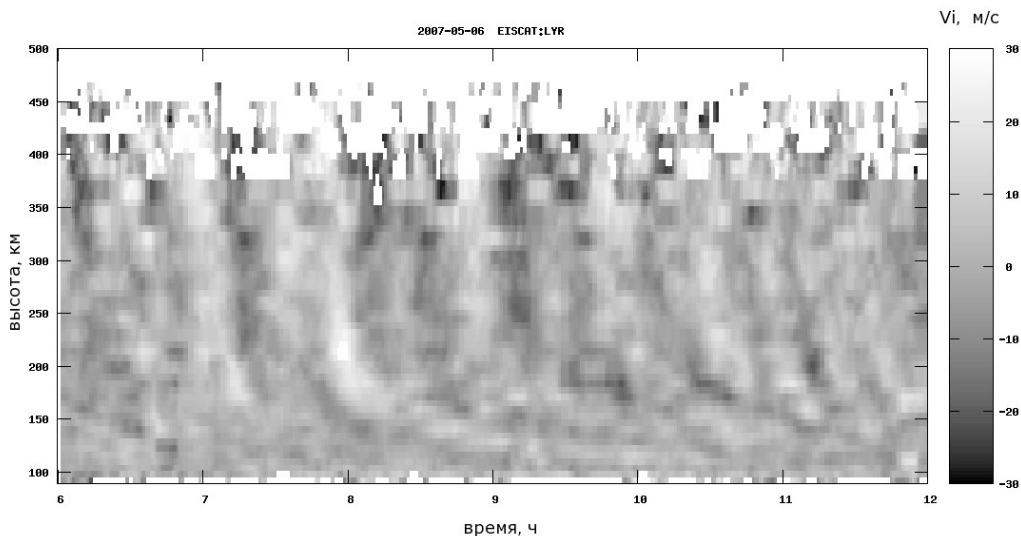


Рис. 1. Скорость дрейфа ионов вдоль луча зрения ( $V_i$ ) 6 мая 2007 г. (квадратичный тренд удалён)

После применения метода описанного выше были получены оценки нескольких наиболее значимых гармоник для каждого из уровней. Результаты со всех уровней анализируются совместно для определения наиболее часто встречающихся значений периодов осцилляций (мод). В качестве примера на рис. 1 приведены исходные данные – результаты измерений  $V_i$  для 5 Мая 2007 с 6:00 до 12:00 UT, а рис. 2 иллюстрирует частоту повторяемости гармоник с различными периодами на всех уровнях для данного случая. На рис. 2 можно выделить две главные моды, с периодом приблизительно 1 ч и 0,5 ч.

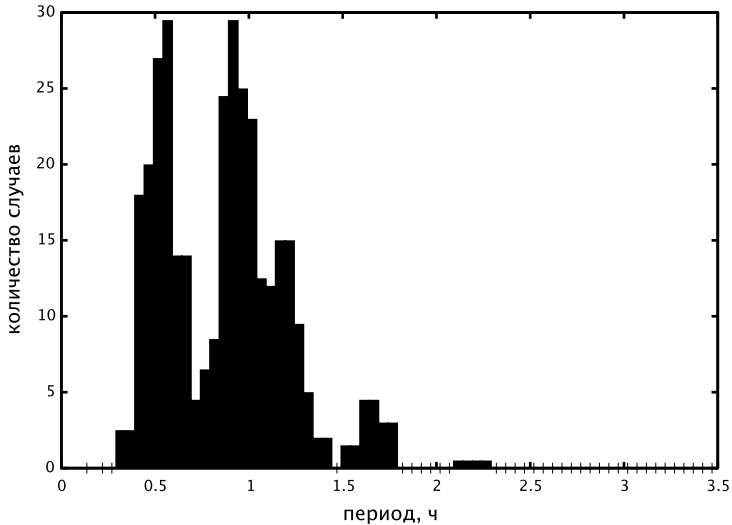


Рис. 2. Повторяемость значений периодов для всех вертикальных уровней ( $V_i$ , 6 мая 2007 г.)

Далее к исходным данным на каждом уровне применяется цифровой фильтр с полосой пропускания, задаваемой на основании полученных модальных значений. В данной работе использовался фильтр Баттерворта (Butterworth) [Labinder, 1975], как обладающий наиболее гладкой амплитудно-частотной характеристикой в области полосы пропускания, что должно гарантировать отсутствие искажений. Ожидается, что фильтр поможет отделить вариации, вызванные ВГВ, от других вариаций. Данный метод применяется ко всем четырём основным параметрам, измеряемым радаром (Ne, Ti, Te, Vi).

При интерпретации результатов применения фильтра используются критерии, описанные в [Kirchengast, 1997]. Вкратце, основными признаками возмущений вызванных ВГВ от возмущений вызванных другими процессами в ионосфере является наклон фазового фронта возмущений, при котором фаза на нижележащих уровнях запаздывает по сравнению с вышележащими для Ne, Ti, Te и Vi. В соответствии с [Kirchengast, 1997] и [Hines, 1960] именно такой наклон фазового фронта характерен для ВГВ распространяющихся снизу-вверх. Результаты применения фильтра с центром полосы пропускания на периоде около

1 часа к рассматриваемому случаю показаны на рис. 3. Промежуток времени 9:42-10:06 UT соответствует чуть больше, чем половине периода. Хорошо заметно, что максимум вариаций  $V_i$  сначала наступает на вышерасположенных уровнях. Также возможно визуально оценить вертикальную длину волны, в нашем случае она составляет около 100 км.

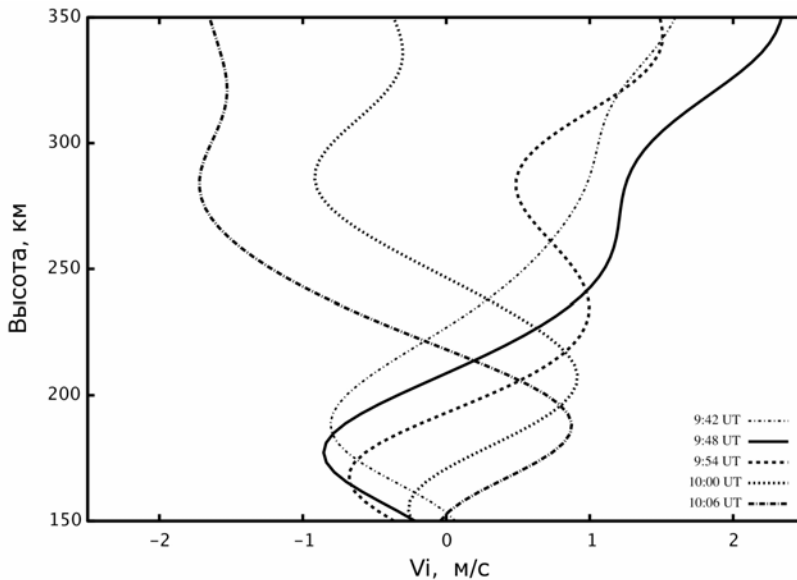


Рис. 3. Результаты применения фильтра. Для большей наглядности вертикальные профили сглажены при помощи кривых Безье ( $V_i$ , 6 мая 2007, полоса пропускания 0,82–1,02 ч)

## Результаты и обсуждение

В рамках данной работы были проанализированы результаты измерений за май 2007. Результаты применения фильтра интерпретировались визуально. Всего были доступны измерения за 26 дней (83% от числа дней в месяце), в 23 случаях (74% от числа дней в месяце, 89% от всех рассмотренных случаев) были обнаружены признаки ВГВ. В 16 случаях (52% от числа дней в месяце, 61% дней с измерениями, 70% дней с ВГВ) признаки ВГВ наблюдались сразу в нескольких из измеряемых параметров. Повторяемости различных значений периодов ВГВ представлены на рис. 4. Можно выделить две основные моды с периодами около 1,2 и 0,6 часа (в первую очередь на основании данных  $V_i$ , для которой удалось выявить значительно больше случаев).

Также, для каждого из случаев визуально определялась вертикальная длина волны. Дисперсионное соотношение [Hines 1960] связывает значения частоты ВГВ –  $\omega$ , горизонтального волнового числа  $k_x$  и вертикального волнового числа  $k_z$ :

$$\omega^4 - \omega^2 C^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k^2 - \gamma^2 g^2 \omega^2 / 4C^2 = 0,$$

где  $C = 550$  м/с – средняя скорость звука в термосфере;  $\gamma = 1,5$  – отношение удельных теплоёмкостей;  $g = 8.83$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения в тер-

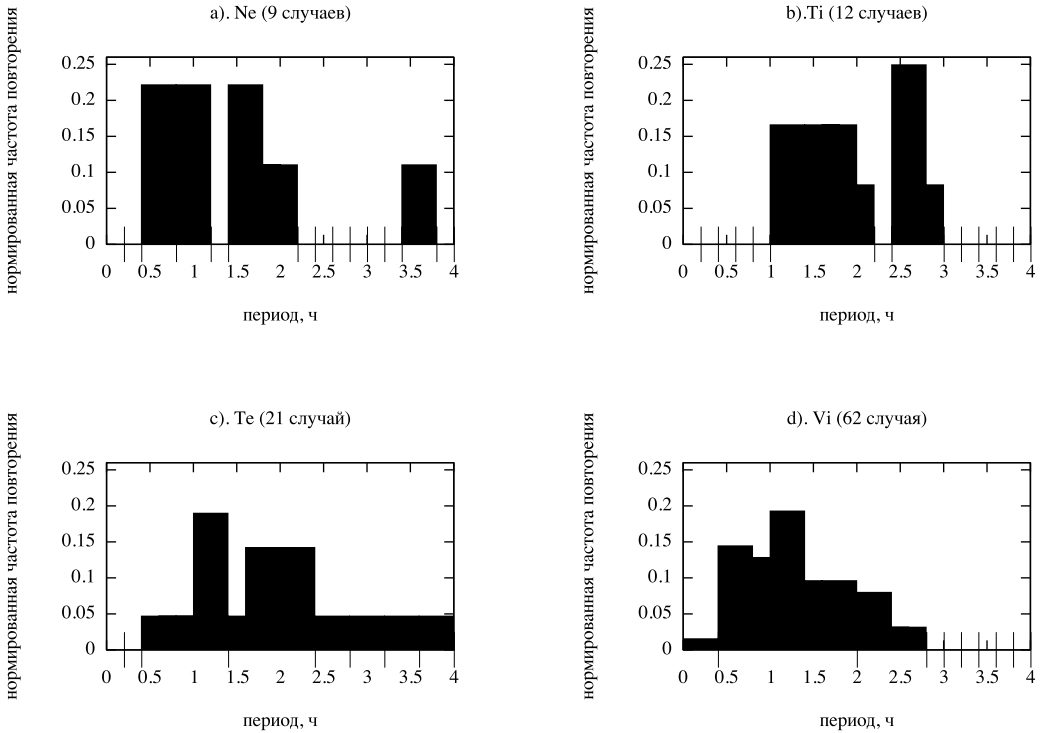


Рис. 4. Относительные повторяемости значений периодов ПИВ, интерпретированных как ВГВ за май 2007 г.

Несмотря на то, что данное соотношение было получено для идеализированного случая изотермической атмосферы без диссипации, с его помощью можно оценить порядок величины горизонтальной длинны волн ВГВ. На рис. 5 представлены рассчитанные величины горизонтальных длин волн ВГВ. Видно, что в целом они находятся в диапазоне 100–2000 км (для периодов 0,5–3 ч и вертикальных длин волн 50–200 км). Также следует отметить сравнительно хорошо выраженную линейную зависимость (тренд показан пунктирной линией) между значениями горизонтальных длин волн и величинами периодов. Такая линейная зависимость соответствует горизонтальной фазовой скорости (отношению горизонтальной длины волны к периоду) порядка 210 м/с. В соответствии с [Hunsucker, 1987] и [Kersley, 1989] можно предположить, что источники большинство наблюдаемых ВГВ находились в нижней атмосфере.

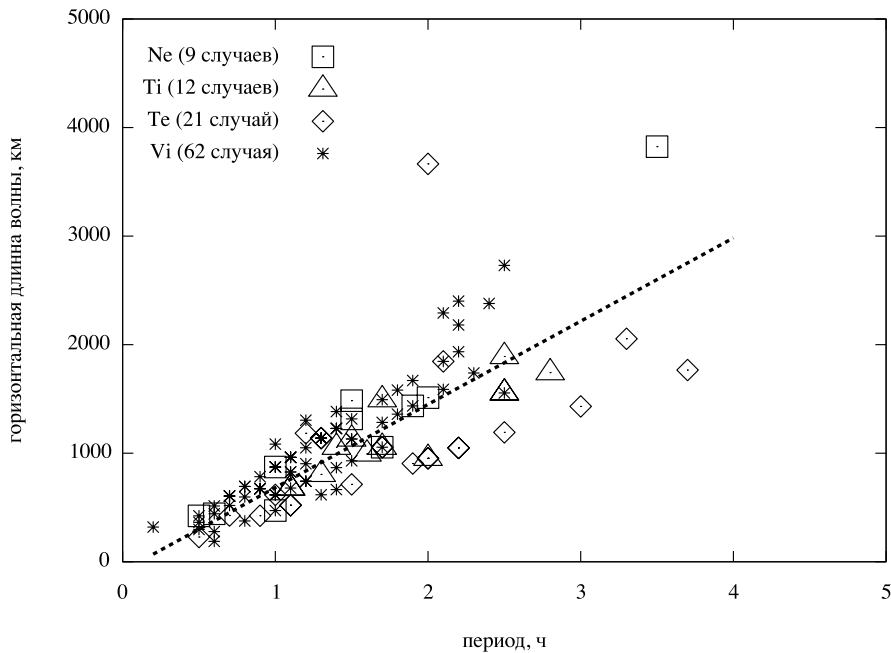


Рис. 5. Рассчитанные значения горизонтальных длин волн ВГВ (линейный тренд показан пунктирной линией)

### Заключение

В работе было показано, что, ПИВ ассоциируемые с ВГВ, являются достаточно частым явлением в районе расположения радара, по крайней мере, для данного сезона (поздняя весна – раннее лето). Повторяемость близких значений параметров ПИВ от случая к случаю позволяет сделать вывод о близости условий генерации и распространения. Анализ параметров наблюдаемых ВГВ позволяет предположить, что большинство из них приходили из нижней атмосферы.

### Литература

- Троицкий Б.В. Отклик сигнала радиозондирования на ионосферные неоднородности. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 164 с.
- Djuth, F.T., Sulzer M P., Elder J.H. and Wickwar V.B. High-resolution studies of atmosphere-ionosphere coupling at Arecibo Observatory, Puerto Rico // Radio Sci., 1997, vol. 32, num. 6, pp. 2321–2344.
- Crowley G. and Williams P.J.S. Observations of the source and propagation of atmospheric gravity waves // Letters to nature, 1987, vol. 328, 231–233.
- Farley, D.T. Radio wave scattering from the ionosphere, Methods of Experimental Physics, vol. 9, part B, by R. H. Lovberg and H.R. Griem, – Academic Press, New-York and London, 1971.
- Hines, C.O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights // Can. J. Phys., 1960, 38, 1441–1481.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982-1995 // Ann. Geophys., 1996, 14, 917–940.
- Hunsucker, R. D. The sources of gravity waves // Nature, 1987, vol. 328, 204–205.

- Kersley L. and Hughes K.A.* On the distinction between large-scale and medium-scale atmospheric gravity waves // *Annales Geophysicae*, 1989, 7, (5), 459–462.
- Kirchengast G.* Characteristics of high-latitude TIDs from different causative mechanisms deduced by theoretical modeling // *J. Geophys. Res.*, 1997, vol. 102, no. A3, pp. 4597–4612.
- Kirchengast G., Hocke K. and Schlegel K.* Gravity waves determined by modeling of traveling ionospheric disturbances in incoherent-scatter radar measurements // *Radio Sci.*, 1995, vol. 30, 5, pp. 1551–1567.
- Lewis R.V., Williams P.J.S., Millward G.H. and Quegan S.* The generation and propagation of atmospheric activity in the auroral electrojet // *J. atmos. terr. Phys.*, 1996, vol. 58, no. 6, pp. 807–820.
- Lomb N. A.* Least squares frequency analysis of unevenly spaced data // *Astrophys. Space Sci.*, 1976, 39, 447–462.
- Press W.H. and Teukolsky S.A.* Search algorithm for weak periodic signal in unevenly spaced data // *Computers in Phys.*, 1988, 2, 77–82.
- Rabinder L.R. and Gold B.* Theory and applications of digital processing. – Prestige Hall Inc., Englewoodcliffs, New Jersey, 1975.
- Scargle J.D.* Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly sampled data // *Astrophys. J.*, 1992, 263.
- Williams, P.J.S.* Observations of atmospheric gravity waves with incoherent scatter radar // *Adv. Space Res.*, 1989, vol. 9, no. 5, pp. (5)65–(5)72.