

Моделирование спектров вторичных акустико-гравитационных волн в областях критических уровней среднего ветра

Н. М. Гаврилов , А. В. Коваль

Санкт-Петербургский государственный университет

С. П. Кшевецкий

Балтийский федеральный университет им. И. Канта

Ю. А. Курдяева

Северо-западное отделение ИЗМИРАН

План доклада

- 1. Модель высокого разрешения**
- 2. Критические уровни для АГВ**
- 3. Прохождение АГВ $t = 2\tau$**
- 4. Прохождение АГВ $t = 20\tau$**
- 5. Прохождение АГВ $t = 50\tau$**
- 6. Спектры вторичных АГВ**
- 7. Заключение**

Main Equations

The Equation of Continuity

$$\partial \rho / \partial t + \partial(\rho v_{\alpha}) / \partial x_{\alpha} = 0;$$

The Equations of Motion

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i v_{\alpha}}{\partial x_{\alpha}} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho g \delta_{i3} + \rho X_i + \frac{\partial \sigma_{i\alpha}}{\partial x_{\alpha}}; i, \alpha = 1, 2, 3$$

The Equation of State of ideal gas

$$p = \rho R T;$$

The Heat Balance Equation

$$\frac{dp}{dt} = -\gamma p \operatorname{div} \vec{v} + (\gamma - 1) \frac{dQ}{dt},$$

$$\frac{dQ}{dt} = \rho(\varepsilon_t + \varepsilon_d + \varepsilon); \quad \rho \varepsilon_d = \sigma_{\alpha\beta} \frac{\partial v_{\alpha}}{\partial x_{\beta}}; \quad \rho \varepsilon_t = -\frac{\partial q_{m\alpha}}{\partial x_{\alpha}}.$$

Vertical Boundary Conditions

The upper boundary conditions at altitude $h=500$ km

$$\left(\frac{\partial T'}{\partial z}\right)_{z=h} = 0, \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)_{z=h} = 0, (w)_{z=h} = 0$$

Lower boundary conditions at the Earth surface

$$(T')_{z=0} = 0, \quad (u)_{z=0} = 0,$$
$$(w)_{z=0} = a \sin[\sigma(t-x/c_x)],$$

The condition for w at the lower boundary is a source of waves in the model.

Horizontal Boundary Conditions

Periodical conditions at horizontal boundaries

$$\alpha(x, z, t) = \alpha(x + L_x, z, t),$$

$$\alpha(y, z, t) = \alpha(y + L_y, z, t),$$

Where $L_x = n\lambda_x; L_y = m\lambda_y;$

$$\lambda_x = 2\pi / k_x; \lambda_y = 2\pi / k_y;$$

are horizontal dimensions of atmospheric domain;

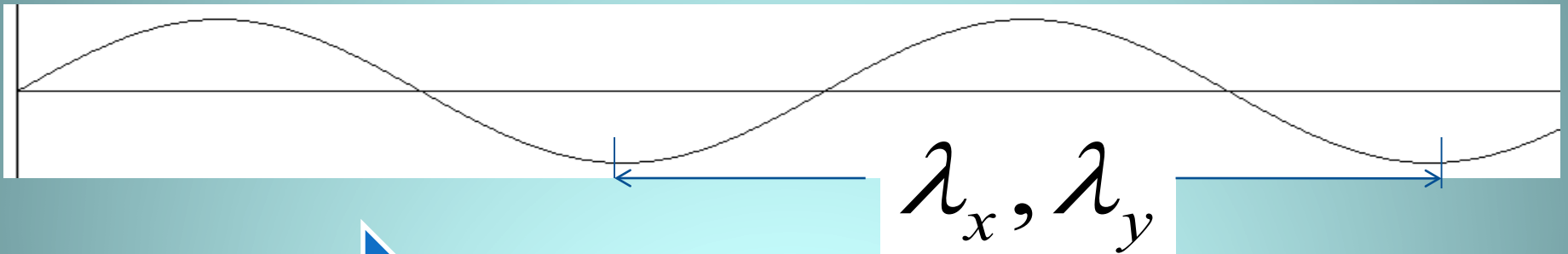
k_x, k_y

are horizontal wavenumbers.

Plane Wave Excitation

$$w(x, y, z = 0, t) =$$

$$= W_0 \times \cos \left(\sigma \left(t - \frac{x}{c_x} - \frac{y}{c_y} \right) \right)$$



Phase velocity

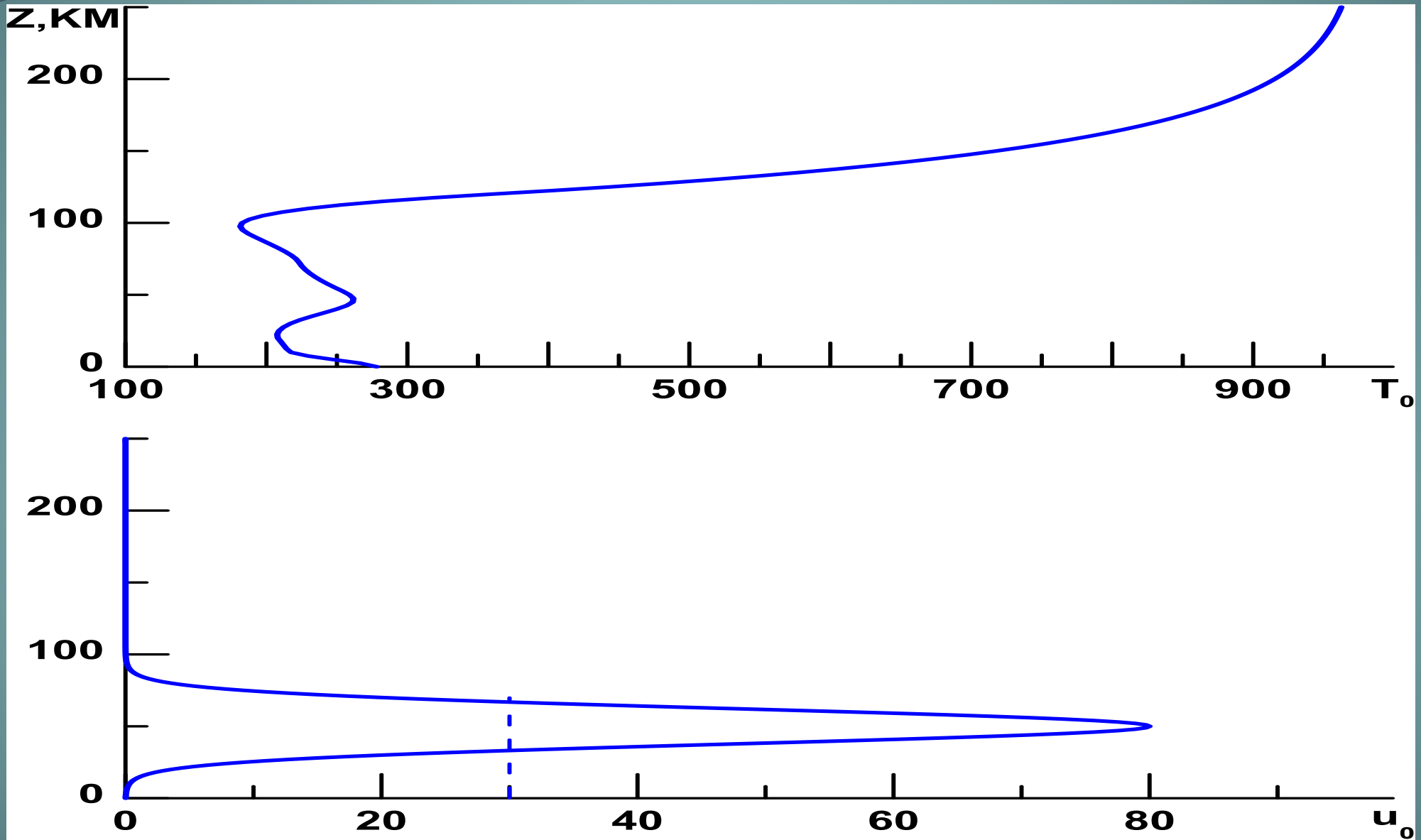
$$c_i = \frac{\sigma}{k_i}; \quad k_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}.$$

Критический уровень – сингулярная точка

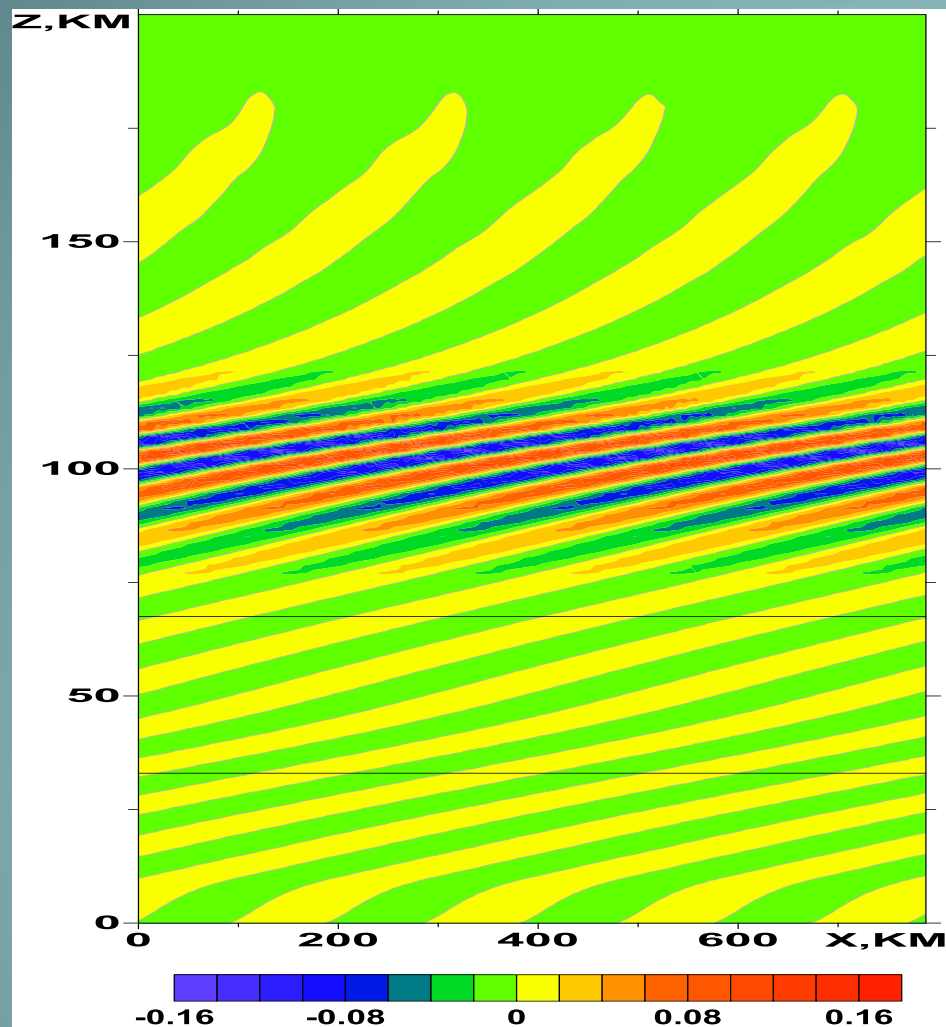
$$c_h = \sigma/k_h \rightarrow v_0; \quad \omega = k_h(c_h - v_0) \rightarrow 0;$$

$$m = k_h N/\omega \rightarrow \infty; \quad c_z = -\omega/m \rightarrow 0.$$

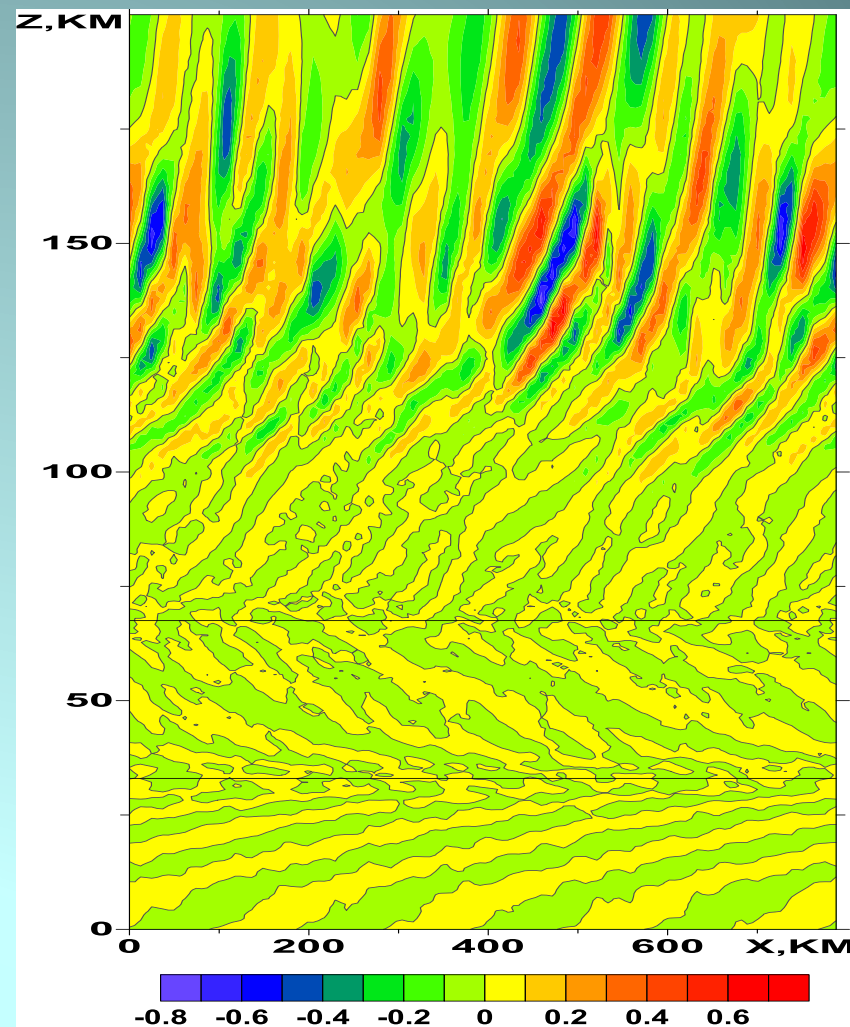
Средние Температура и Ветер



Безветренная атмосфера

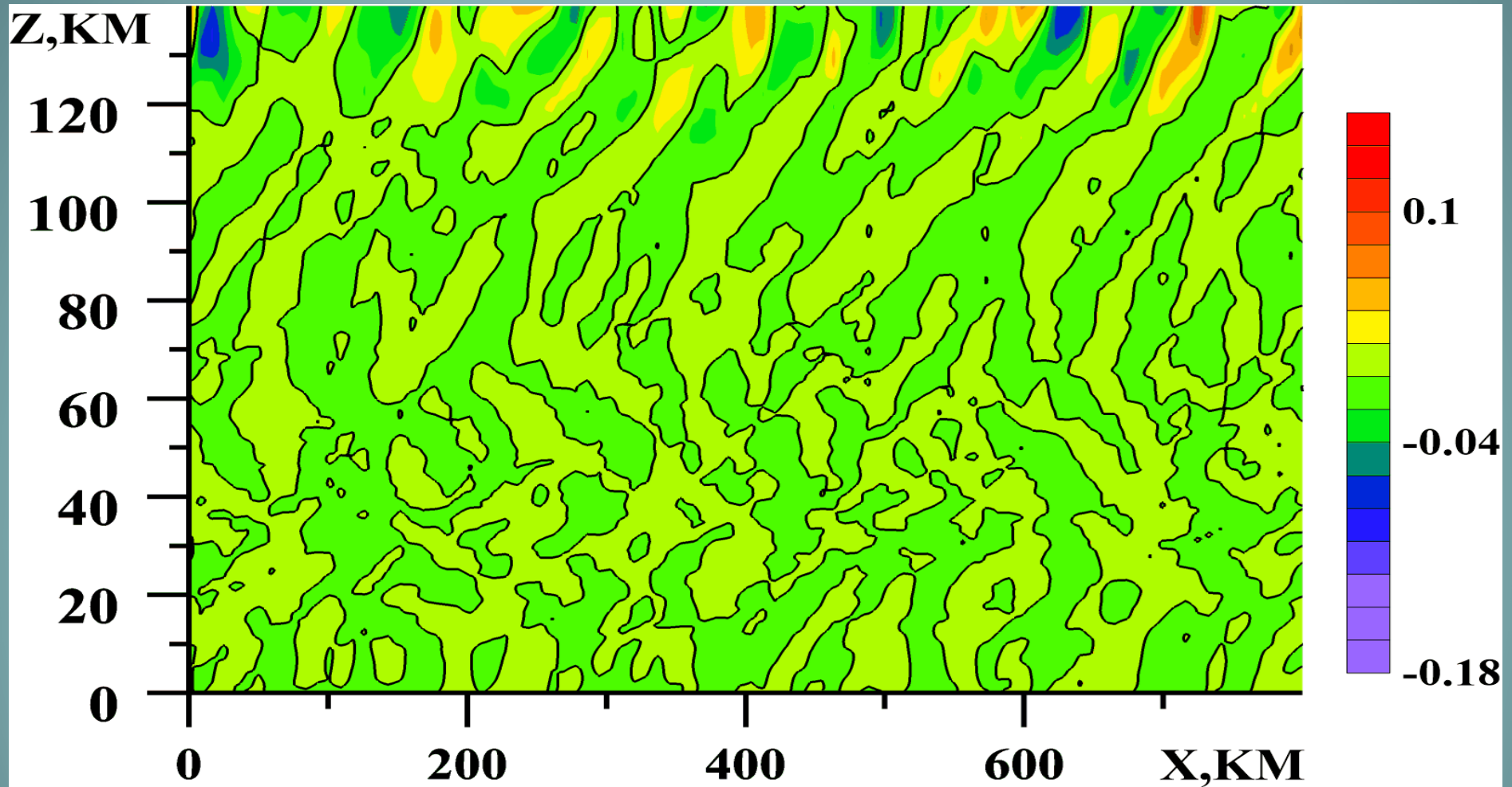


Критические слои



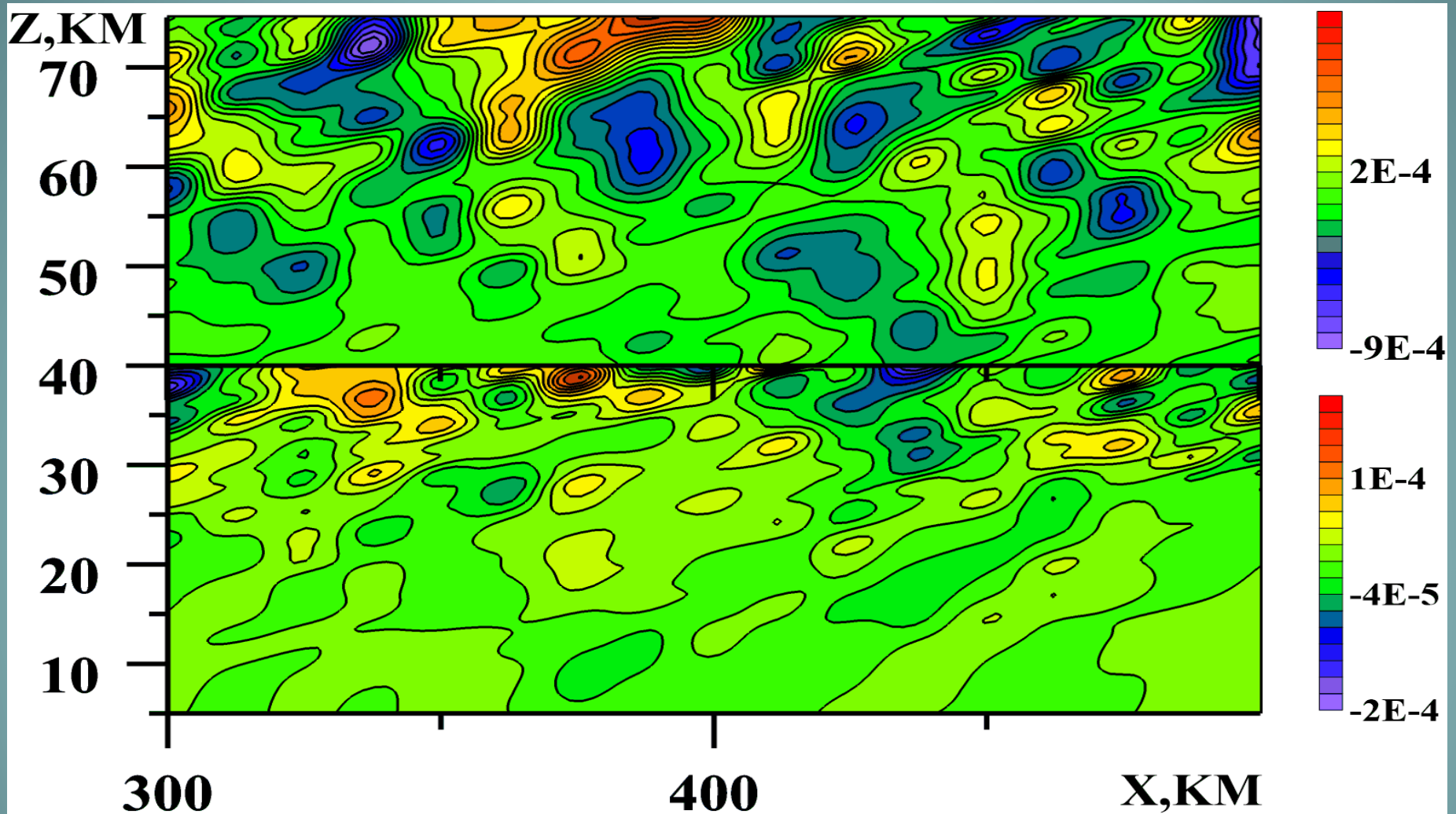
Сечение плоскостью XOZ волнового поля вертикальной скорости в мм/с для ВГВ с $c_x = 30$ м/с в момент $t = 52$ ч .

Прохождение АГВ $t = 2\tau$



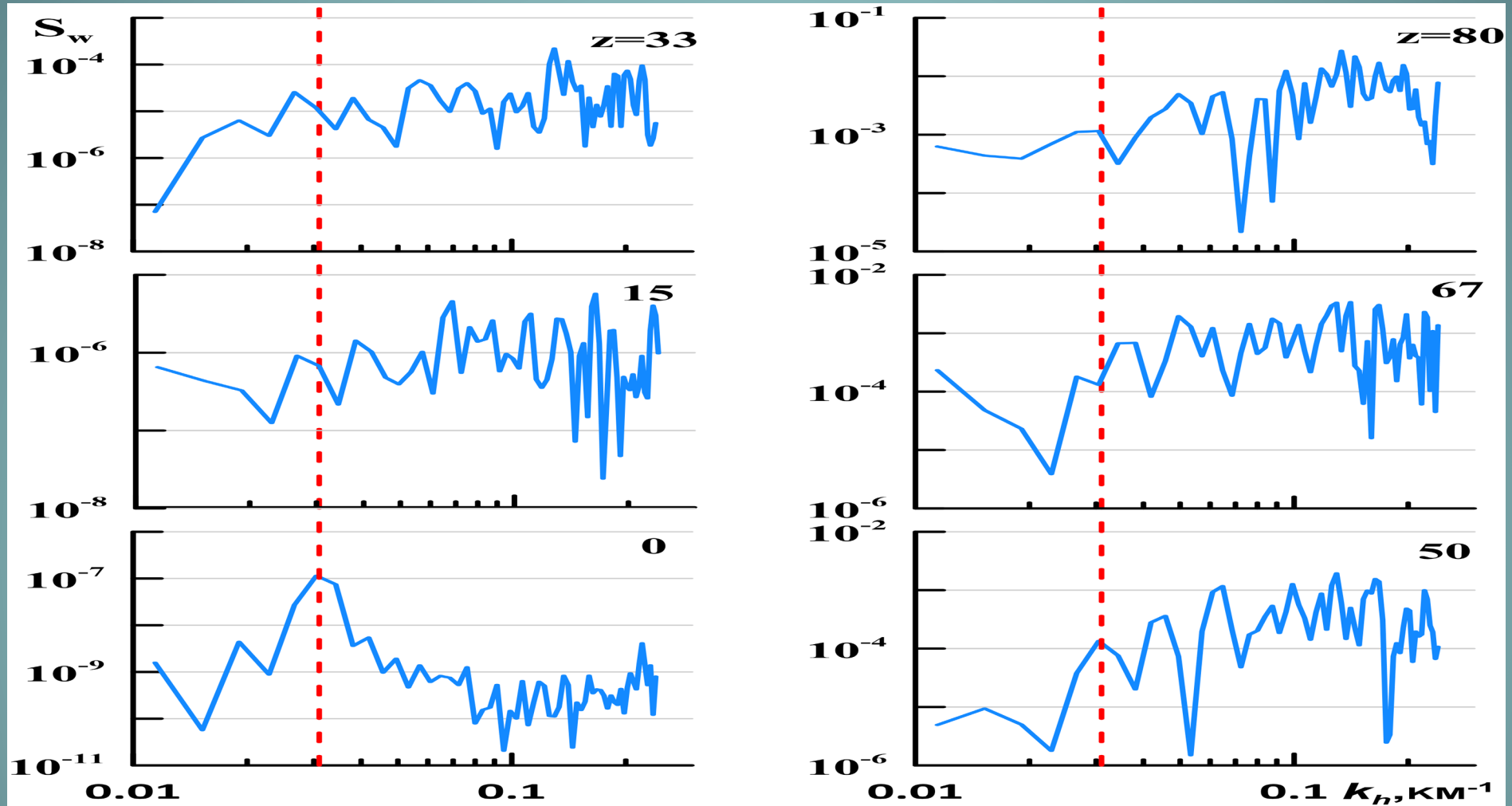
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 2\tau$

Прхождение АГВ $t = 2\tau$



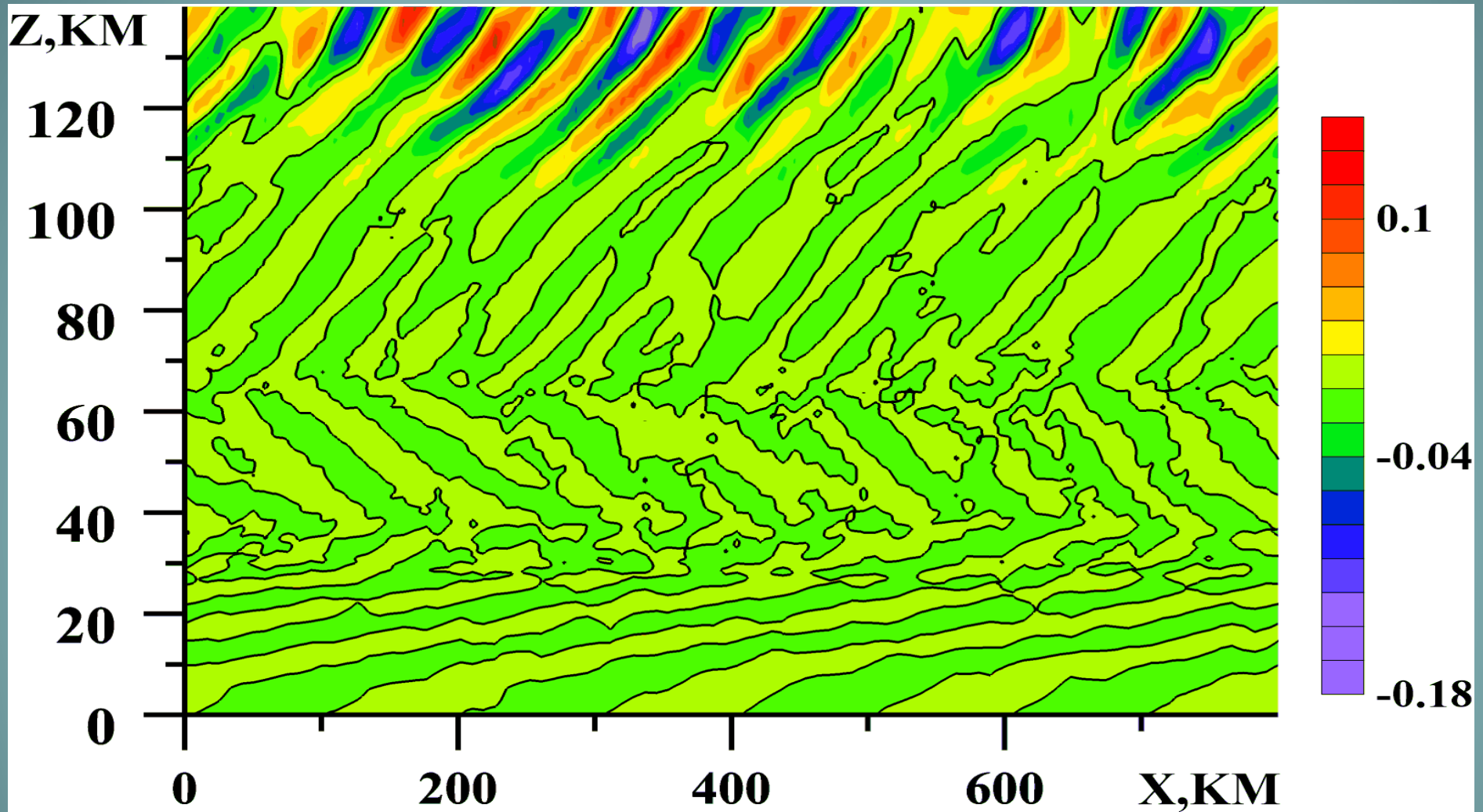
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 2\tau$

Спектральная плотность вертикальной скорости на разных высотах.



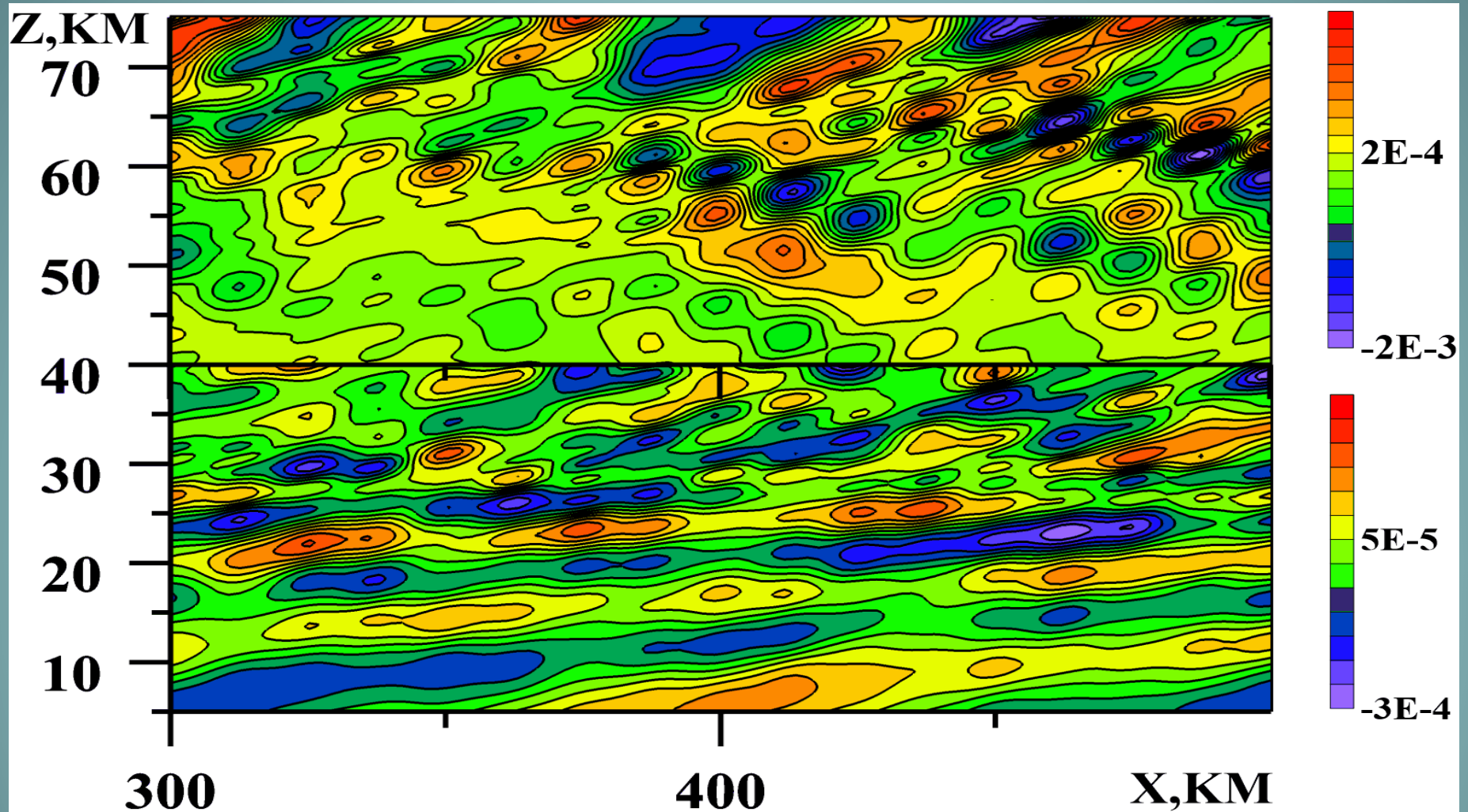
В момент $t = 2\tau$ после включения волнового источника на земной поверхности

Прхождение АГВ $t = 20\tau$



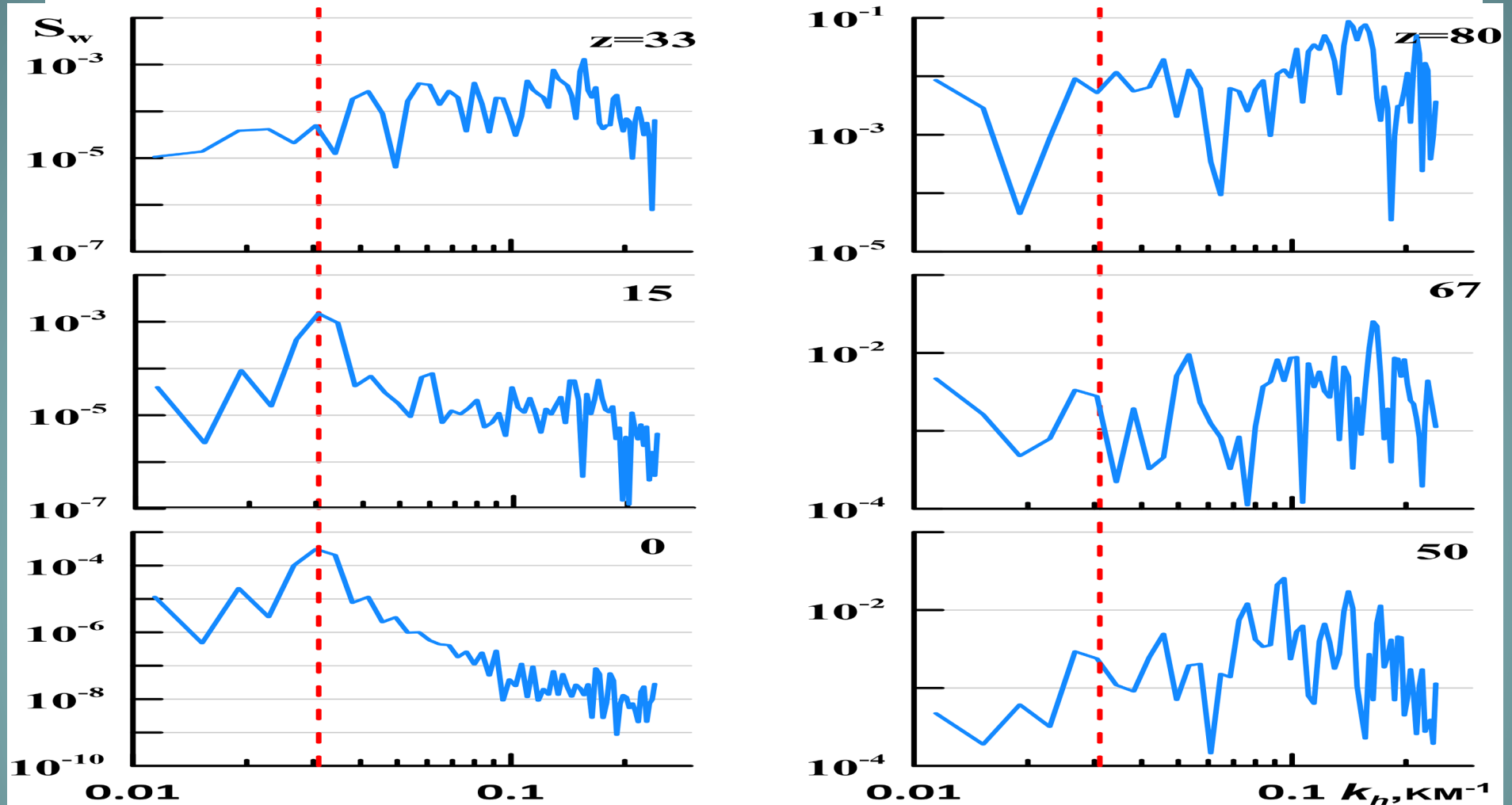
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 20\tau$

Прхождение АГВ $t = 20\tau$



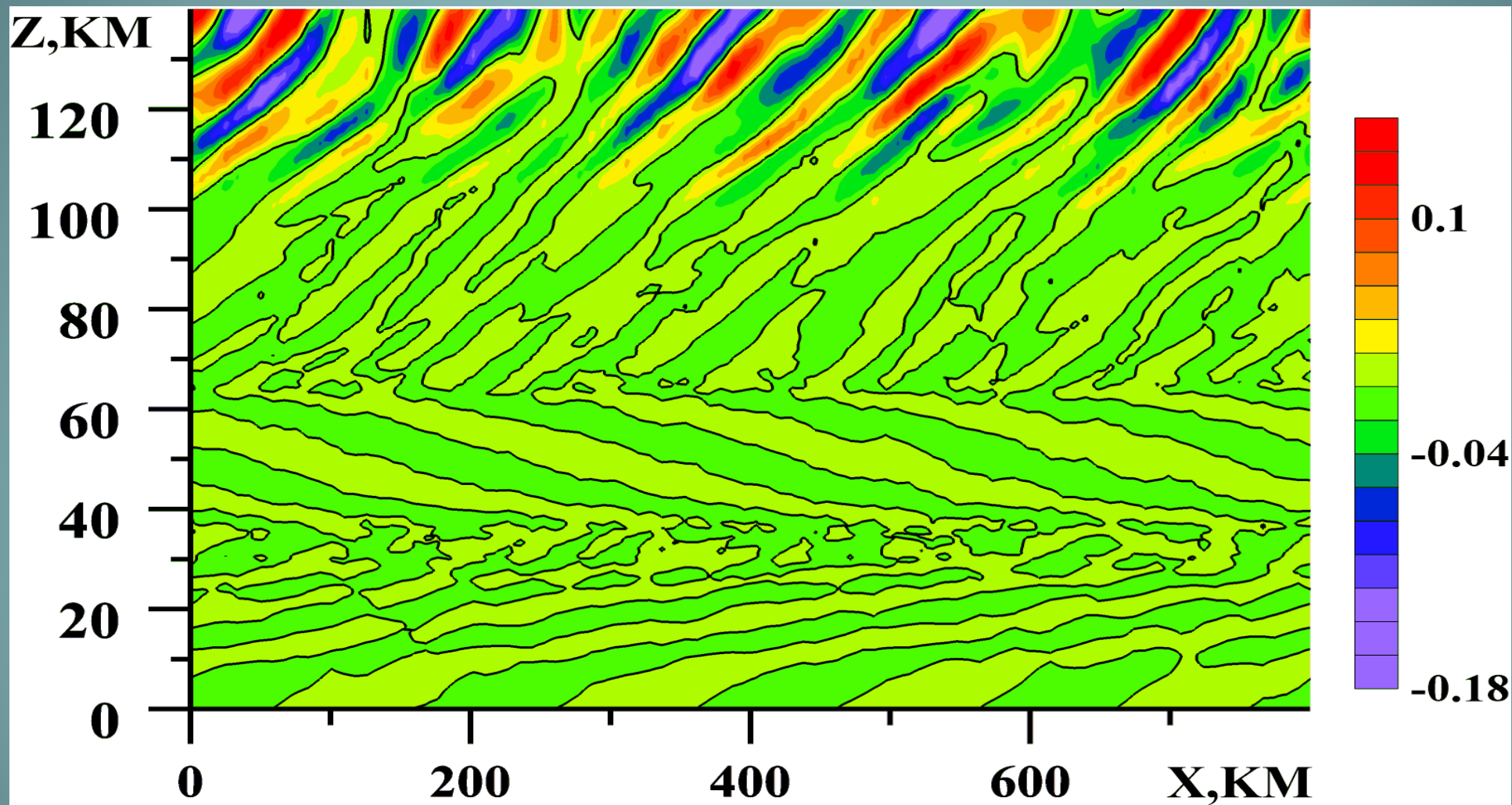
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 20\tau$

Спектральная плотность вертикальной скорости на разных высотах.



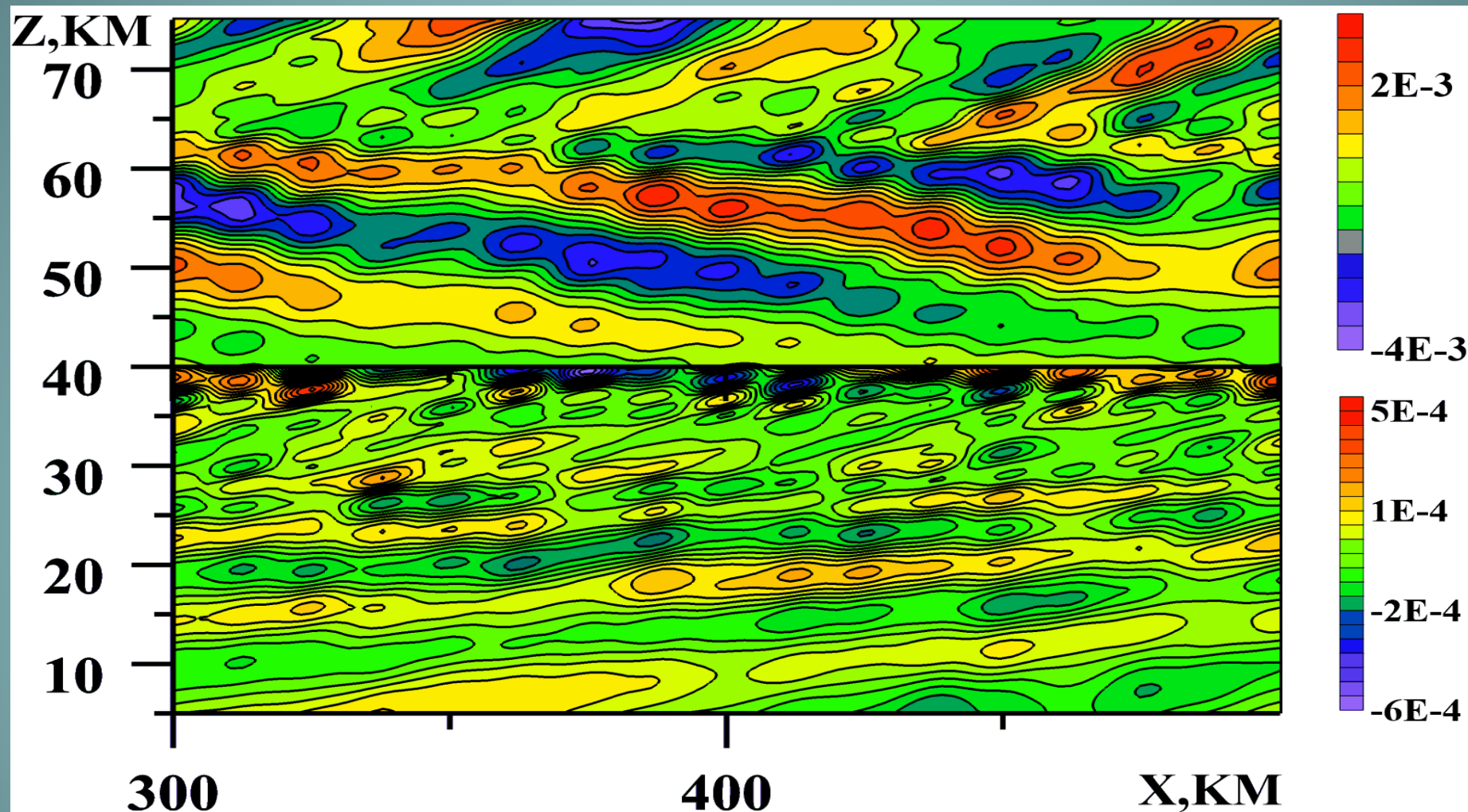
В момент $t = 20 \tau$ после включения волнового источника на земной поверхности

Прхождение АГВ $t = 50\tau$



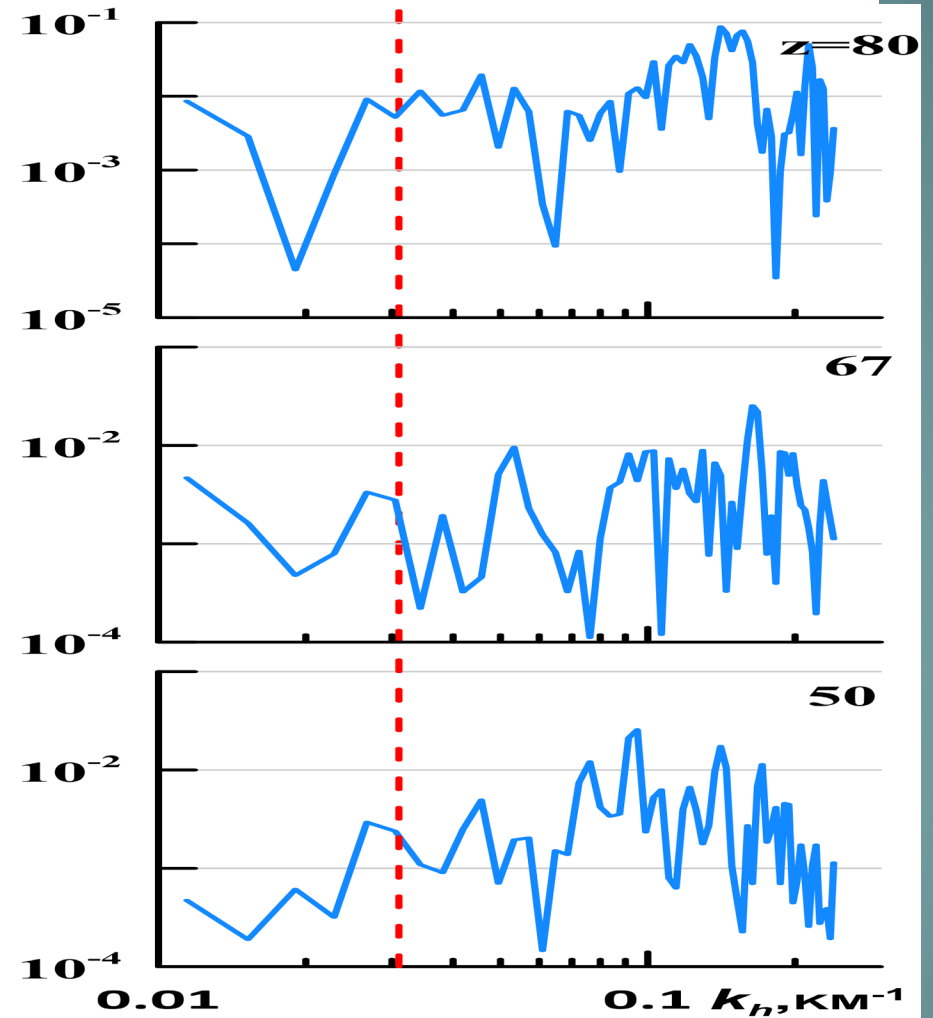
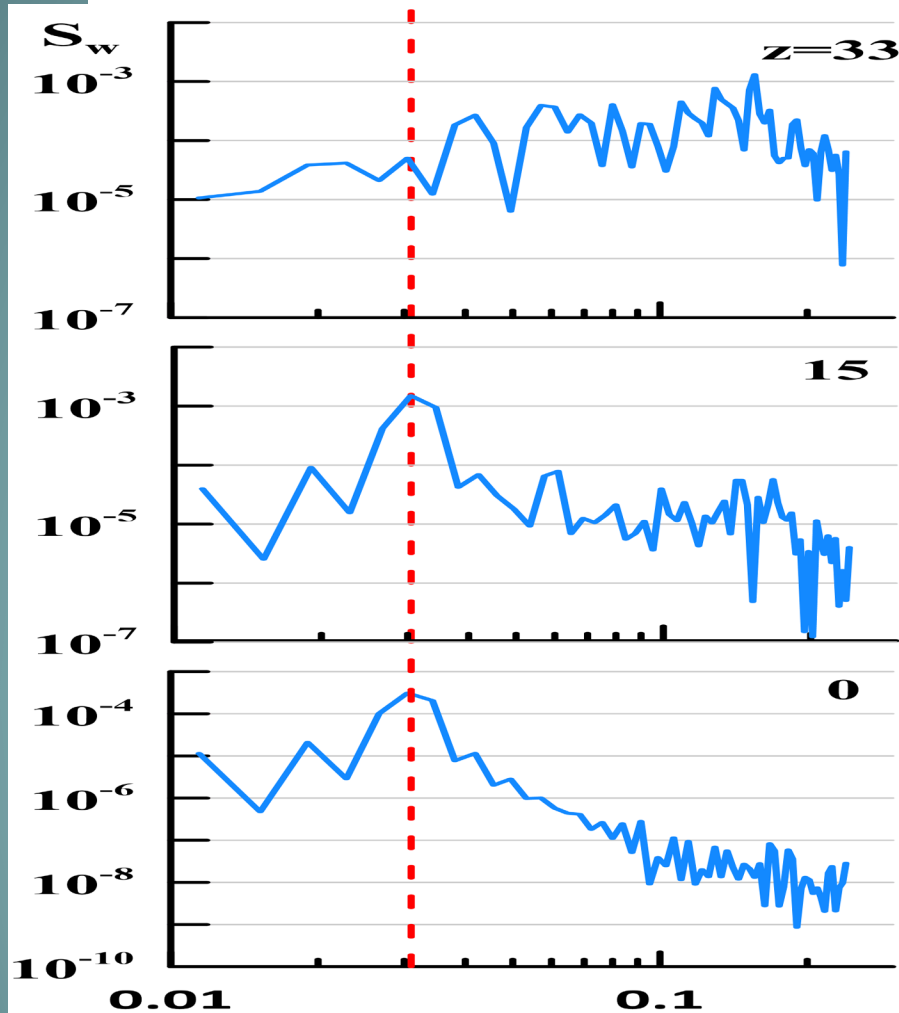
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 2\tau$

Прхождение АГВ $t = 50\tau$



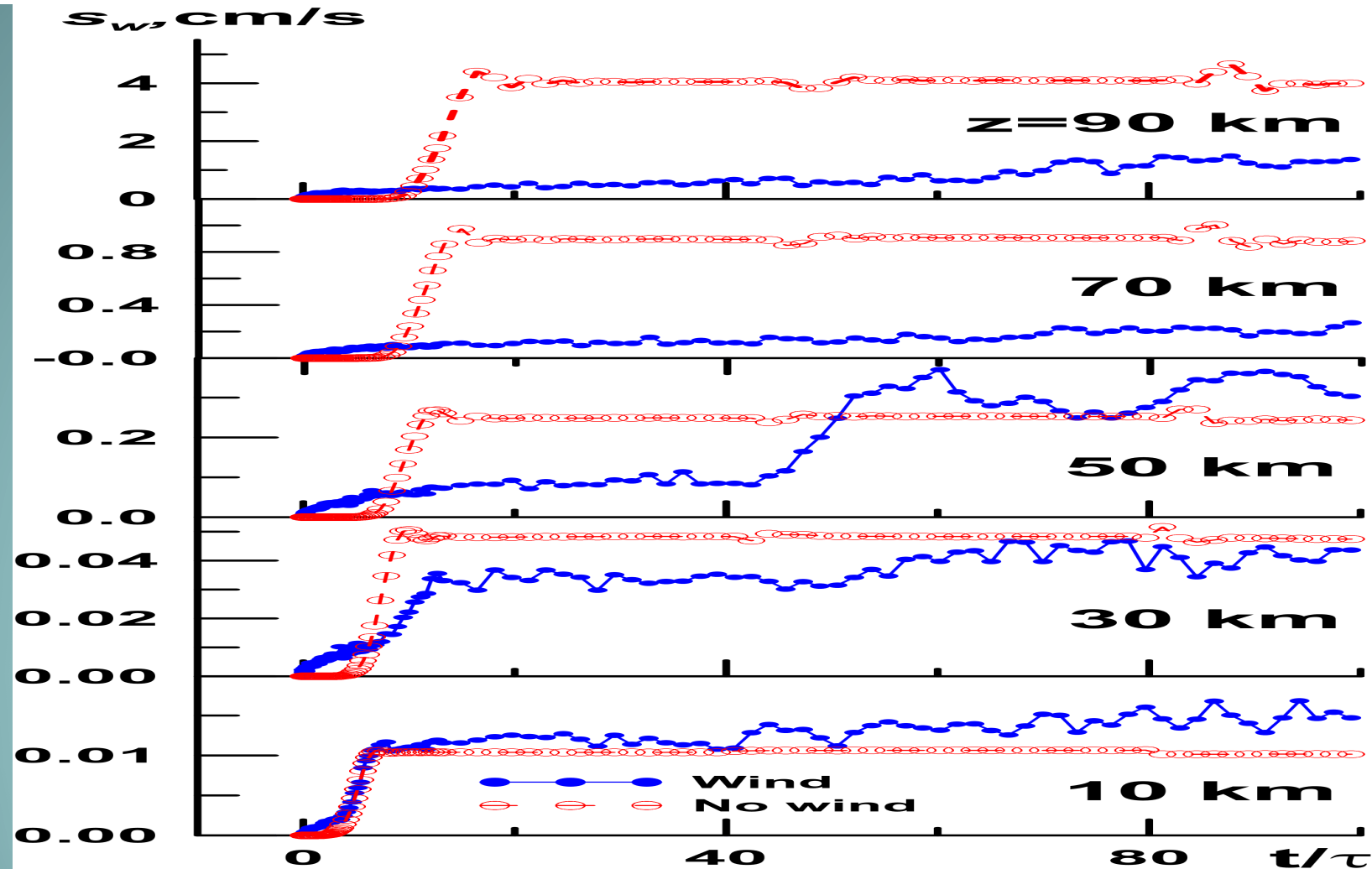
Вертикальная скорость (м/с) в плоскости XOZ в момент $t = 50\tau$

Спектральная плотность вертикальной скорости на разных высотах.



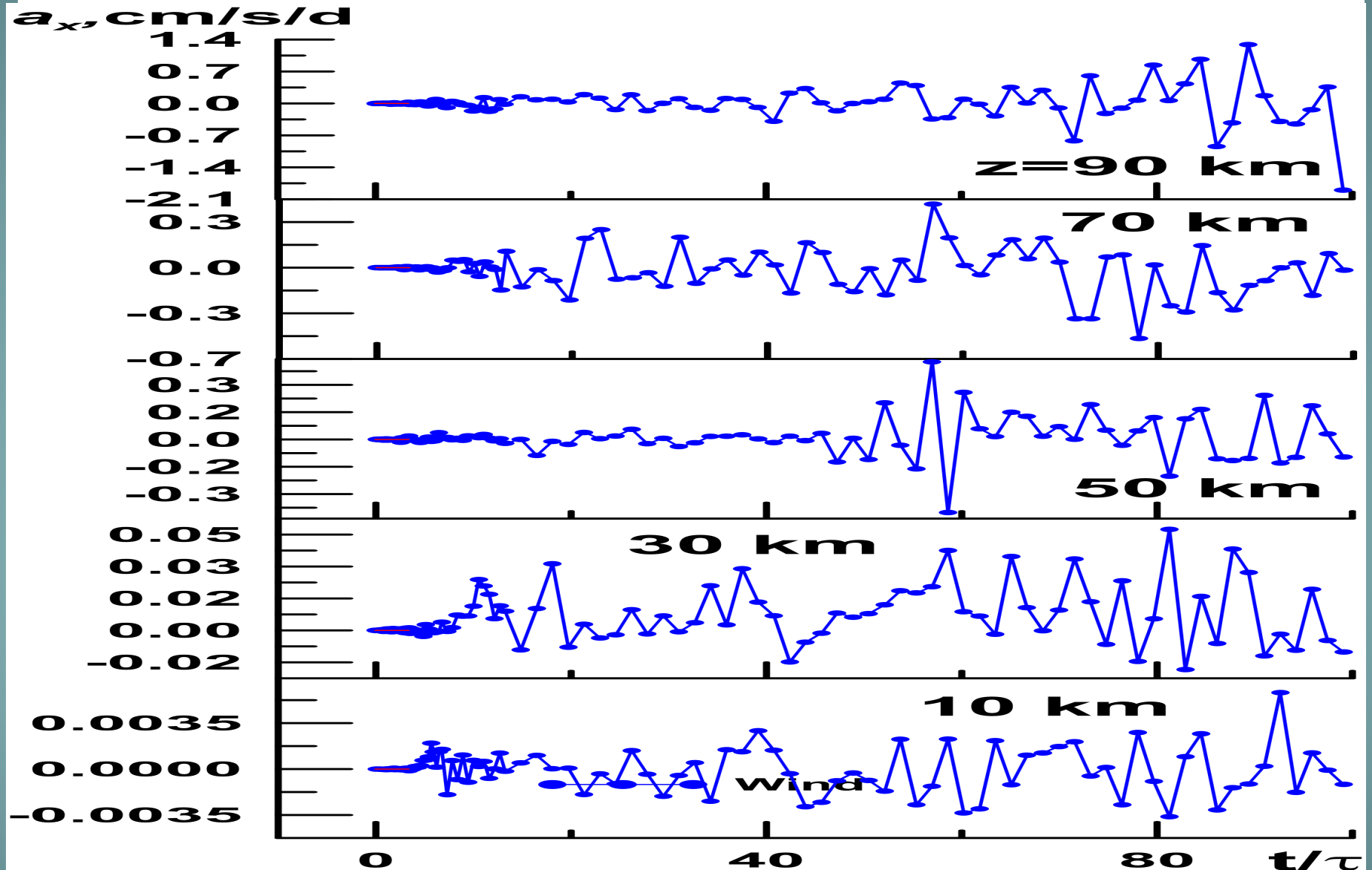
В момент $t = 50$ т после включения волнового источника на земной поверхности

Стандартное отклонение вертикальной скорости в см/с на разных высотах

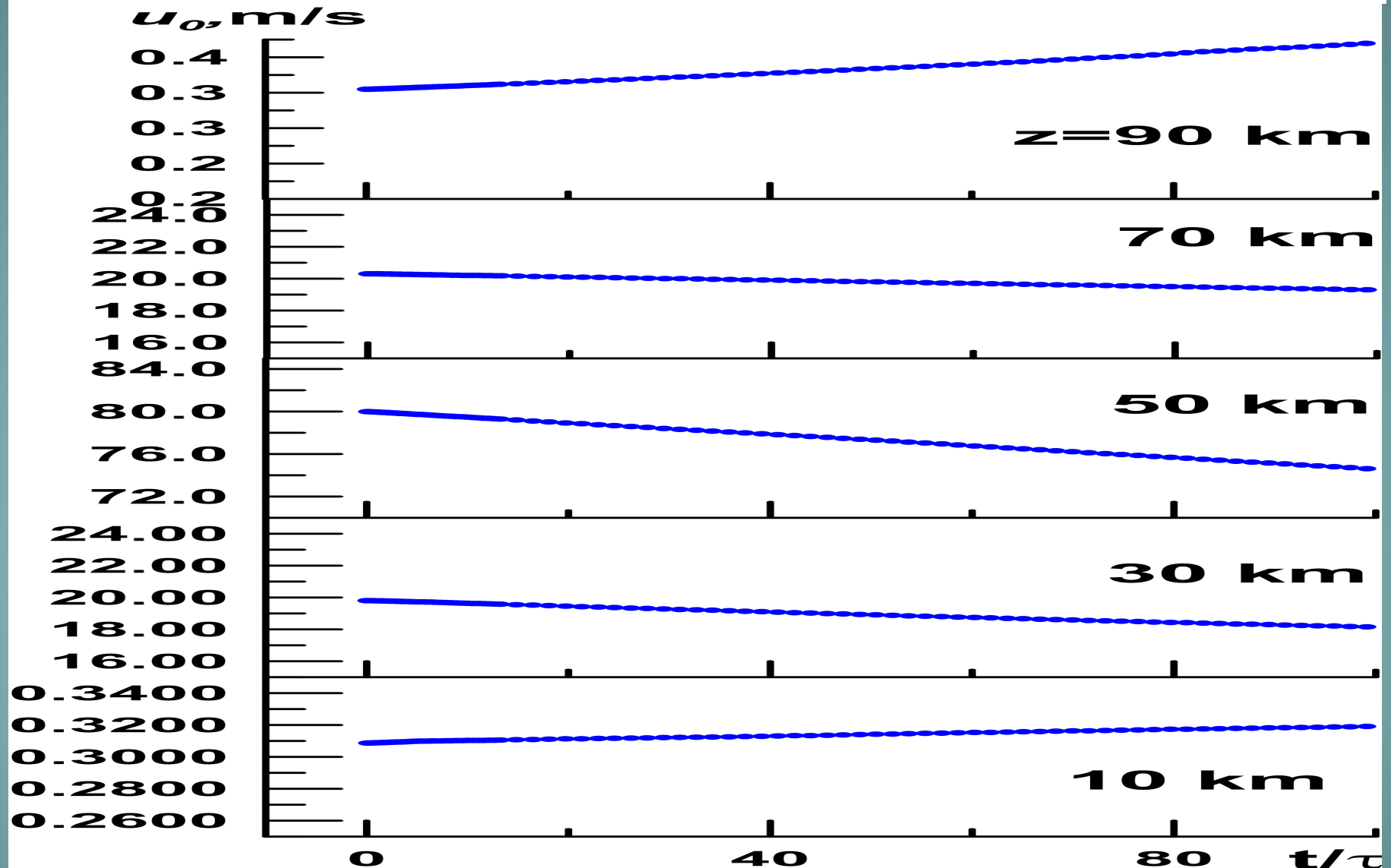


Красные линии -- безветренная атмосфера

Волновое ускорение среднего потока в (см/с)/сут на разных высотах



Изменение средней горизонтальной скорости в м/с на разных высотах



Заключение

- 1. Часть волновой энергии может преодолевать критические уровни и распространяться в верхнюю атмосферу вследствие усиленной генерации вторичных волн.**
- 2. Неустойчивость волн около критических уровней интенсифицирует переход энергии от первичных ВГВ, распространяющихся от приземных источников, к вторичным волновым модам.**
- 3. В термосфере амплитуды вторичных ВГВ могут превосходить волновые амплитуды при отсутствии критических уровней.**

Высотная зависимость среднеквадратических вариаций вертикальной скорости в мм/с, создаваемых первичной и спектром вторичных волновых мод

Z, KM	Безветренная атмосфера			Критические уровни			Отношения	
	δ_{w10}	δ_{w20}	$\delta_{w20}/\delta_{w10}$	δ_{w1}	δ_{w2}	δ_{w2}/δ_{w1}	δ_{w1}/δ_{w10}	δ_{w2}/δ_{w20}
0	0.07	0.02	0.22	0.07	0.02	0.23	0.99	1.00
10	0.11	0.02	0.22	0.11	0.07	0.62	1.02	2.87
20	0.22	0.05	0.22	0.23	0.13	0.58	1.06	2.81
30	0.53	0.12	0.22	0.26	0.36	1.36	0.46	3.08
40	1.22	0.26	0.22	0.59	0.83	1.41	0.50	3.13
50	2.62	0.58	0.22	1.36	1.88	1.38	0.53	3.26
60	4.90	1.10	0.22	0.98	2.57	2.61	0.20	2.34
70	9.57	2.14	0.22	0.61	5.22	8.59	0.05	2.44
80	20.1	4.45	0.22	1.12	12.3	11.0	0.05	2.77
90	43.6	9.69	0.22	2.47	22.8	9.25	0.06	2.35
100	83.4	18.7	0.22	8.63	63.3	7.34	0.10	3.38
110	58.5	12.7	0.22	16.4	135.1	8.23	0.30	10.6
130	5.15	1.15	0.22	36.3	250.8	6.91	64.8	217.7
150	1.43	0.31	0.22	33.4	312.9	9.38	16.5	1007.3
170	0.50	0.12	0.25	39.4	194.6	4.94	73.9	1563.2
190	0.23	0.07	0.29	40.8	199.4	4.89	161.1	3024.5
210	0.09	0.03	0.39	56.3	168.2	2.99	558.5	4868.8
250	0.08	0.03	0.42	82.6	67.3	0.81	1006.0	2098.1