



# Экспериментальный метод определения скорости нейтрального ветра по соотношениям фазовой и групповой скорости внутренних гравитационных ВОЛН

*Медведев А. В., Ратовский К. Г., Толстиков М. В.*

*Институт Солнечно-Земной Физики, Иркутск, Россия*

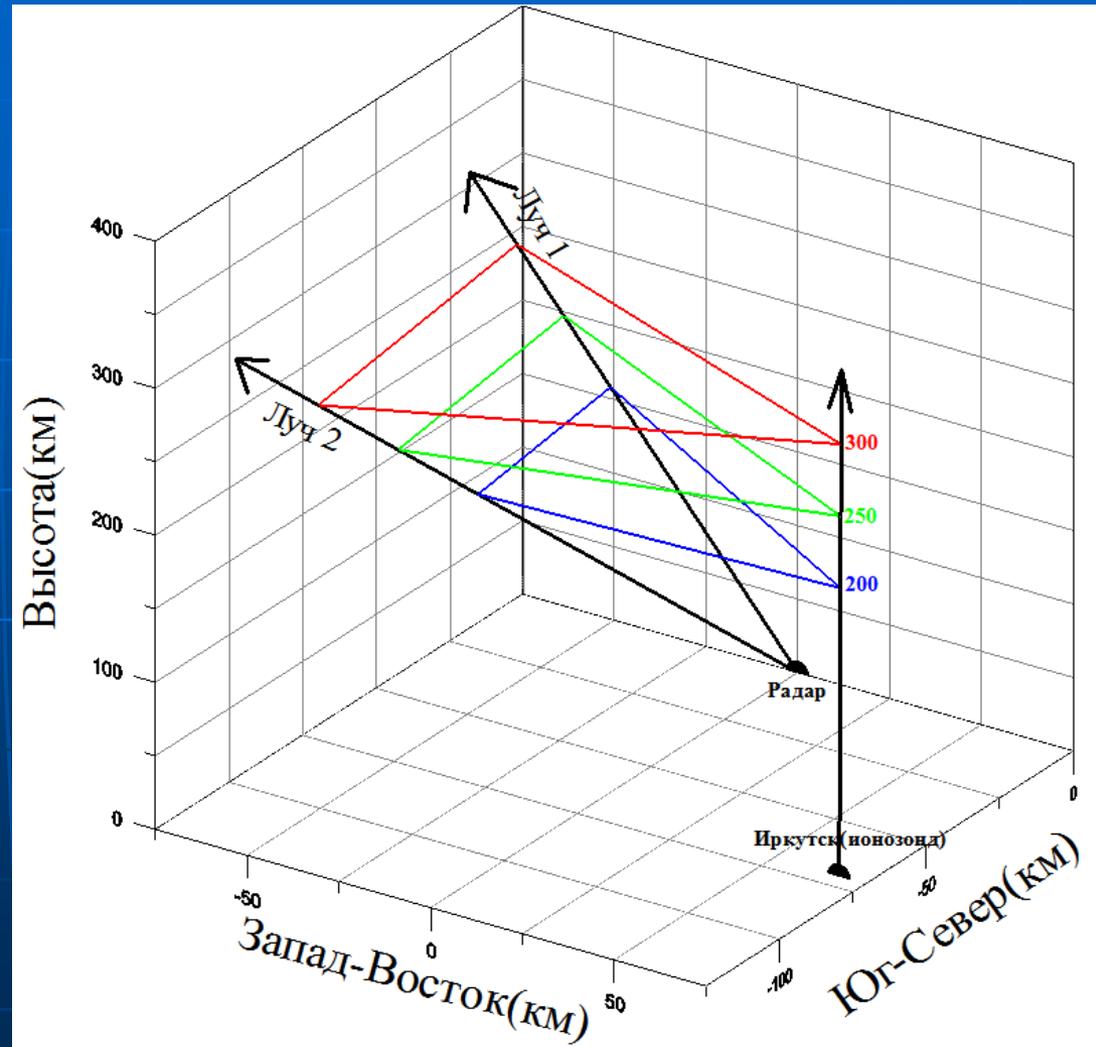
*E-mail : [maxim@iszf.irk.ru](mailto:maxim@iszf.irk.ru)*

*В работе были использованы экспериментальные данные ЦКП «Ангара» (<http://скр-рф.ру/скр/3056/>) и методы анализа, полученные в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12.*

# Геометрия эксперимента по определению характеристик и пространственной структуры перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ)

Начальными данными являются три профиля концентрации, измеренные двумя лучами ИРНР и ионозондом.

Взаимное расположение лучей образует базис с характерным порядком 100 км и обеспечивает возможность измерения трехмерных характеристик ПИВ различных масштабов.

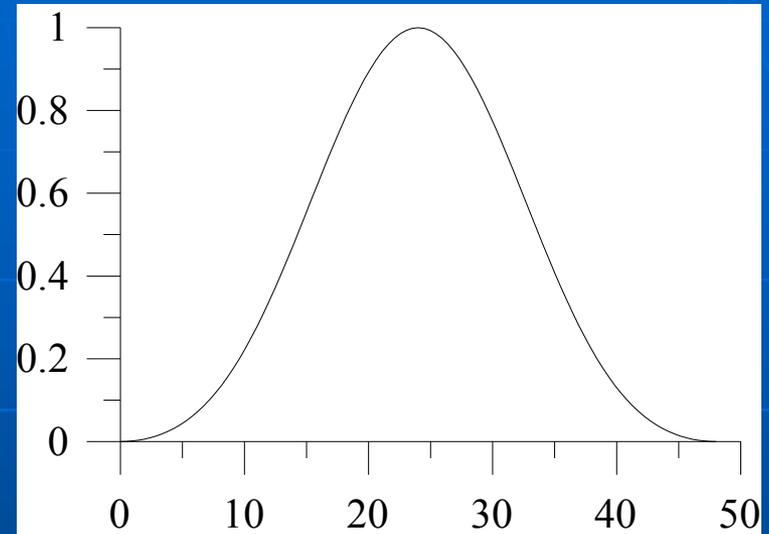


*Медведев и др., Геомагнетизм и аэрномия, 2009, №6*

# Автоматический метод обнаружения ПИВ

## Окно Блэкмана

$$0.42 - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$



В основе автоматического метода выделения ПИВ лежит предположение, о том что, из всего спектра волнового возмущения можно выделить доминирующую гармонику в которой сосредоточена большая часть энергии. Если это предположение выполняется, тогда на каждой из высот, которые захватывает волна, в спектре вариаций электронной концентрации должен наблюдаться локальный максимум на одной и той же частоте. Таким образом, существование локального максимума в спектре на данной частоте как минимум на трех соседних высотах на каждом инструменте (ионозонд и два луча радара) являлось критерием наличия возмущений

# Основные соотношения метода определения трехмерных характеристик ПИВ

$$\begin{cases} k_x(x_1 - x_2) + k_y(y_1 - y_2) = \Delta\varphi_{12} \\ k_x(x_2 - x_3) + k_y(y_2 - y_3) = \Delta\varphi_{23} \\ k_x(x_3 - x_1) + k_y(y_3 - y_1) = \Delta\varphi_{31} \end{cases}$$

$$k_z = \Delta\varphi_z / \Delta z$$

$$\text{Azimuth} = \begin{cases} \text{arctg}(k_x / k_y), k_x \geq 0, k_y > 0 \\ \text{arctg}(k_x / k_y) + \pi, k_y < 0 \\ \text{arctg}(k_x / k_y) + 2\pi, k_x < 0, k_y > 0 \end{cases}$$

$$\text{Elevation} = \text{arctg}(k_z / \sqrt{k_x^2 + k_y^2})$$

$$\text{Velocity} = \omega / \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$$

$$\text{WaveLength} = 2\pi / \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$$

Периоды наблюдений	Количество ПИВ
Зима	
с 8.02.2010 по 14.02.2010	
с 24.02.2010 по 28.02.2010	
с 16.01.2011 по 16.02.2011	5677
с 17.01.2012 по 9.02.2012	
с 25.12.2012 по 21.01.2013	
с 26.12.2013 по 12.01.2014	
Весна	
с 1.04.2009 по 12.04.2009	1246
с 12.04.2011 по 21.04.2011	
с 5.04.2012 по 22.04.2012	
Лето	
с 1.06.2007 по 24.06.2007	1372
с 22.06.2013 по 1.07.2013	

# Дисперсионные уравнение Хайнса

$$k^2 = \frac{k_h^2 \Omega_B^2}{\omega^2} + \frac{\omega^2 - \omega_A^2}{C_0^2}$$

# Взаимодействие ВГВ с горизонтальным ветром

$$\omega' = \omega_{набл} - k_h U$$

$$T' = \frac{\lambda_h T_{набл}}{\lambda_h - UT_{набл}}$$

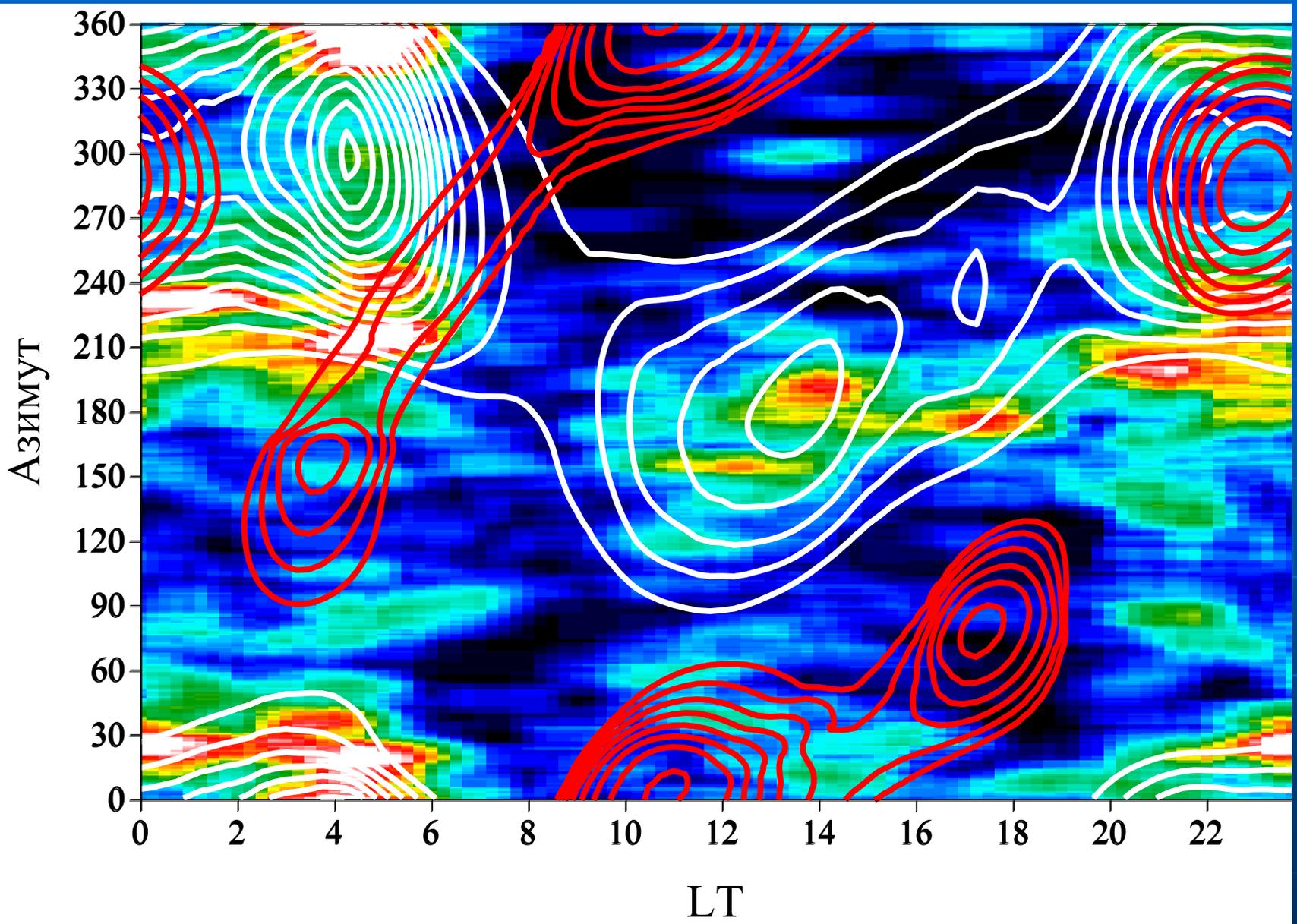
$$U = \frac{\lambda_h (T' - T_{набл})}{T_{набл} T'}$$

## Определение суточного хода зонального и меридионального ветра

$$\sum (U_x \sin(\varphi_i) + U_y \cos(\varphi_i) - U_i)^2 \rightarrow \min$$

Где суммирование производится по всем ПИВ наблюдавшимся во временном окне  $[t-2, t+2]$  при скорости ветра меньшей 300 м/с ( $|U_i| \leq 300$  м/с),  $U_x$  – зональный ветер,  $U_y$  – меридиональный ветер,  $U_i$  – горизонтальный ветер вдоль направления распространения ПИВ,  $\varphi_i$  – азимут ПИВ (отсчитывается от направления на север по часовой стрелке).

$$\begin{cases} U_x \sum \sin^2(\varphi_i) + U_y \sum \sin(\varphi_i) \cos(\varphi_i) = \sum U_i \sin(\varphi_i) \\ U_x \sum \sin(\varphi_i) \cos(\varphi_i) + U_y \sum \cos^2(\varphi_i) = \sum U_i \cos(\varphi_i) \end{cases}$$



*Medvedev et al., J. Geophys. Res. Space Physics (2017), 122, 7567–7580, doi:10.1002/2017JA024103*

# Определение скорости нейтрального ветра в предположении выполнения дисперсионного уравнения Хайнса

$$k^2 = \frac{(k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2}{\omega'^2} + \frac{\omega'^2 - \omega_A^2}{C_0^2}$$

$$\omega' = \omega - \vec{k}\vec{U} = \omega - k_x U_x - k_y U_y - k_z U_z$$

$$F(\omega', k_x, k_y, k_z) = \frac{(k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2}{\omega'^2} + \frac{\omega'^2 - \omega_A^2}{C_0^2} - (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

$$G'_x = \frac{\partial \omega'}{\partial k_x} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial k_x}}{\frac{\partial F}{\partial \omega'}} = \frac{k_x \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2)}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2 C_0^2)}$$

$$G'_y = \frac{\partial \omega'}{\partial k_y} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial k_y}}{\frac{\partial F}{\partial \omega'}} = \frac{k_y \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2)}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2 C_0^2)}$$

$$G'_z = \frac{\partial \omega'}{\partial k_z} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial k_z}}{\frac{\partial F}{\partial \omega'}} = \frac{k_z C_0^2 \omega'^3}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2 C_0^2)}$$

# Групповая скорость в неподвижной системе координат на наблюдаемой частоте $\omega$

$$F(\omega, k_x, k_y, k_z) = \frac{(k_x^2 + k_y^2)\Omega_B^2}{(\omega - k_x U_x - k_y U_y - k_z U_z)^2} + \frac{(\omega - k_x U_x - k_y U_y - k_z U_z)^2 - \omega_A^2}{C_0^2} - (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$$

$$G_x = \frac{\partial \omega}{\partial k_x} = U_x + \frac{k_x \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2 C_0^2)}{(\omega'^4 - C_0^2 (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2)} = U_x + G'_x$$

$$G_y = \frac{\partial \omega}{\partial k_y} = U_y + \frac{k_y \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2 C_0^2)}{(\omega'^4 - C_0^2 (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2)} = U_y + G'_y$$

$$G_z = \frac{\partial \omega}{\partial k_z} = U_z + \frac{k_z C_0^2 \omega'^3}{(\omega'^4 - C_0^2 (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2)} = U_z + G'_z$$

Можно определить нейтральный ветер как разность групповых скоростей:

$$\begin{cases} U_x = G_x - G'_x \\ U_y = G_y - G'_y \\ U_z = G_z - G'_z \end{cases}$$

$$G'_x = \frac{\partial \omega'}{\partial k_x} = \frac{k_x \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2)}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2 C_0^2)}$$

$$G'_y = \frac{\partial \omega'}{\partial k_y} = \frac{k_y \omega' C_0^2 (\omega'^2 - \Omega_B^2)}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2 C_0^2)}$$

$$G'_z = \frac{\partial \omega'}{\partial k_z} = \frac{k_z C_0^2 \omega'^3}{(\omega'^4 - (k_x^2 + k_y^2) \Omega_B^2 C_0^2)}$$

Внутренний период(частоту) можно найти из уравнения Хайнса решив биквадратное уравнение:

$$\frac{\cos^2(\theta)}{T_b^2} T'^4 - \left(1 + \frac{L^2}{C_0^2 T_A^2}\right) T'^2 + \frac{L^2}{C_0^2} = 0$$

# Групповая скорость в неподвижной системе координат

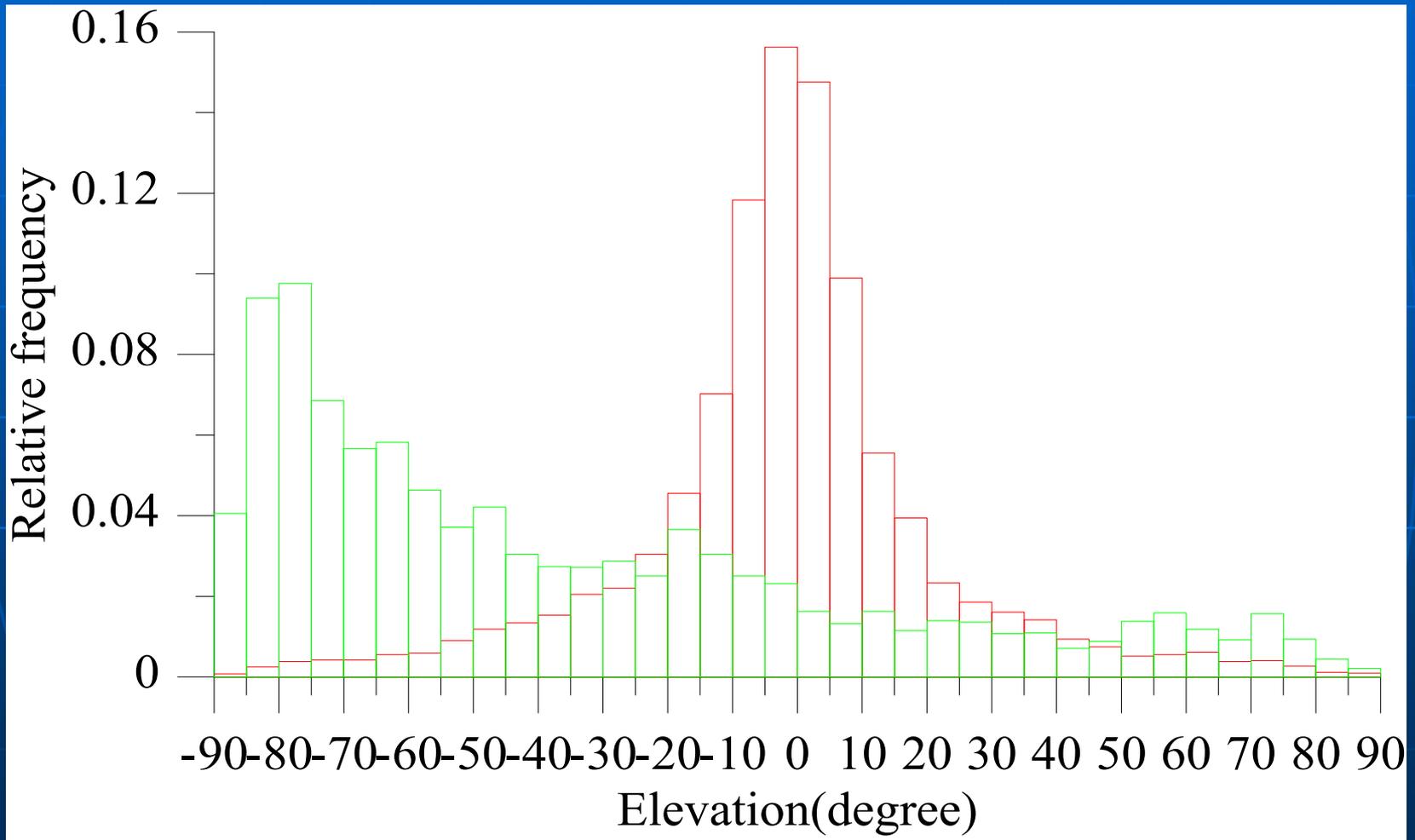
$$d\omega = \frac{\partial \omega}{\partial k_x} dk_x + \frac{\partial \omega}{\partial k_y} dk_y + \frac{\partial \omega}{\partial k_z} dk_z = G_x dk_x + G_y dk_y + G_z dk_z$$

$$\Delta\omega \approx G_x \Delta k_x + G_y \Delta k_y + G_z \Delta k_z$$

$$\begin{cases} \Delta\omega_1 = G_x \Delta k_{x1} + G_y \Delta k_{y1} + G_z \Delta k_{z1} \\ \Delta\omega_2 = G_x \Delta k_{x2} + G_y \Delta k_{y2} + G_z \Delta k_{z2} \\ \Delta\omega_3 = G_x \Delta k_{x3} + G_y \Delta k_{y3} + G_z \Delta k_{z3} \end{cases}$$

$$(\omega - 3\Delta\omega, \omega - 2\Delta\omega, \omega - \Delta\omega, \omega + \Delta\omega, \omega + 2\Delta\omega, \omega + 3\Delta\omega)$$

# Распределения вертикальных наклонов фазового фронта групповых и фазовых скоростей



## Определение скорости нейтрального ветра

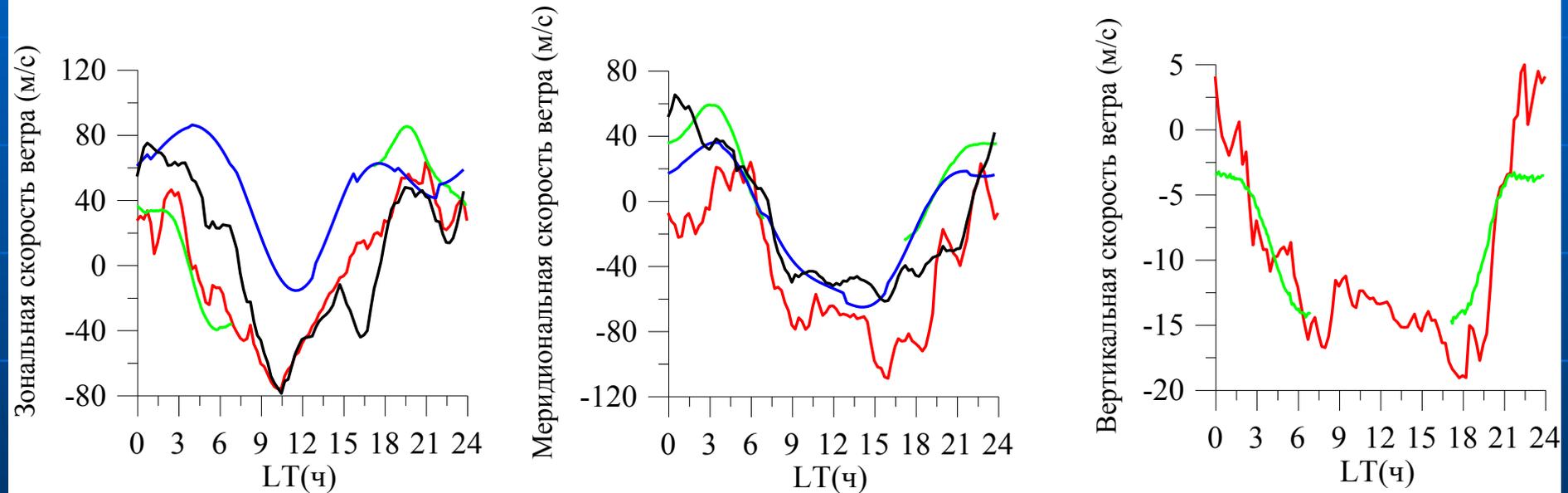
$$\begin{cases} U_x = G_x - G'_x \\ U_y = G_y - G'_y \\ U_z = G_z - G'_z \end{cases}$$

$$\frac{k_x}{|k|} U_x + \frac{k_y}{|k|} U_y + \frac{k_z}{|k|} U_z = \frac{\omega - \omega'}{|\vec{k}|}$$

- 1) Максимальная разница азимутов для четырёх используемых частот  $< 60^\circ$
- 2) Модуль скорости ветра  $< 300$  м/с
- 3) Угол между групповой и фазовой скоростью ВГВ лежит в пределах  $60-120^\circ$

# Результаты расчётов

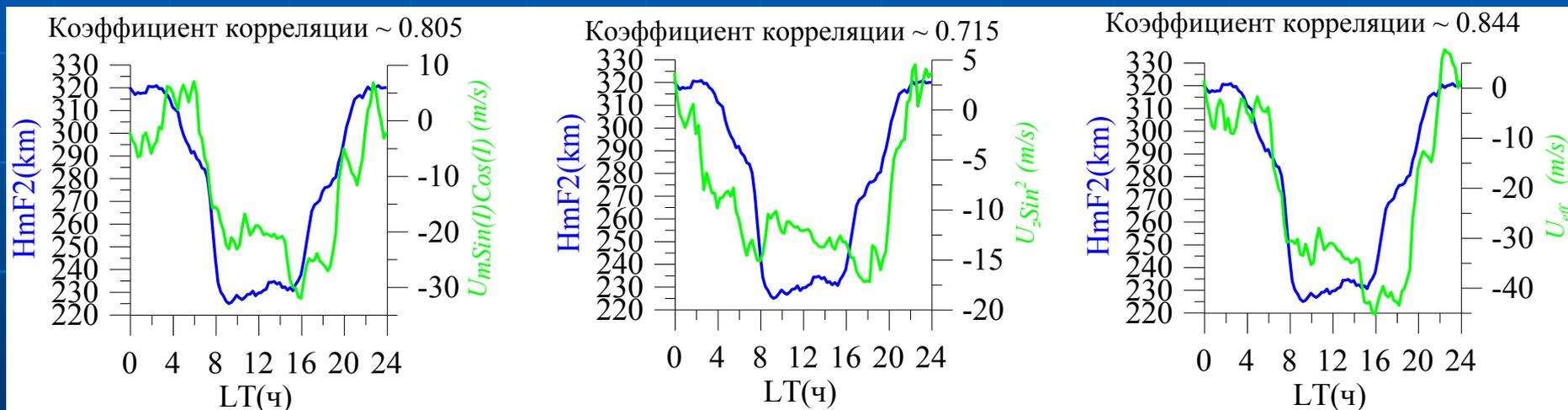
- ИРНР-DPS-4(по групповым скоростям)
- Интерферометр Фабри-Перо
- HWM2007
- ИРНР-DPS-4(по проекциям ветра на направление распространения ВГВ)



В качестве дополнительной проверки нашего метода мы сравнили нейтральный ветер, полученный нами, с изменениями высоты максимума слоя F2. При наличии, вертикального и меридионального нейтрального ветра, высота максимума слоя F2 определяется эффективным ветром:

$$U_{eff} = U_{meridional} \cos I \sin I + U_{vertical} \sin^2 I$$

здесь  $I$  - наклонение магнитного поля ( $\sim 72^\circ$ )



## Заключение

Периоды одновременных долговременных наблюдений Иркутского радара некогерентного рассеяния (ИРНР) и ионозонда DPS-4 позволили собрать уникальные данные о трехмерной пространственно-временной структуре перемещающихся волновых возмущений с периодами от 40 минут до 6 часов, включая полный вектор фазовой скорости. На основе данной статистики, проведена проверка дисперсионных соотношений Буссинеска и Хайнса для ВГВ, и было показано что экспериментальные данные хорошо согласуются с теоретическими представлениями о распространении ВГВ в верхней атмосфере. Разработан новый метод получения полного вектора скорости нейтрального ветра по соотношениям групповых и фазовых скоростей ВГВ. Используя дисперсионное соотношение можно получить полный вектор групповой скорости ВГВ в системе координат движущейся со скоростью нейтрального ветра (мы используем дисперсионное соотношение Хайнса). Из экспериментальных данных можно определить групповую скорость в неподвижной системе координат. Знание групповой скорости в движущейся со скоростью нейтрального ветра и неподвижной системе координат, позволит получить полный вектор скорости нейтрального ветра. При усовершенствовании методики выделения возмущений данный метод позволит получать не только среднемесячный суточный ход параметров, но и мгновенные значения. Проведено сравнение результатов измерений с моделью HWM2007 и независимыми измерениями на интерферометре Фабри-Перо. Результаты расчётов нейтрального ветра на двух инструментах соответствуют друг другу. Как в измерениях, основанных на статистике параметров ВГВ, так и в измерениях с помощью интерферометра Фабри-Перо, получен значимый вертикальный нейтральный ветер. Проведено сравнение нейтрального ветра с изменениями высоты максимума слоя F2. Показано, что эффективный ветер лучше всего описывает суточный ход высоты максимума слоя F2, что может служить подтверждением наличия вертикального ветра