

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЩЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ АТМОСФЕРЫ ТИТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛНЫХ УРАВНЕНИЙ ГАЗОВОЙ ДИНАМИКИ

И. В. Мингалев¹, А. В. Родин^{2,3}, К. Г. Орлов¹

- 1. Полярный геофизический институт Кольского НЦ РАН*
- 2. Московский физико-технический институт (гос. университет)*
- 3. Институт космических исследований РАН*

Работа выполнена при финансовой поддержке программы президиума РАН № 22

Система уравнений газовой динамики

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = (-\nabla p + \operatorname{div} \mathcal{T}) + \rho \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div} \left((E + p) \mathbf{v} \right) = (\rho \mathbf{v}, \mathbf{F}) + \operatorname{div}(\mathcal{T} \cdot \mathbf{v} - \mathbf{j}) + Q ,$$

где ρ — плотность атмосферного газа, \mathbf{v} — трехмерный вектор гидродинамической скорости, p — давление, \mathbf{j} — вектор потока тепла, $E = (\rho \mathbf{v}^2 + 3p)/2$ — полная энергия единицы объема, \mathcal{T} — тензор вязких напряжений, \mathbf{F} — ускорение внешних сил, Q — объемная мощность нагрева/охлаждения излучением.

$$\mathbf{F} = \mathbf{r} \left(\Omega^2 - g_0 r_3^2 / r^3 \right) - \Omega (\Omega, \mathbf{r}) + 2 [\mathbf{v} \times \Omega] ,$$

$$Q(t, h, \varphi, \beta) = \frac{3}{2} \rho R_a \frac{\left(T_{rel}(t, h, \varphi, \beta) - T(t, h, \varphi, \beta) \right)}{\tau_{rel}(h)} ,$$

где t , h , φ , β — время, высота, долгота и широта, соответственно, $\tau_{rel}(h)$ — время релаксации, R_a — газовая постоянная атмосферного газа. Релаксационная температура T_{rel} задается по формуле

$$T_{rel}(t, h, \varphi, \beta) = T_{cp}(h) + T_{dop}(h) \left(\max\{\cos \theta, 0\} - 0.25 \right).$$

Здесь $T_{cp}(h)$ — средняя температура на высоте h по инженерной модели атмосферы Титана, θ — зенитный угол Солнца в точке с долготой φ и широтой β в текущий момент времени, а $T_{dop}(h)$ — поправочная температура, которая в градусах Кельвина определяется по формулам

$$T_{dop}(h) = \begin{cases} 7 & \text{при } 0 \leq h \leq h_1, \\ 7 + 45 \cdot x^3(2 - x)^3, \quad x = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} & \text{при } h_1 \leq h \leq h_2, \\ 52 & \text{при } h_2 \leq h, \end{cases}$$

в которых $h_1 = 50$ км, $h_2 = 150$ км.

Начальные условия. Температура атмосферного газа в начальный момент задавалась горизонтально однородной: $T(t, h, \varphi, \beta) = T_{\text{ср}}(h)$. Вертикальный и меридиональный ветер в начальный момент брались равными нулю, а зональный ветер зависел только от высоты и широты и вычислялась по формуле

$$v_{\varphi}(h, \beta) = v_{\text{max}} \cdot v_{\text{ЭКВ}}(h) \cdot \cos \beta,$$

в которой v_{max} — максимальное значение зонального ветра на экваторе, а $v_{\text{ЭКВ}}(h)$ — гладкий безразмерный вертикальный профиль зональной компоненты ветра, заданный формулами

$$v_{\text{ЭКВ}}(h) = \begin{cases} \frac{x \cdot (5 - x^4)}{4}, & x = \frac{h}{180 \text{ км}} \quad \text{при } h \in [0, 180] \text{ км,} \\ 1 & \text{при } h \in [50, 68] \text{ км.} \end{cases}$$

В интервале высот 0–180 км $v_{\text{ЭКВ}}(h)$ почти линейно возрастает с высотой до значения 1, в интервале высот 180–565 км сохраняет это значение. Значения v_{max} брались равными от 200 до 250 м/с.



Dec. 28, 2006



Mar. 26, 2008



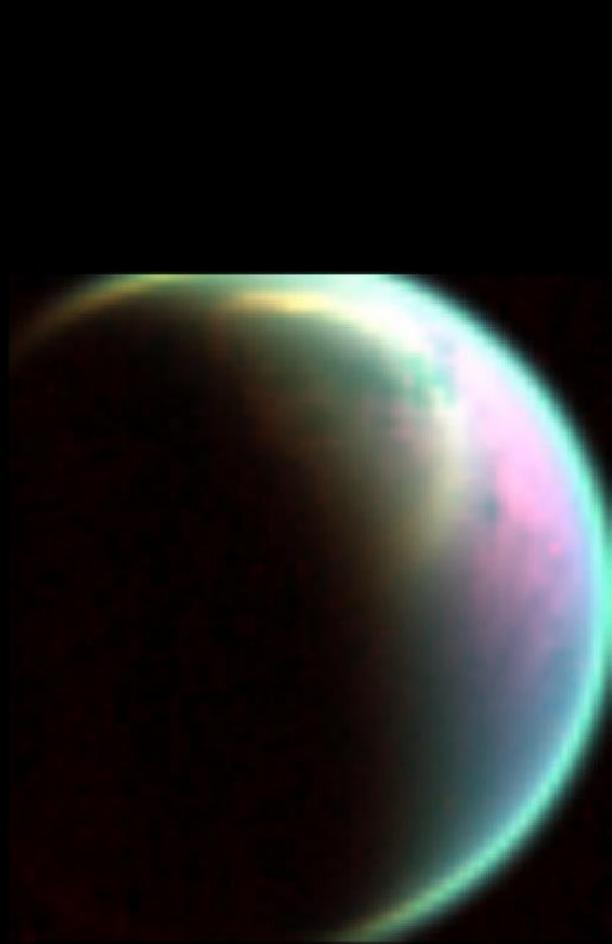
May 12, 2008



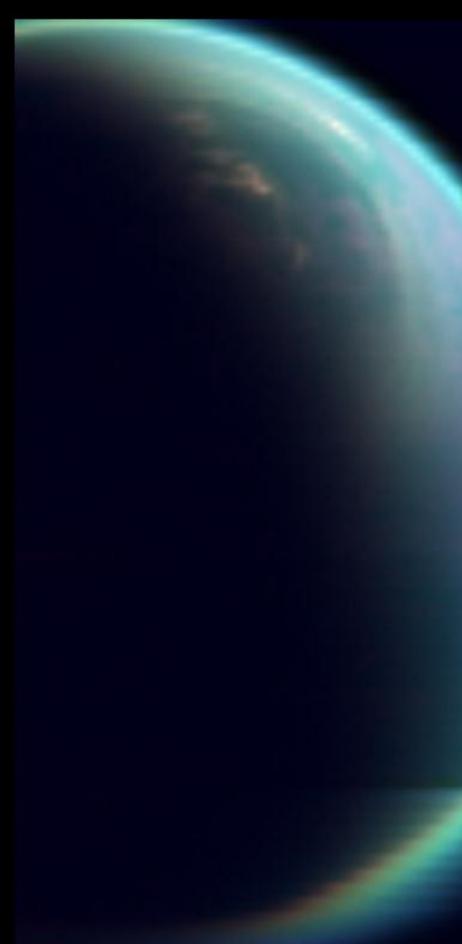
May 28, 2008



Mar. 27, 2009



Apr. 3, 2009

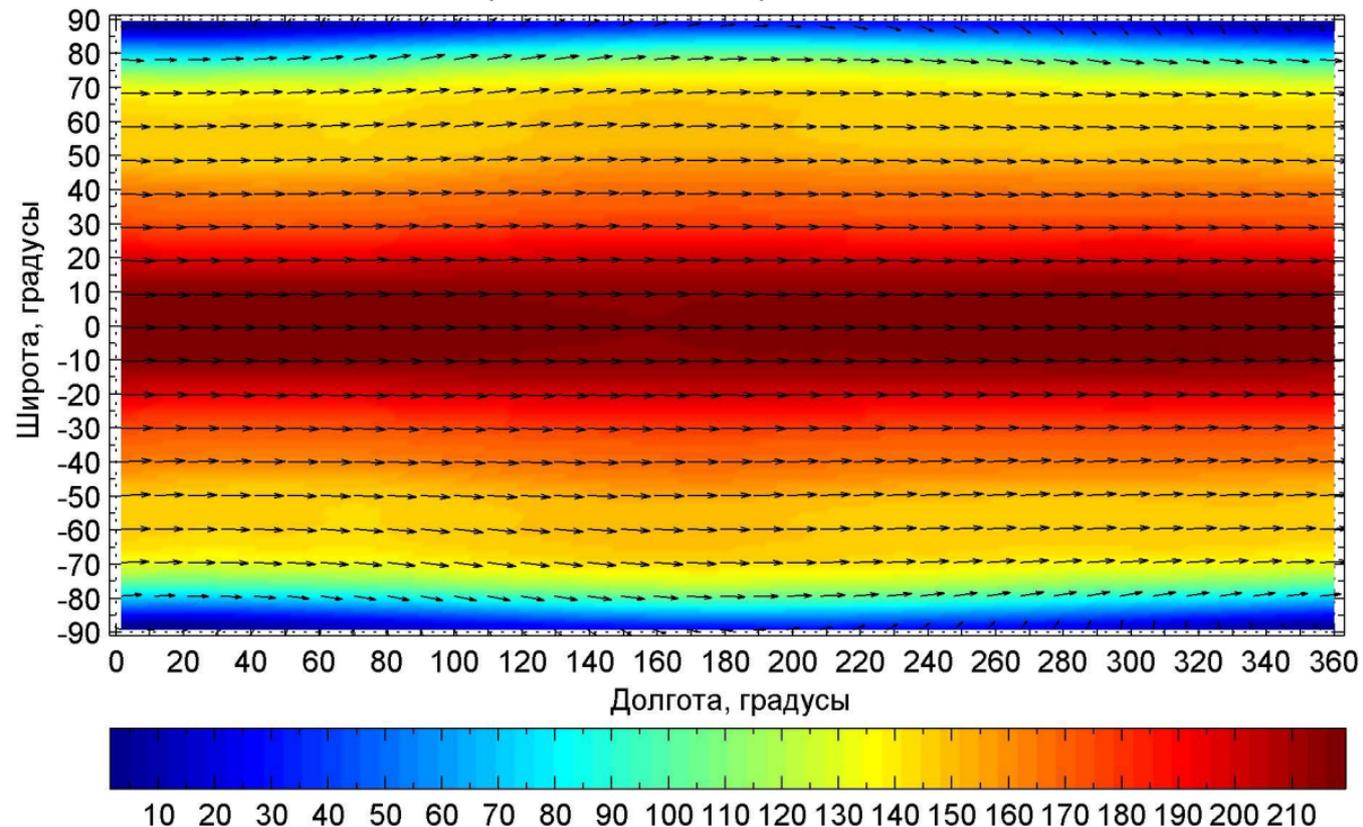


May 5, 2009

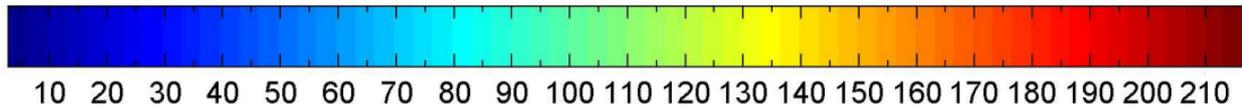
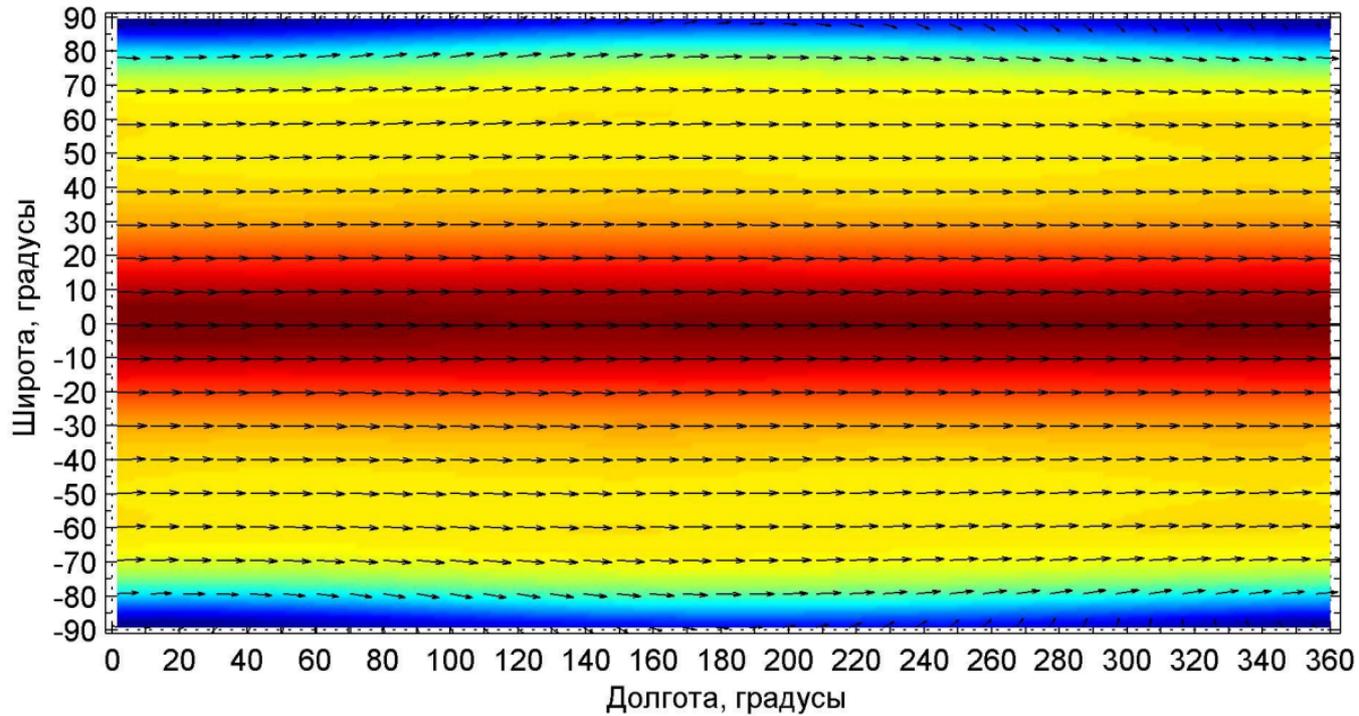


June 6, 2009

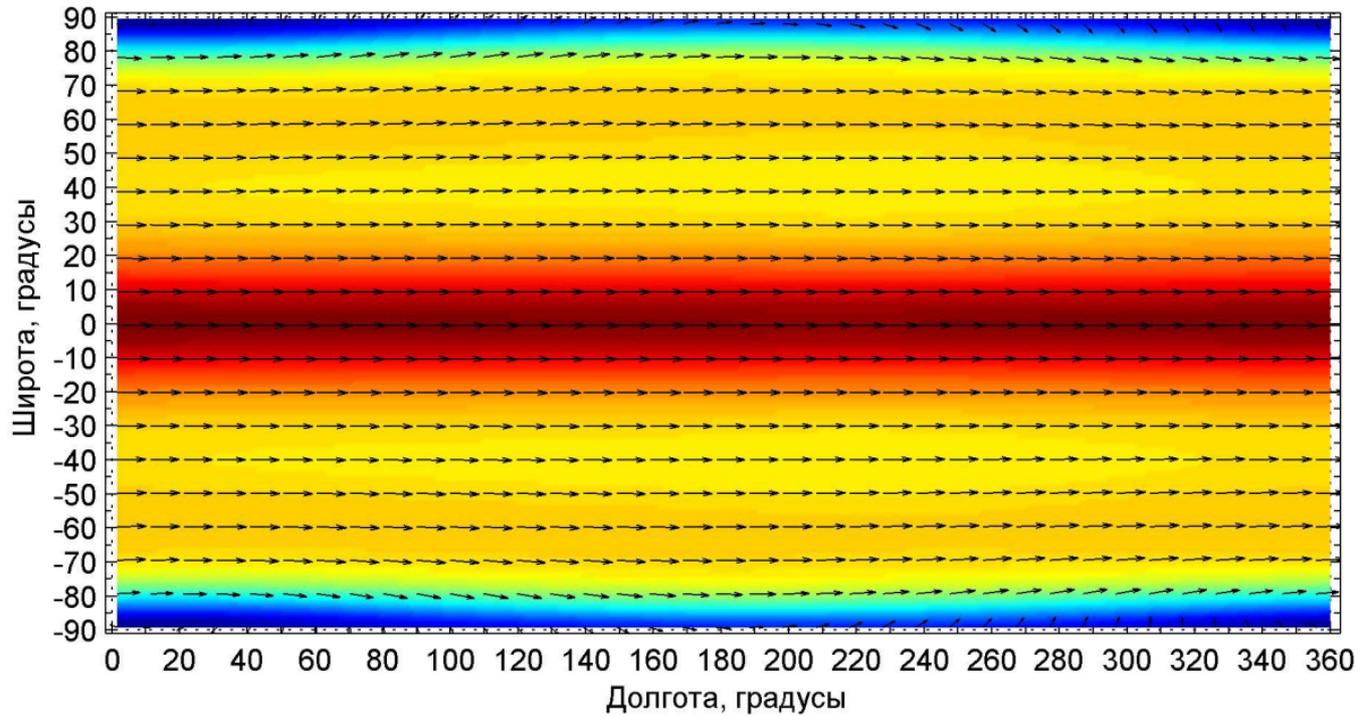
Горизонтальный ветер на высоте 550 км



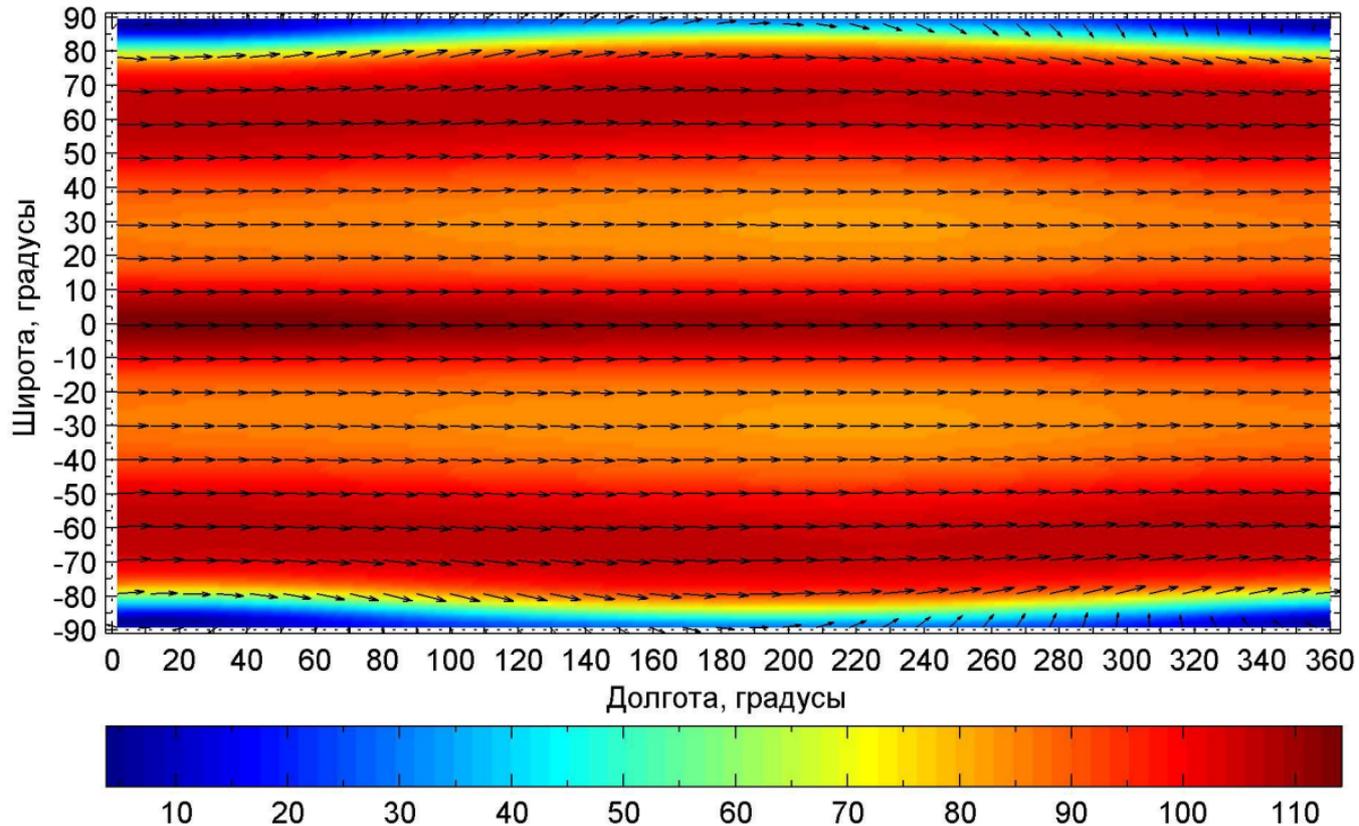
Горизонтальный ветер на высоте 450 км



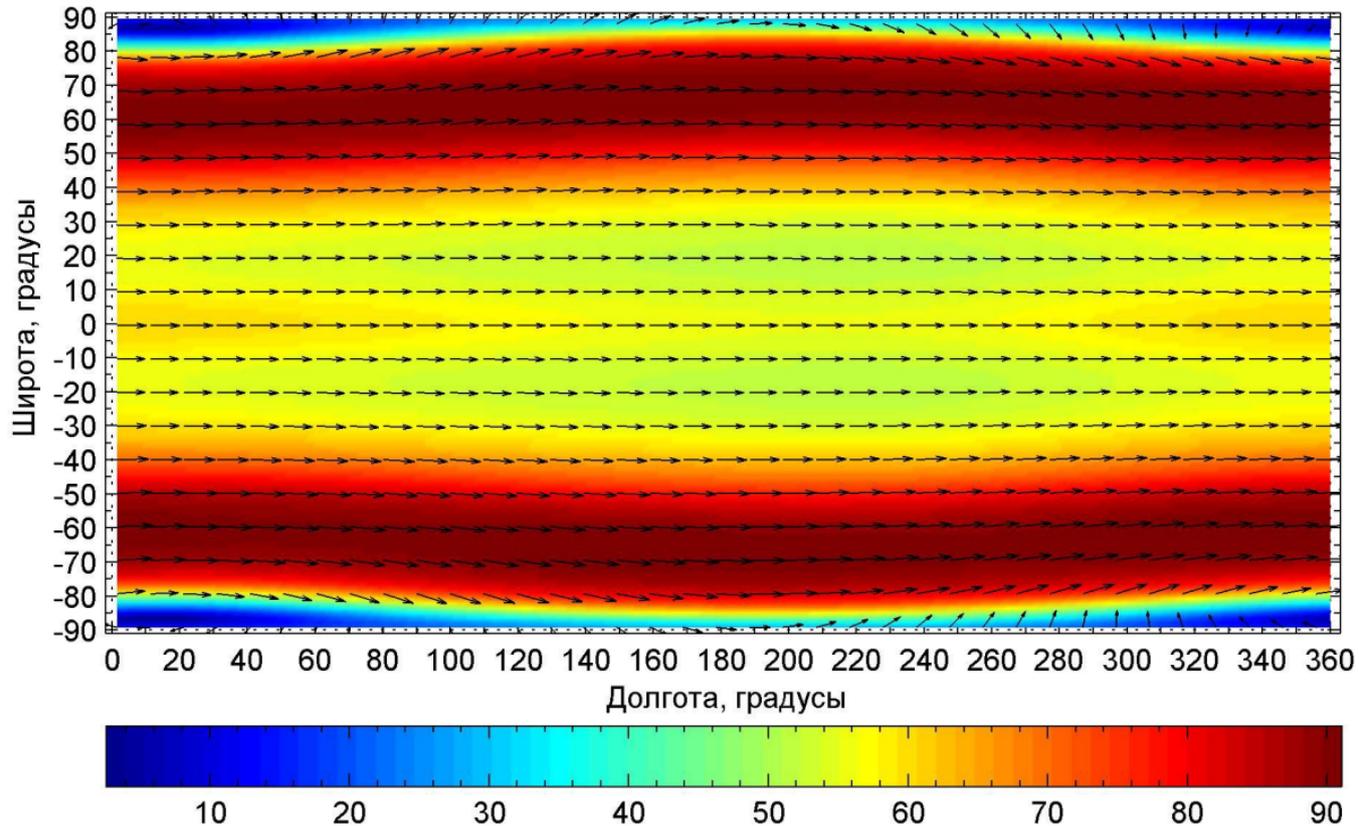
Горизонтальный ветер на высоте 350 км



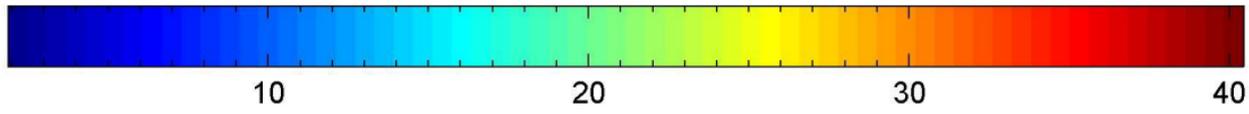
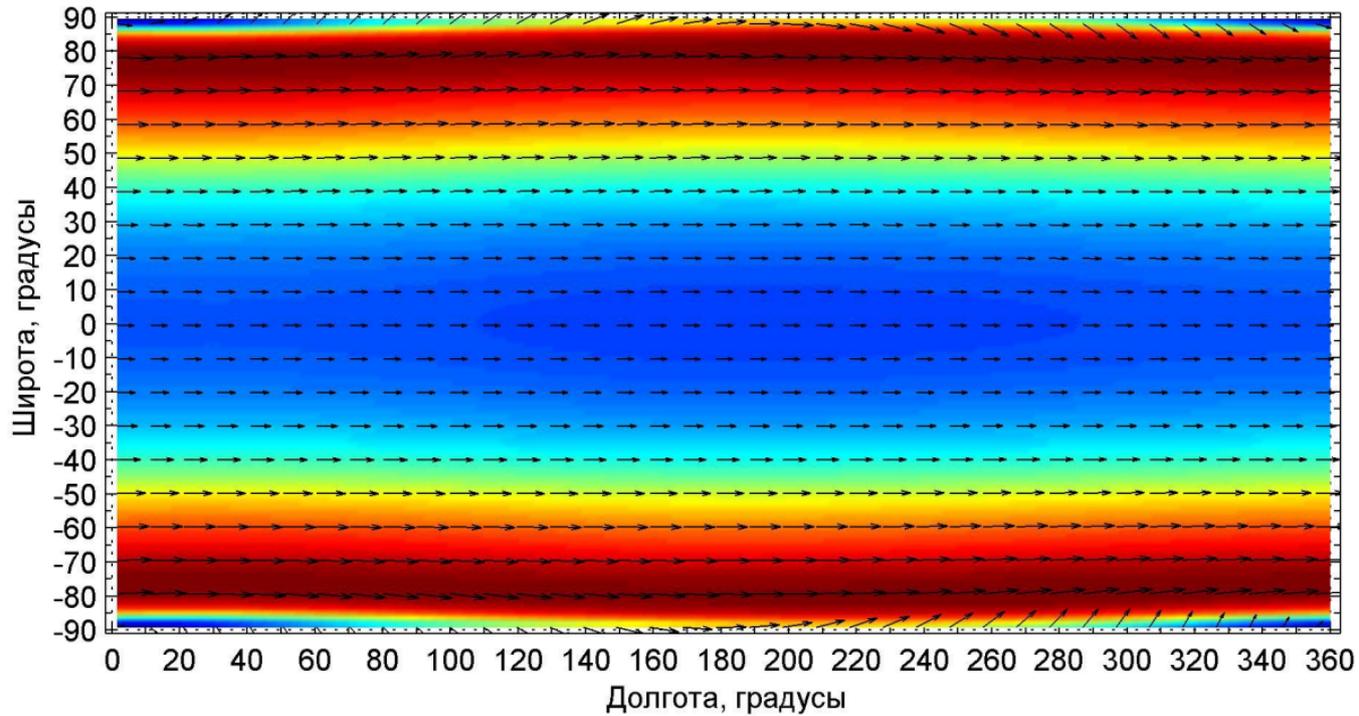
Горизонтальный ветер на высоте 250 км



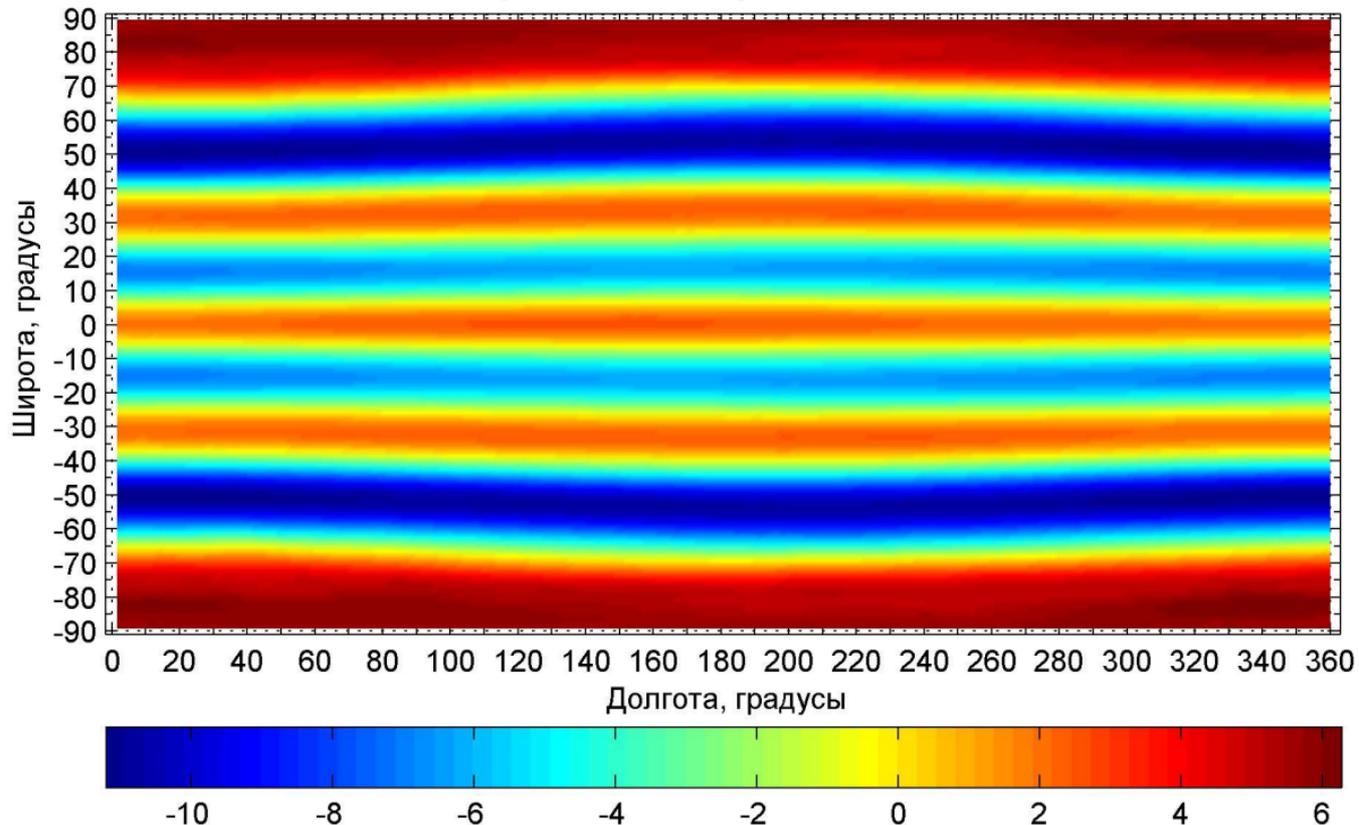
Горизонтальный ветер на высоте 200 км



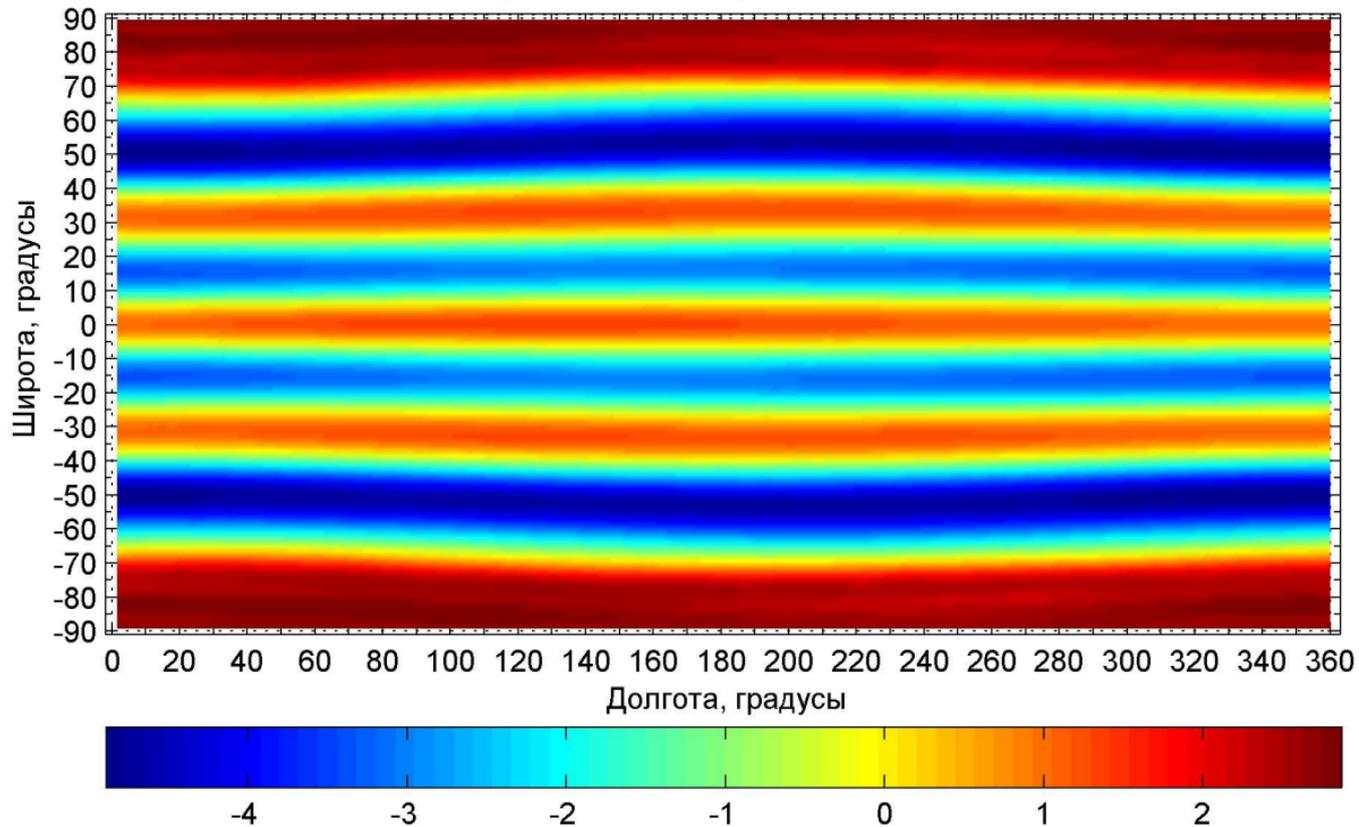
Горизонтальный ветер на высоте 100 км



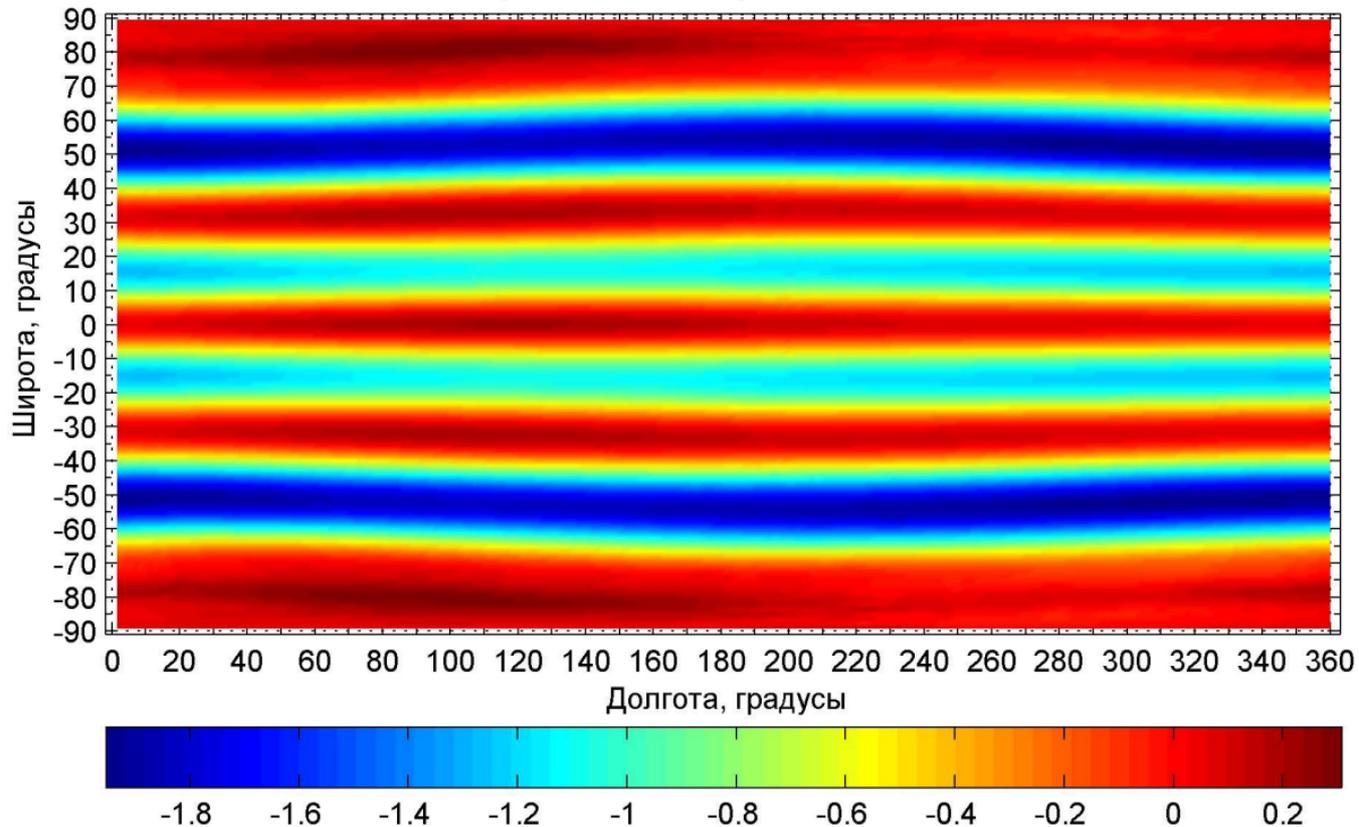
Вертикальный ветер на высоте 450 км



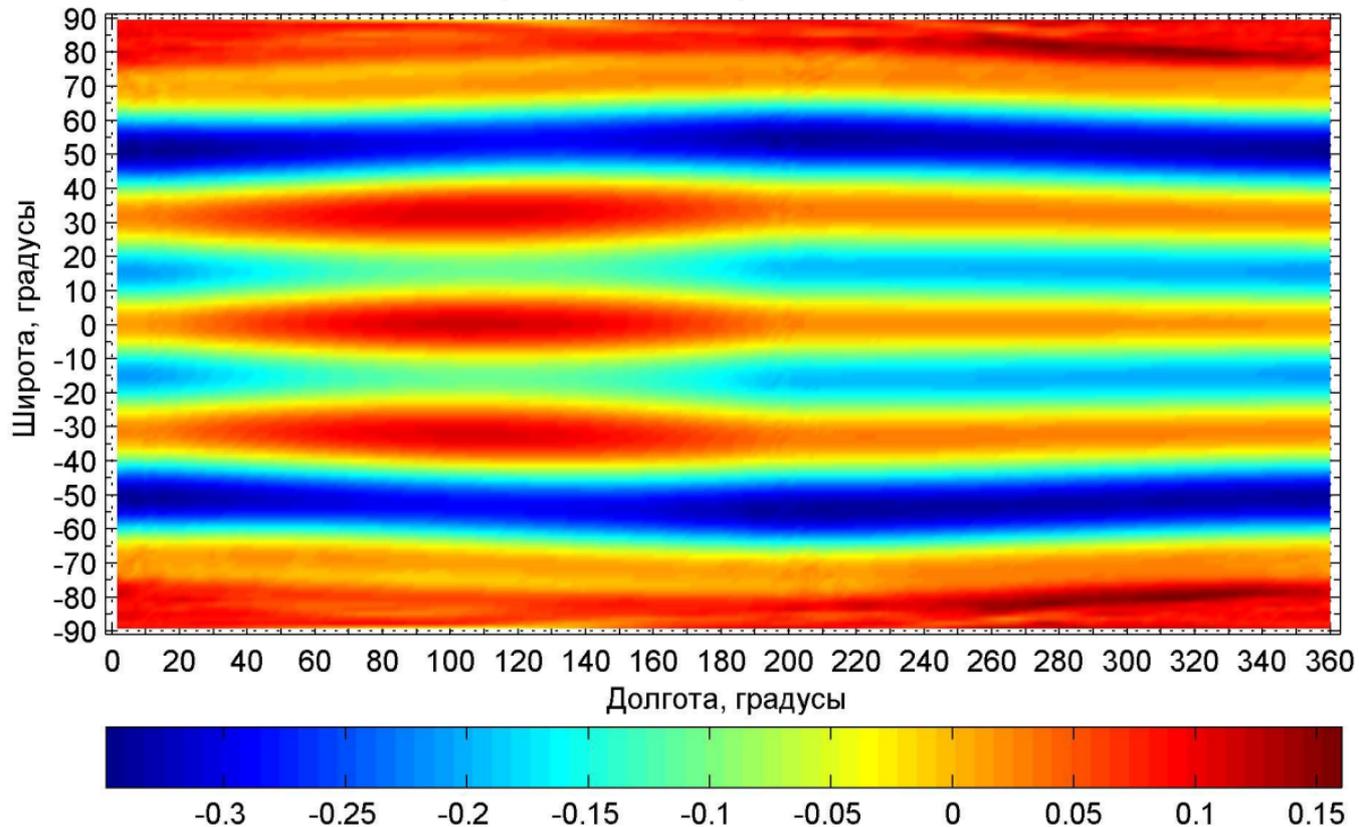
Вертикальный ветер на высоте 350 км



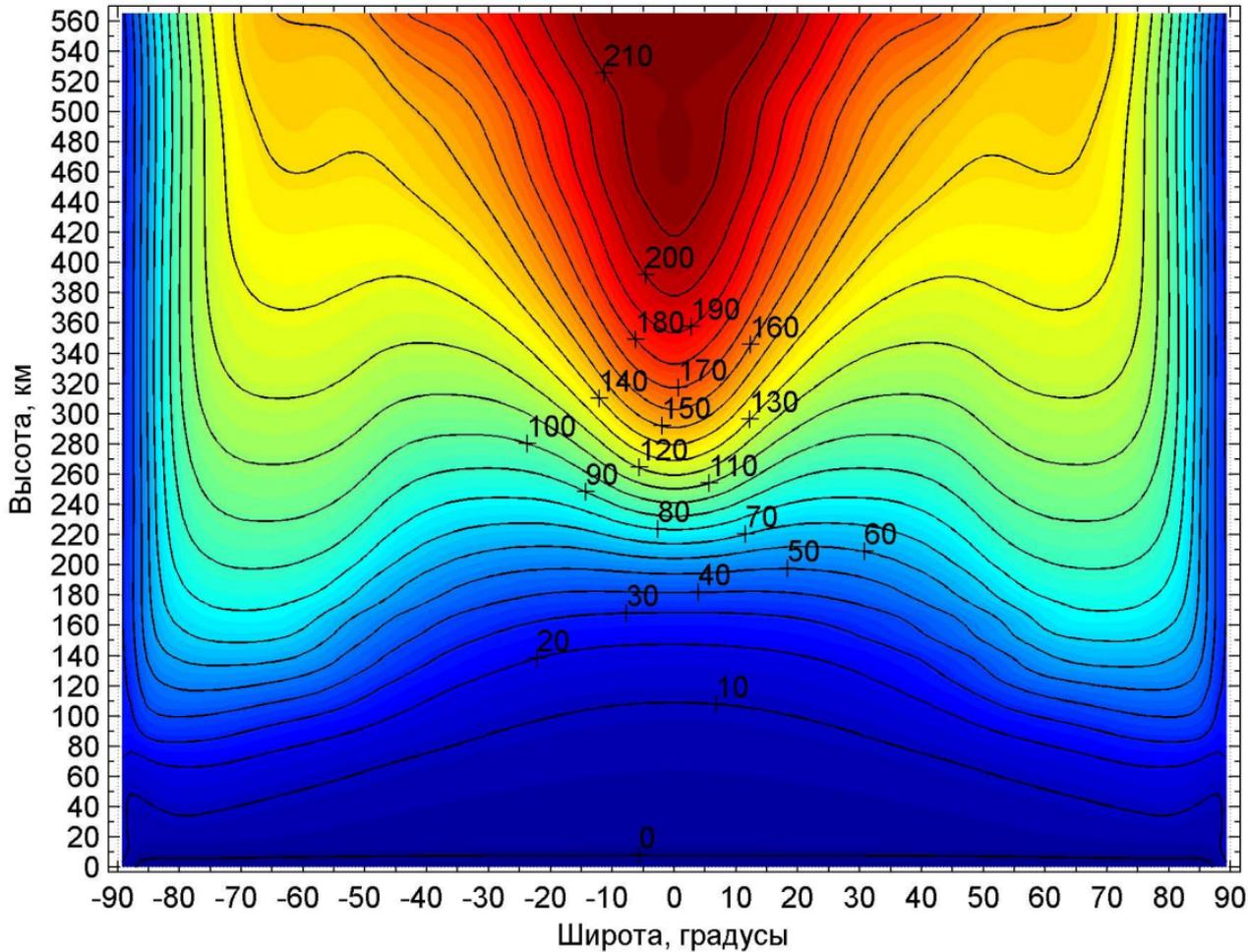
Вертикальный ветер на высоте 250 км



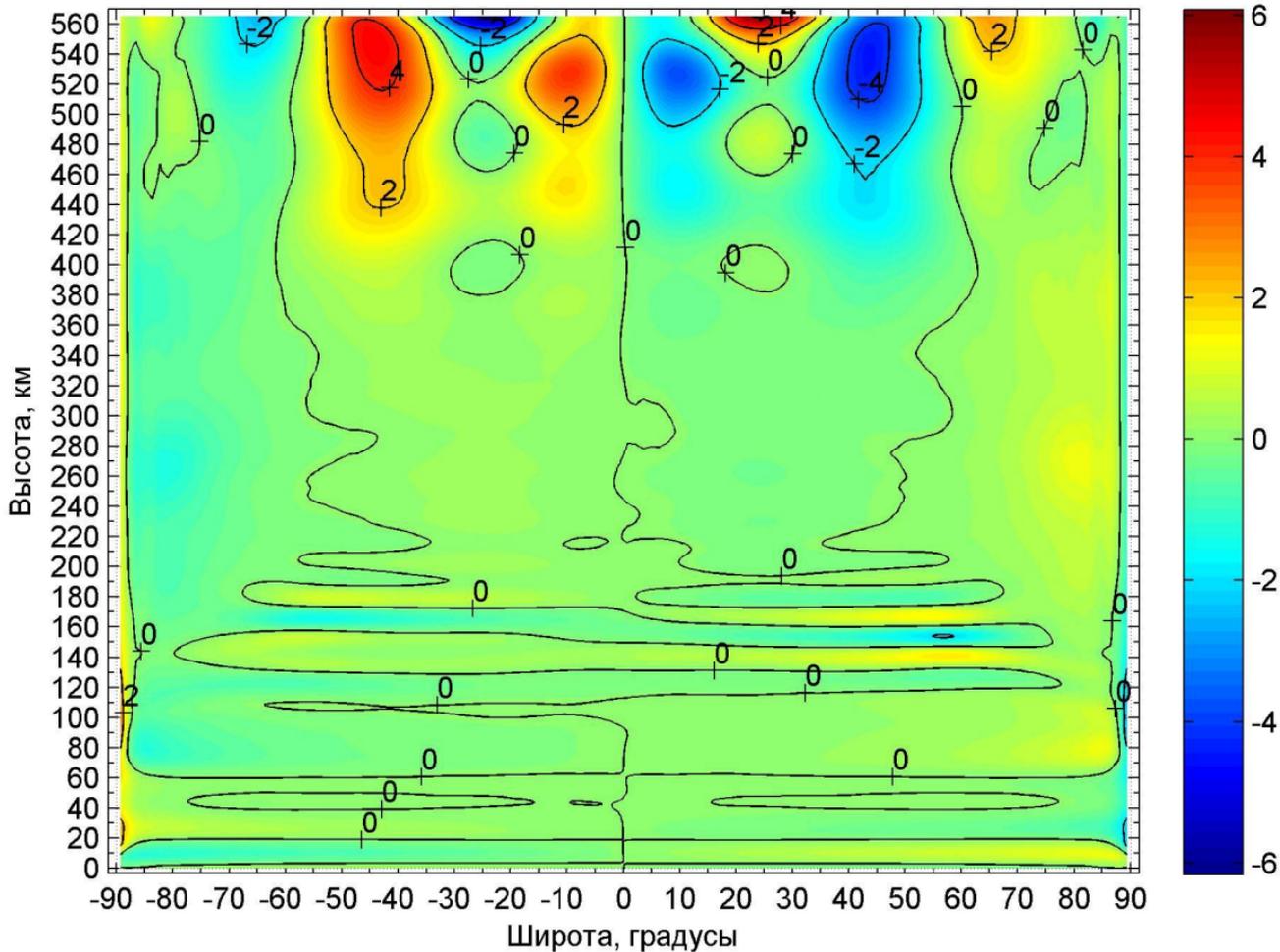
Вертикальный ветер на высоте 150 км



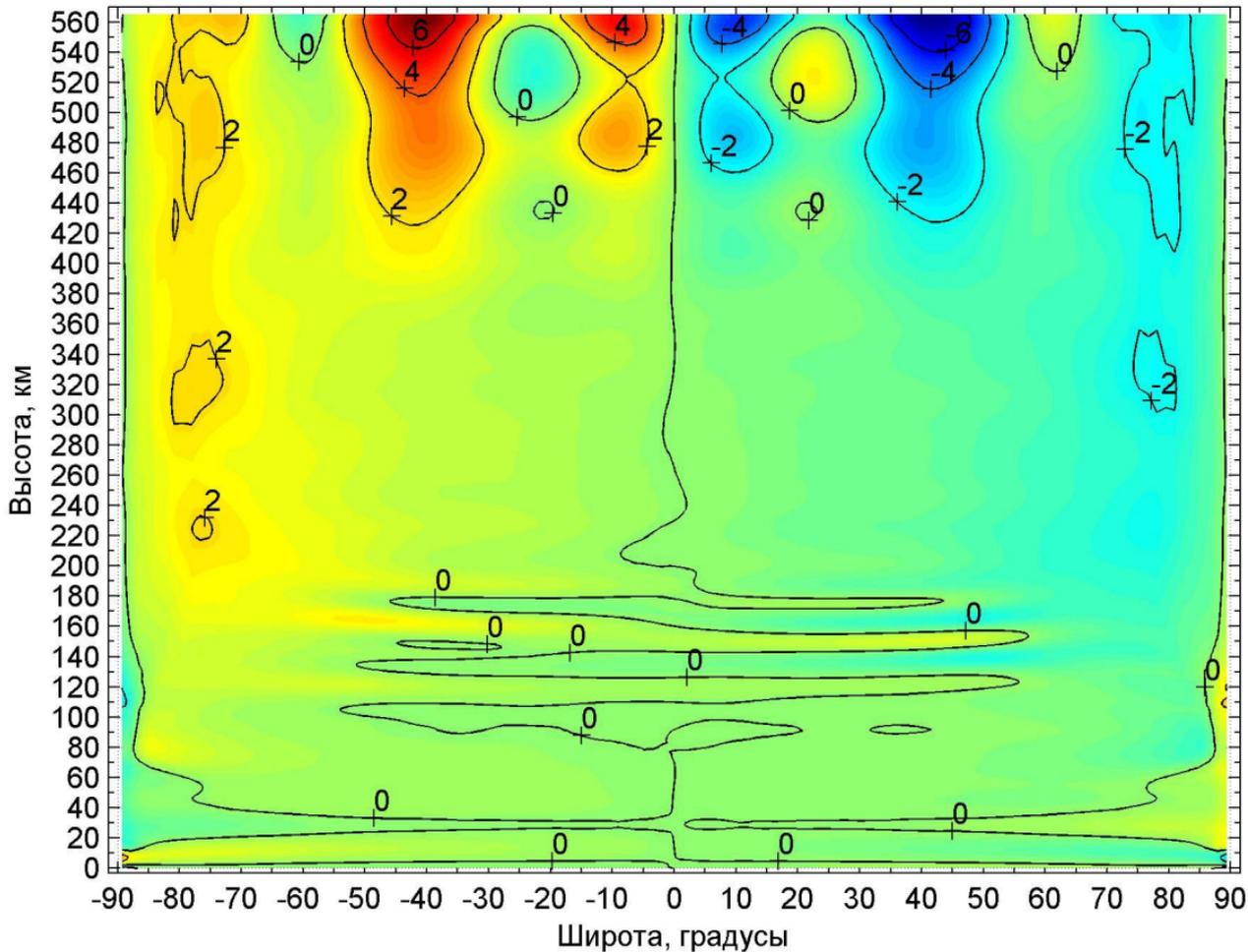
Зональный ветер вблизи вечернего терминатора



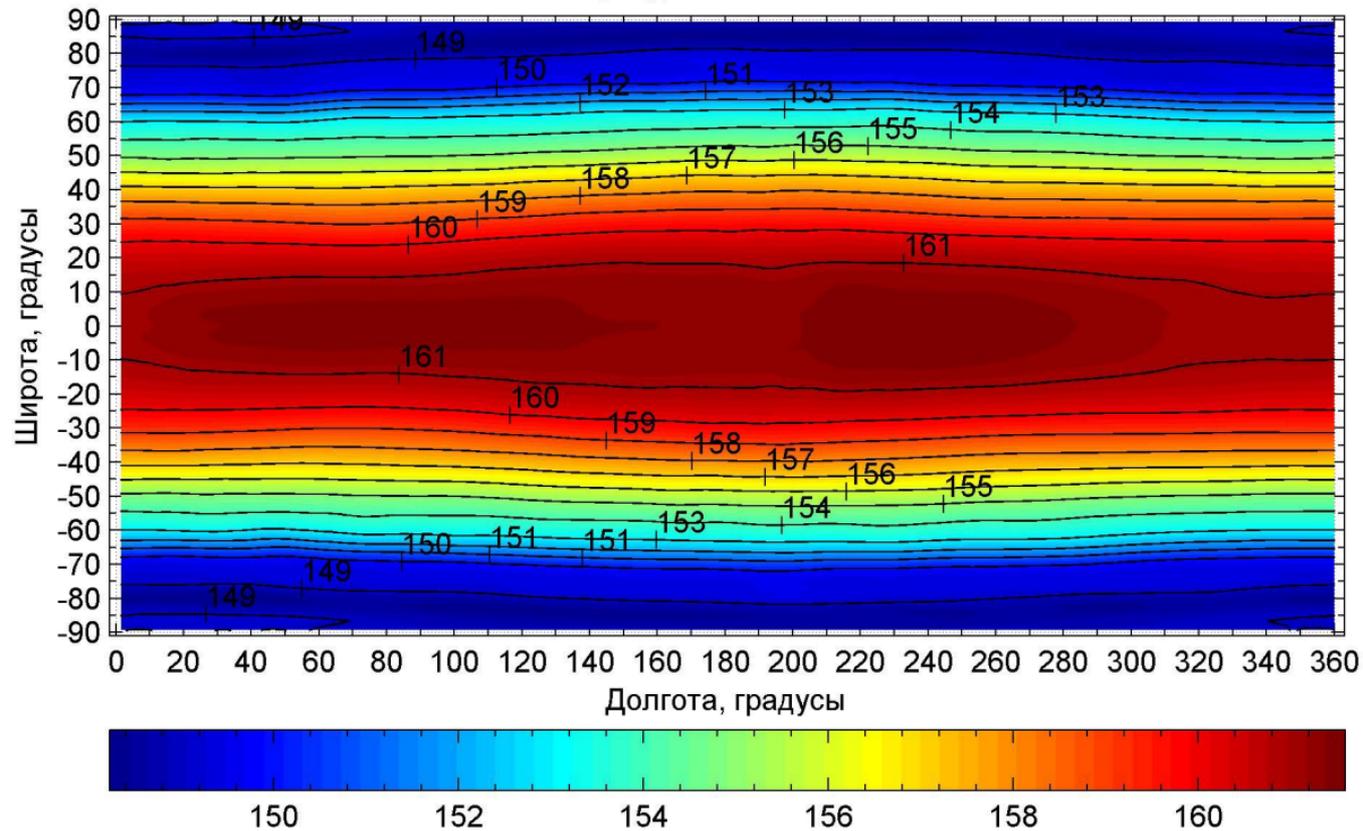
Меридиональный ветер вблизи вечернего терминатора



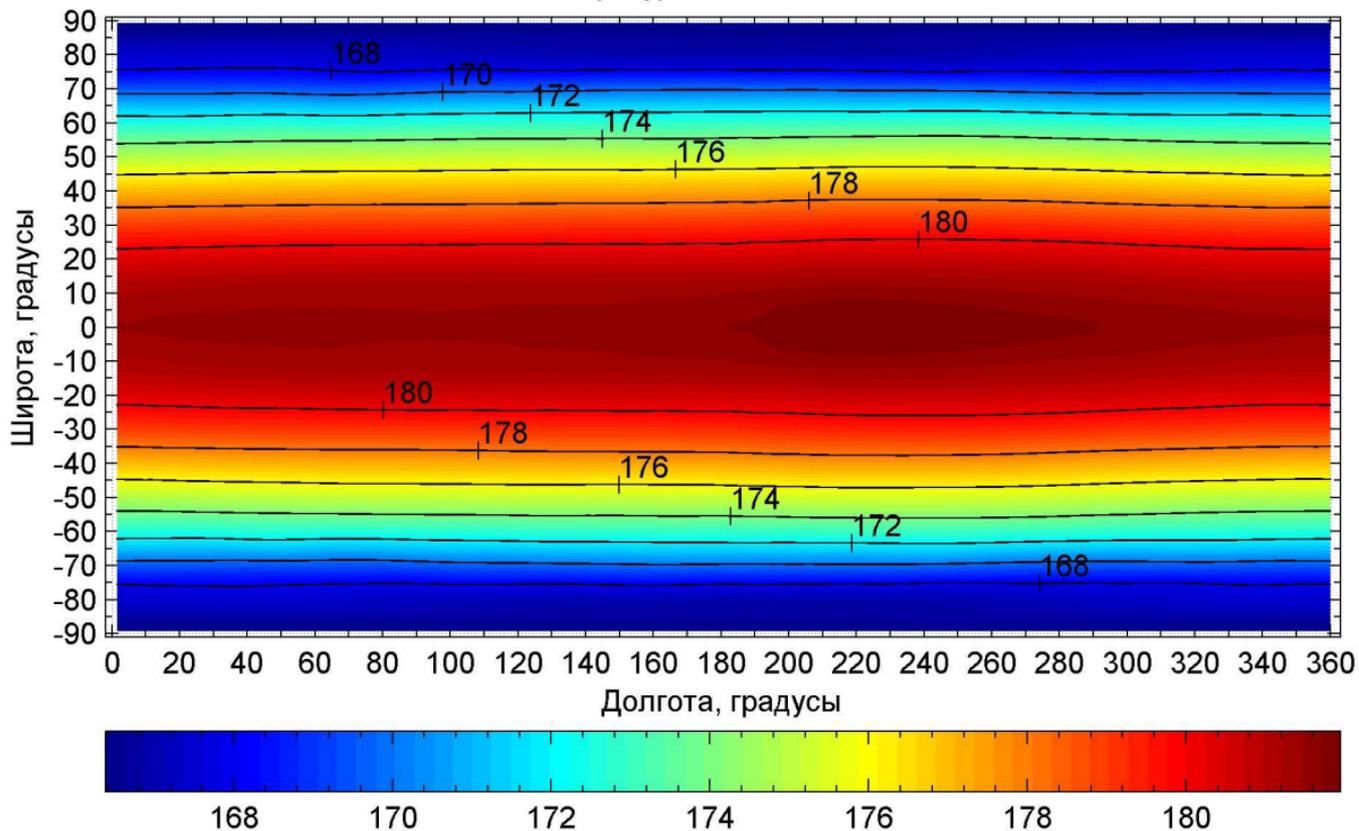
Меридиональный ветер вблизи утреннего терминатора



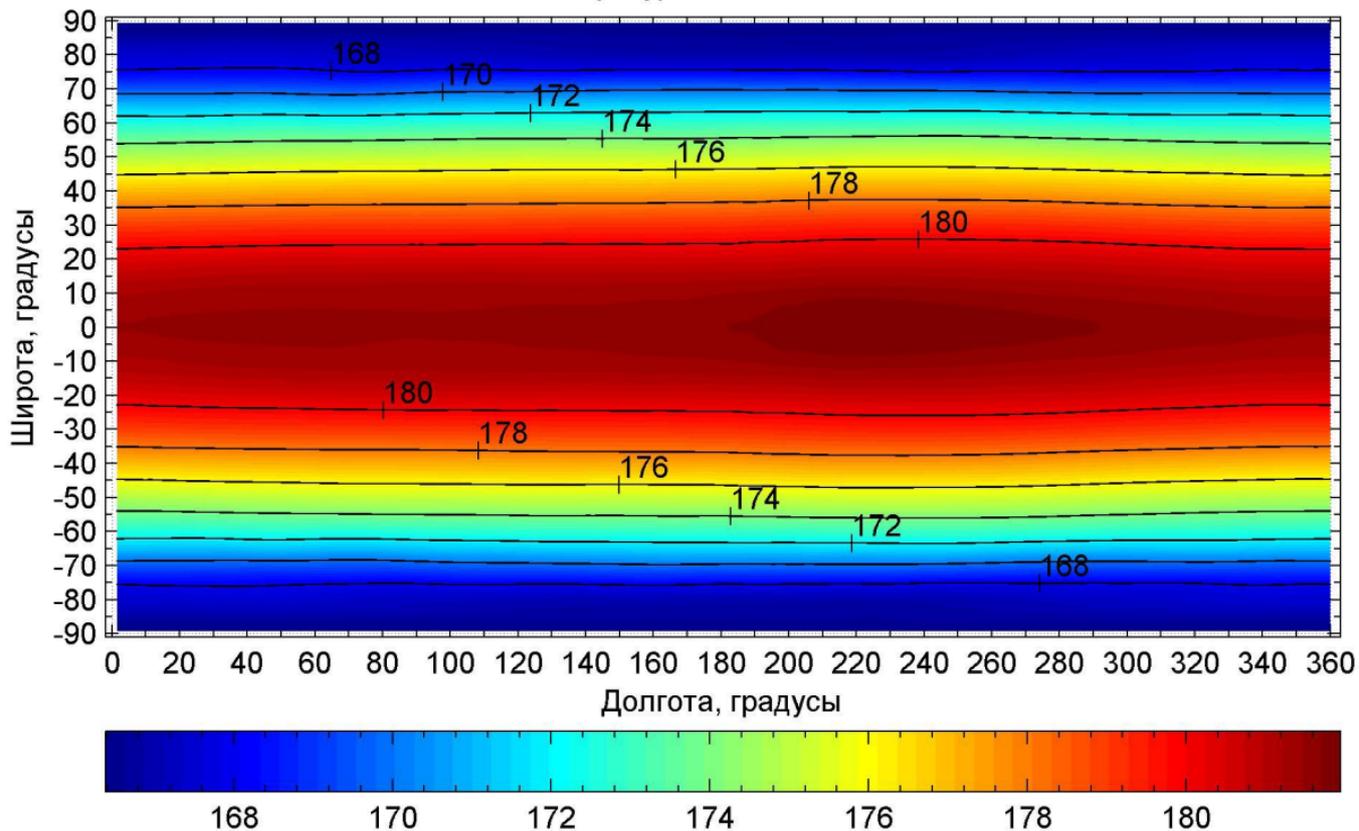
Температура на высоте 450 км



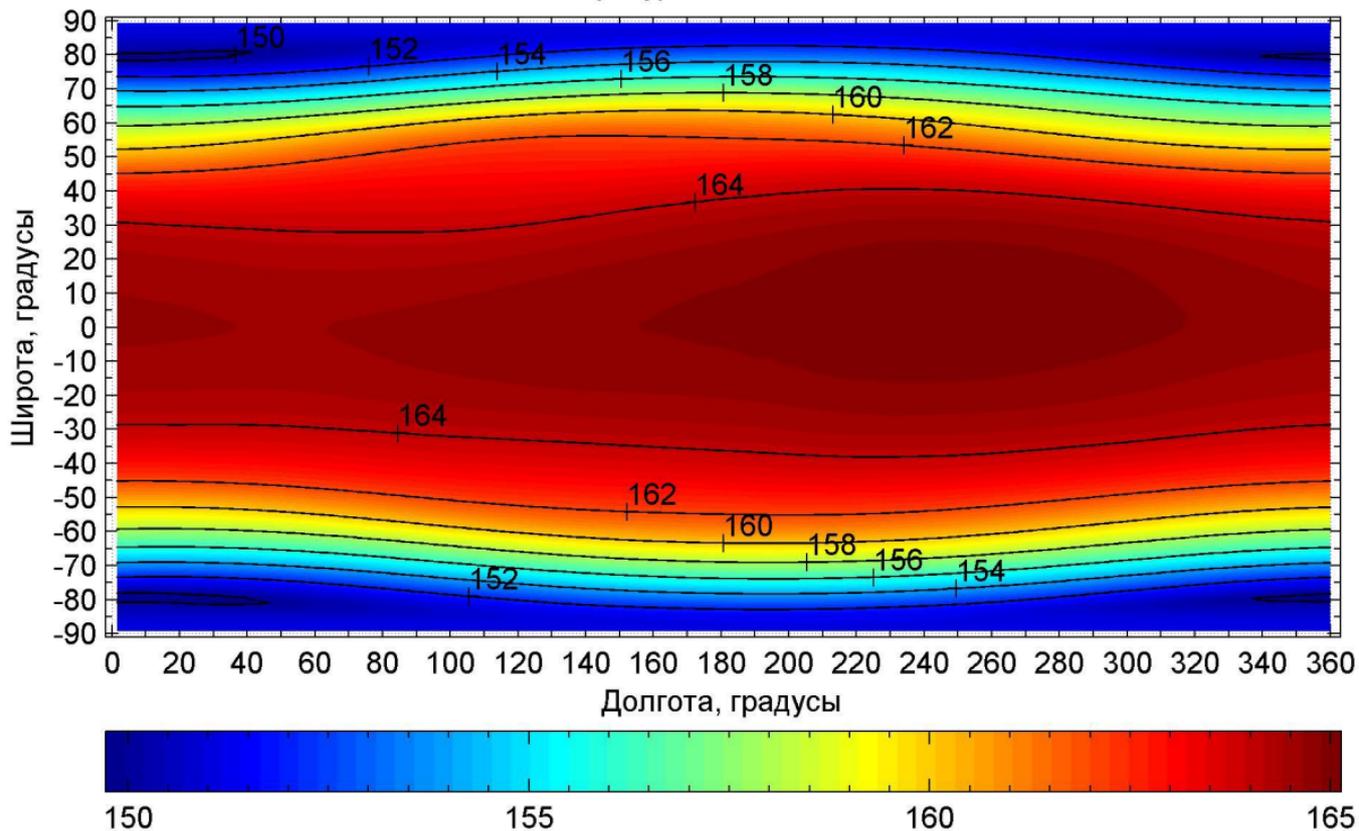
Температура на высоте 350 км



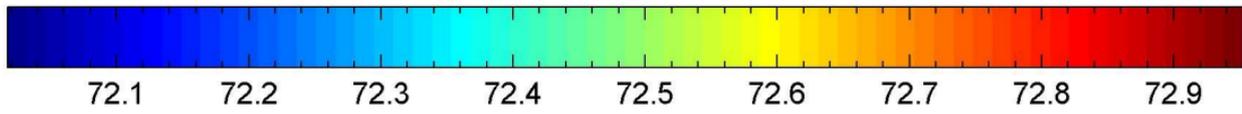
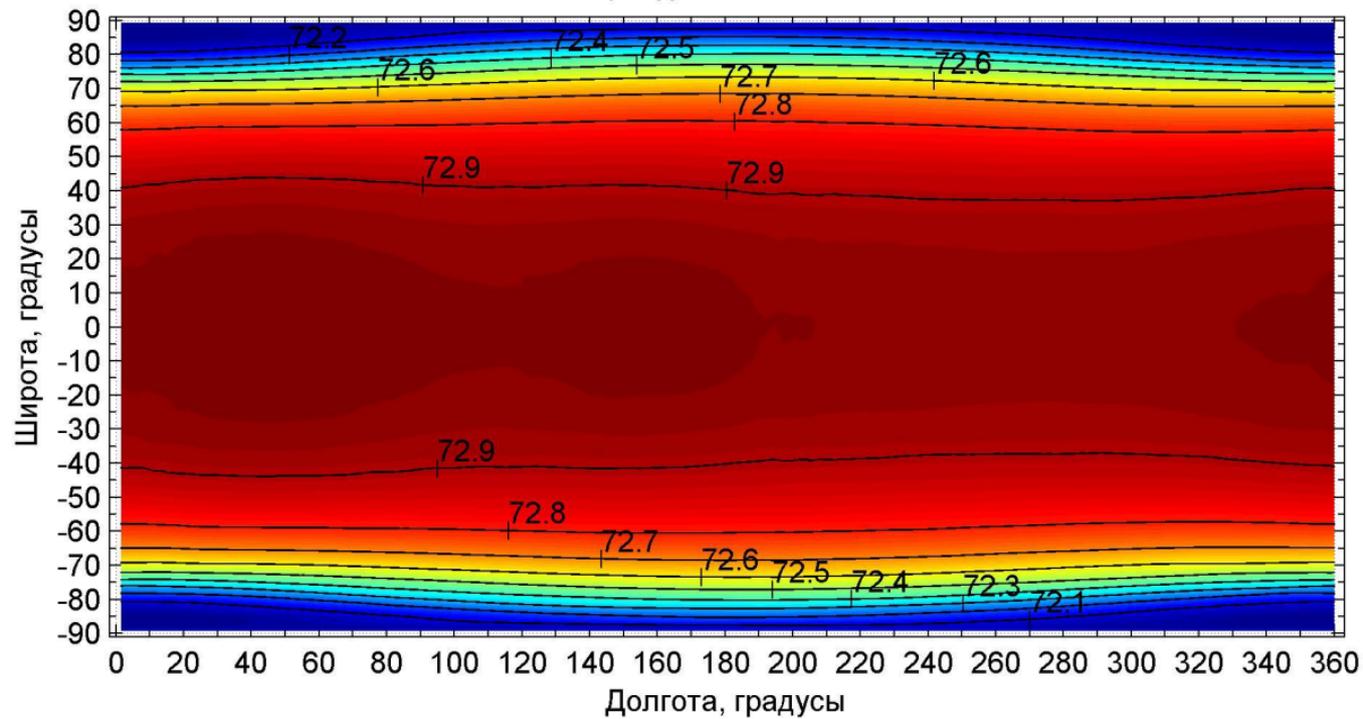
Температура на высоте 350 км



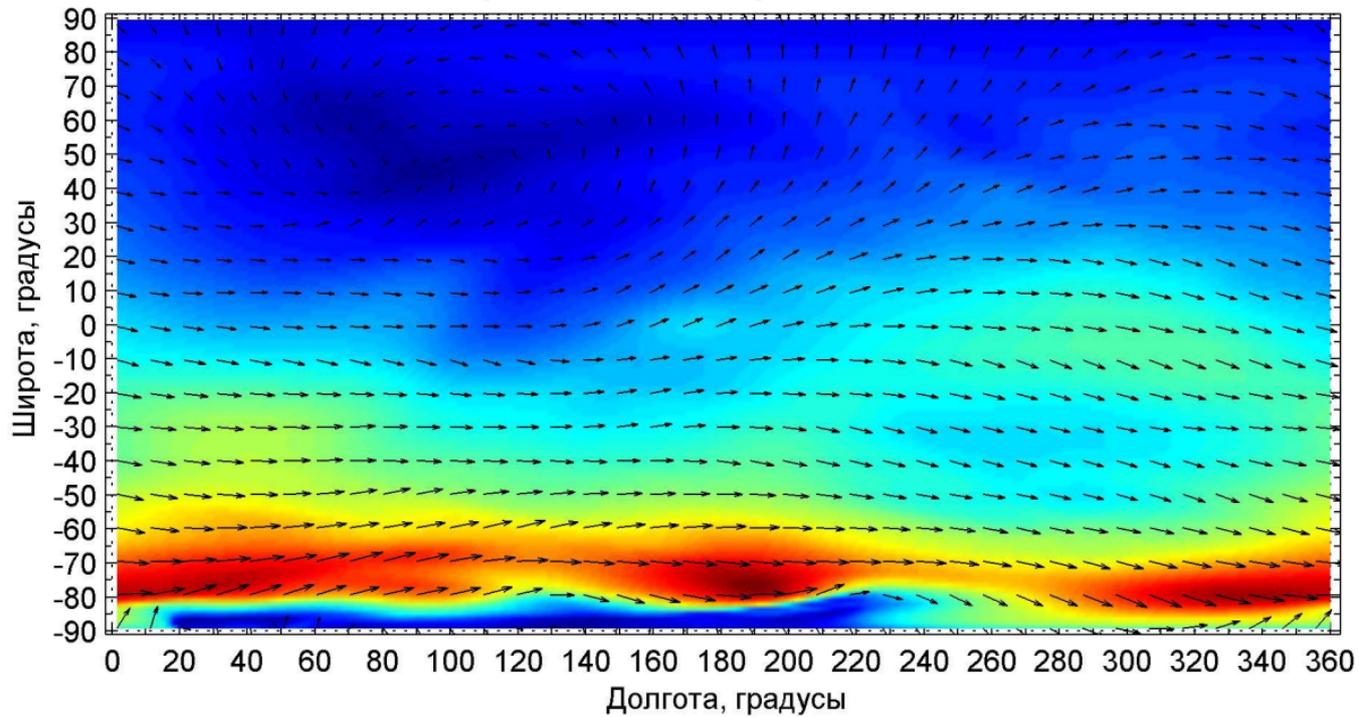
Температура на высоте 150 км



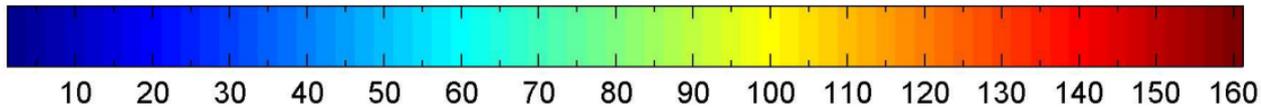
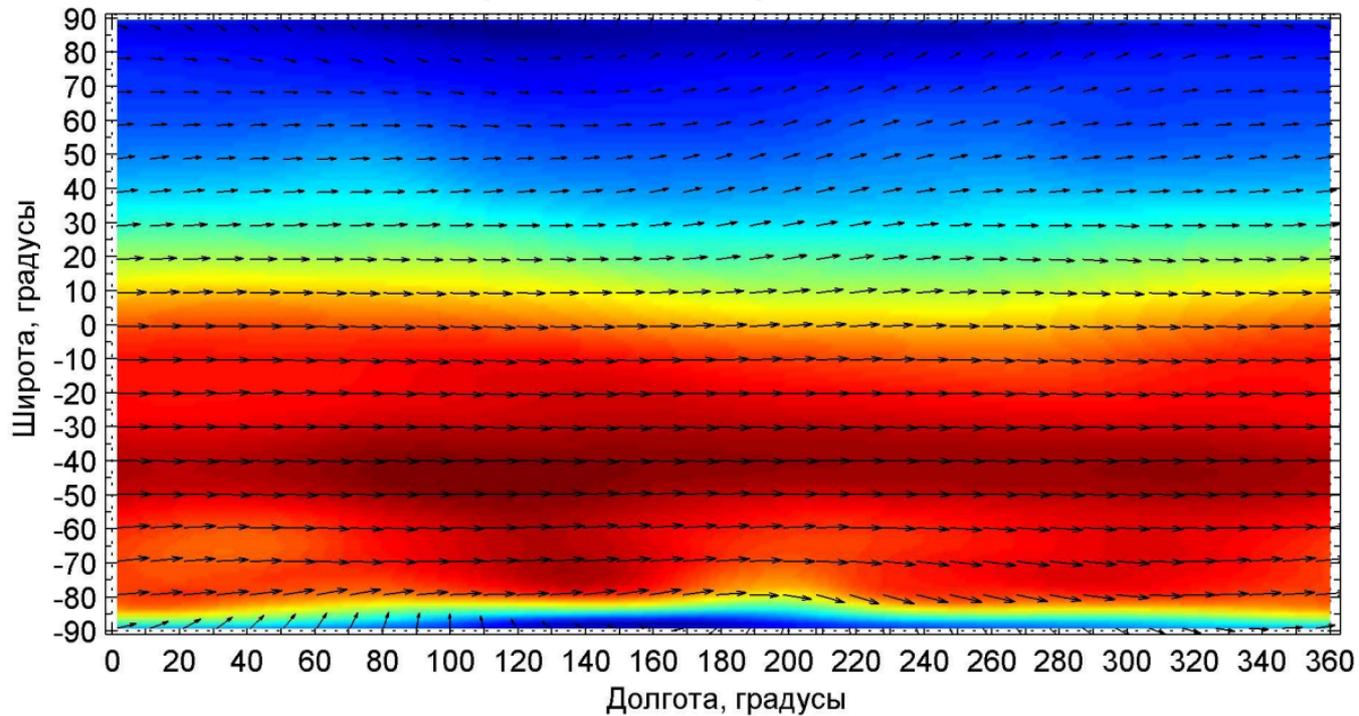
Температура на высоте 50 км



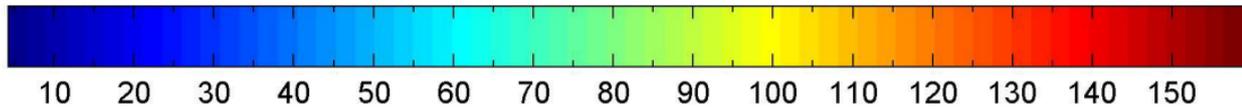
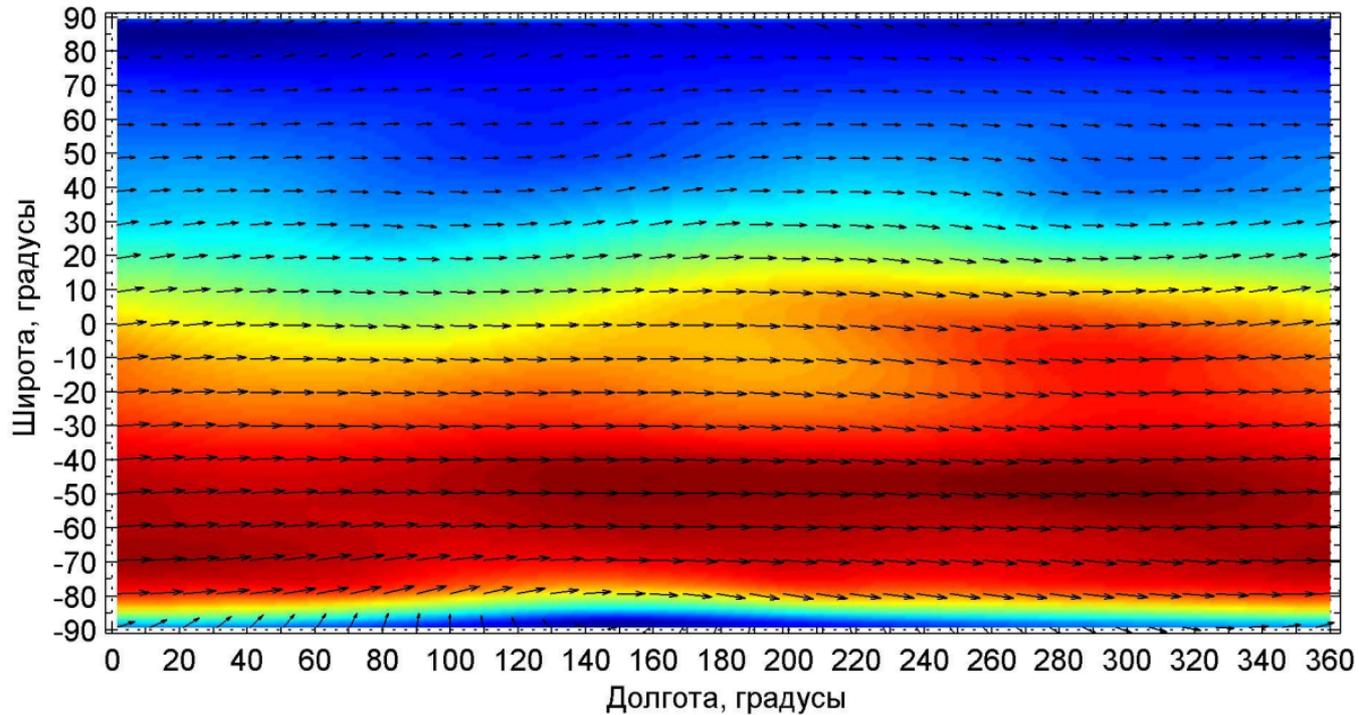
Горизонтальный ветер на высоте 550 км



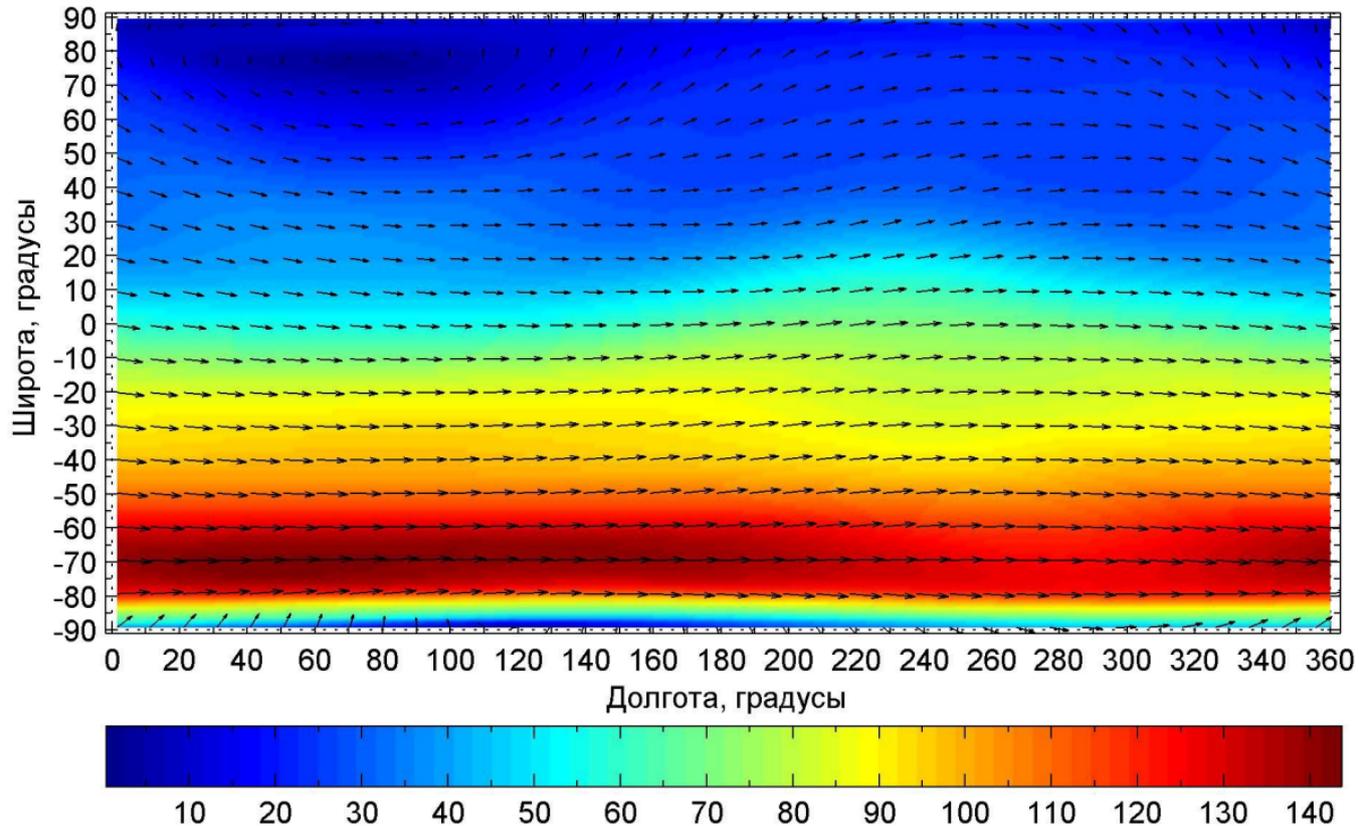
Горизонтальный ветер на высоте 450 км



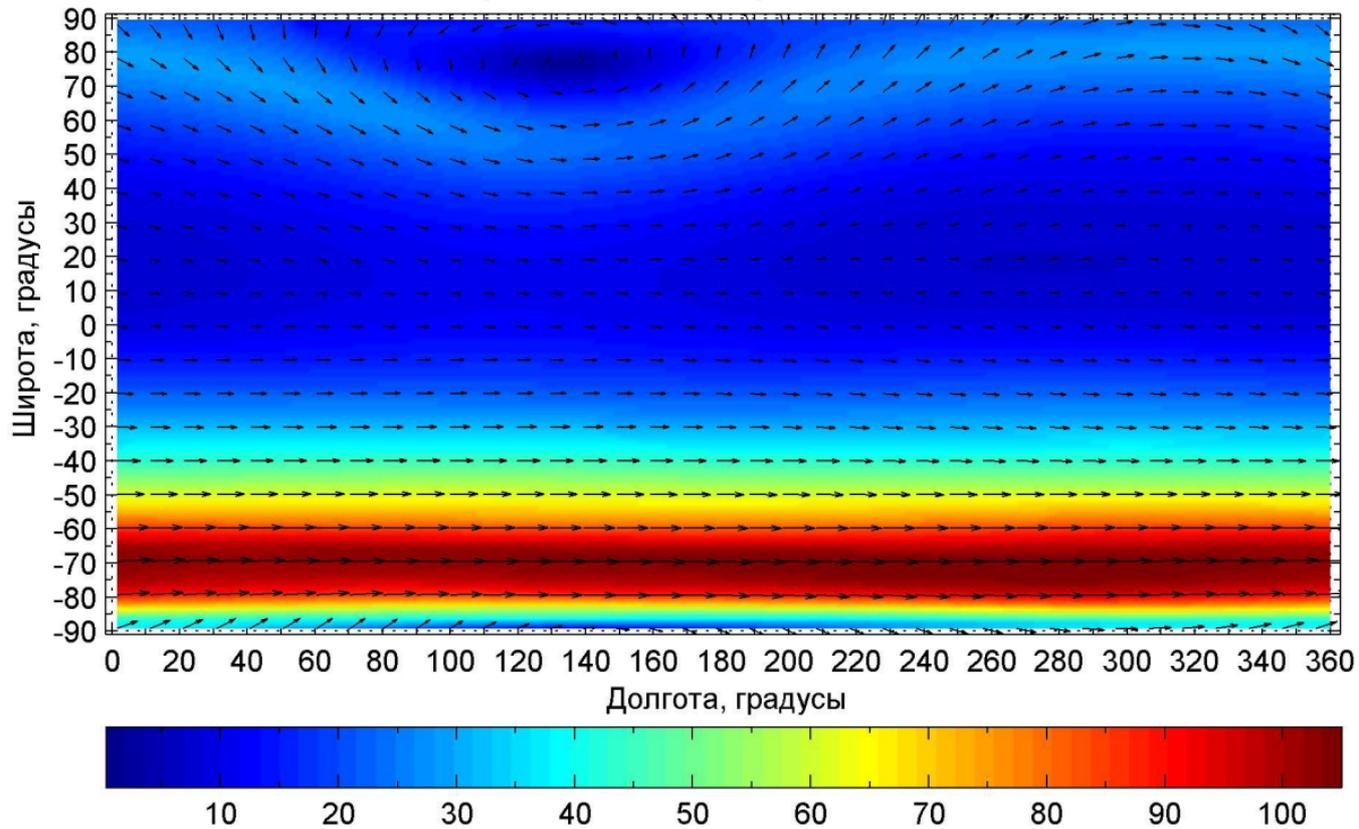
Горизонтальный ветер на высоте 350 км



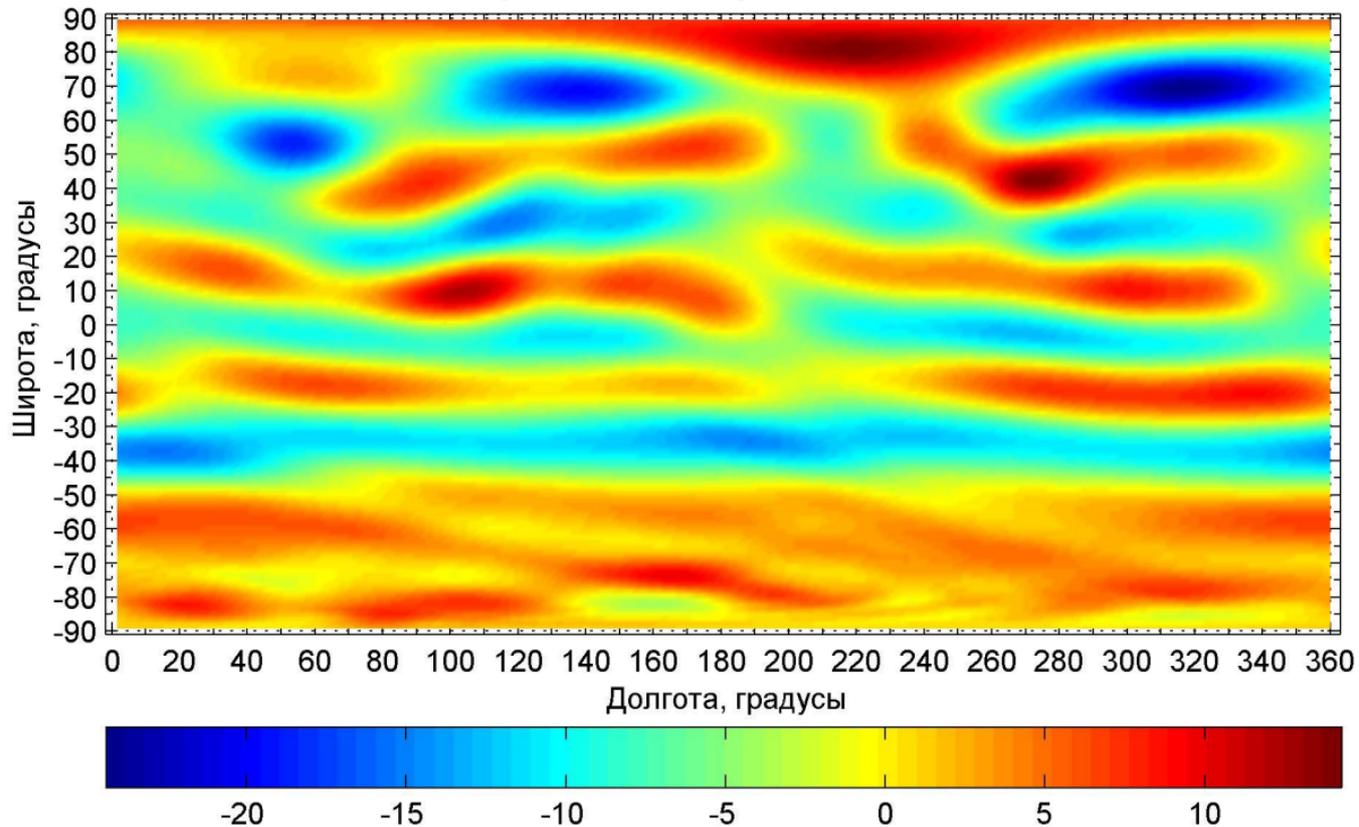
Горизонтальный ветер на высоте 250 км



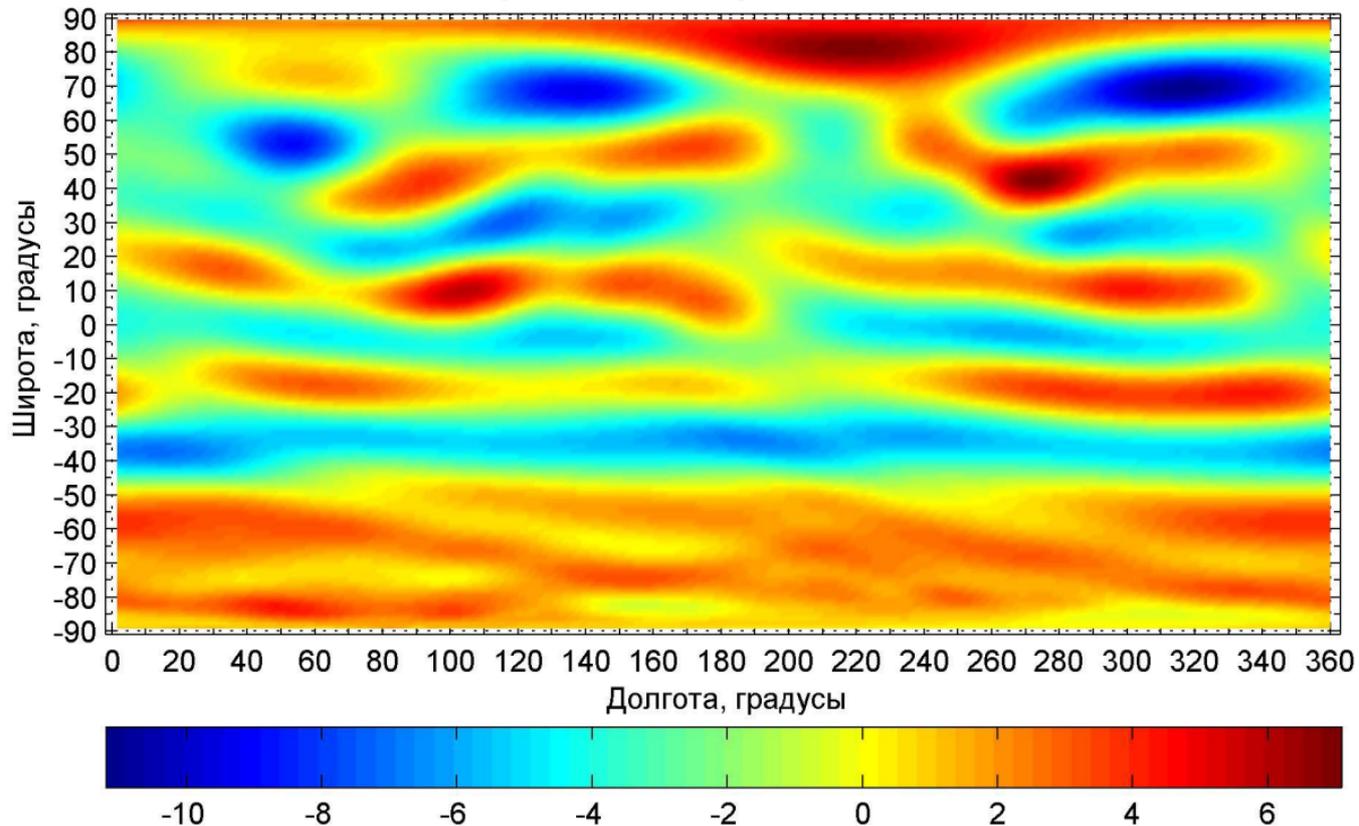
Горизонтальный ветер на высоте 150 км



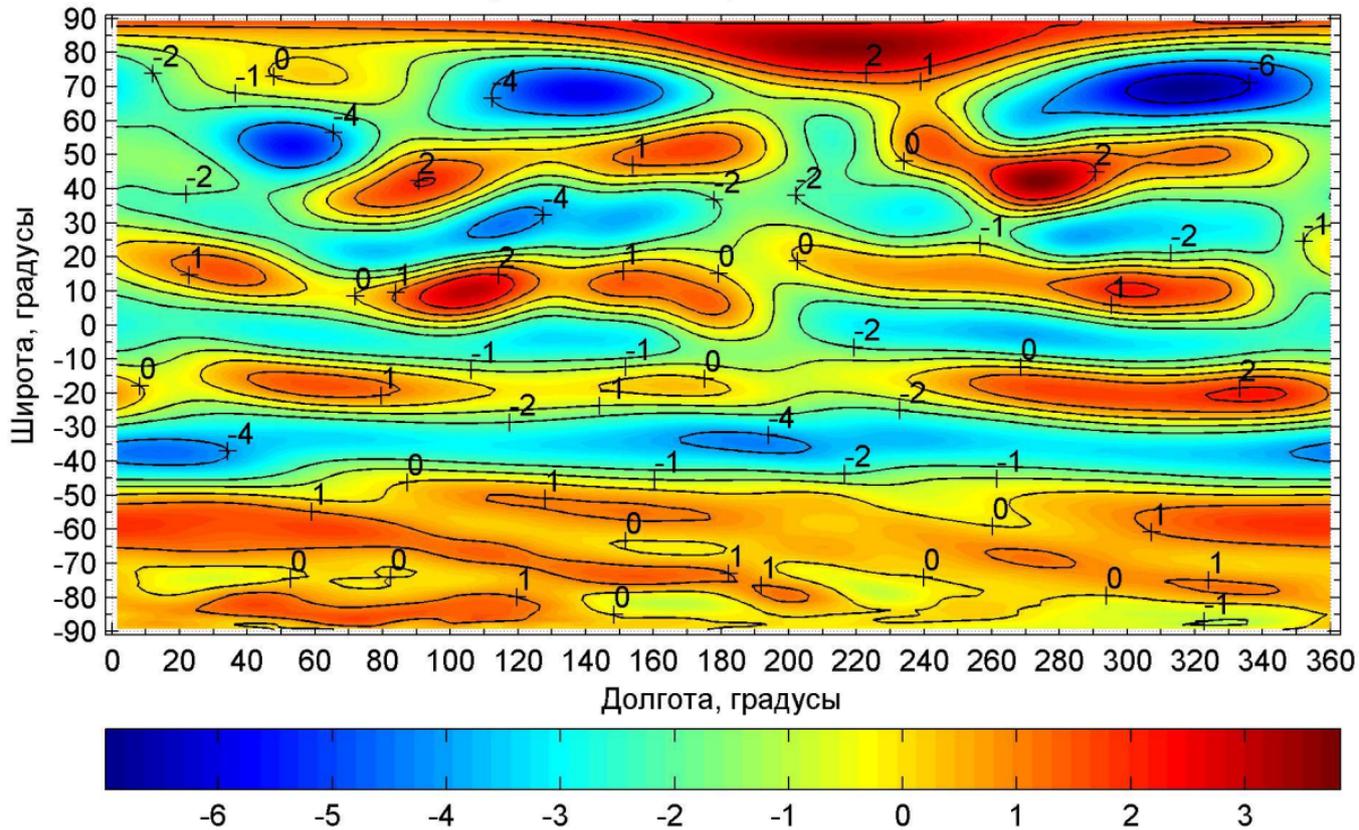
Вертикальный ветер на высоте 450 км



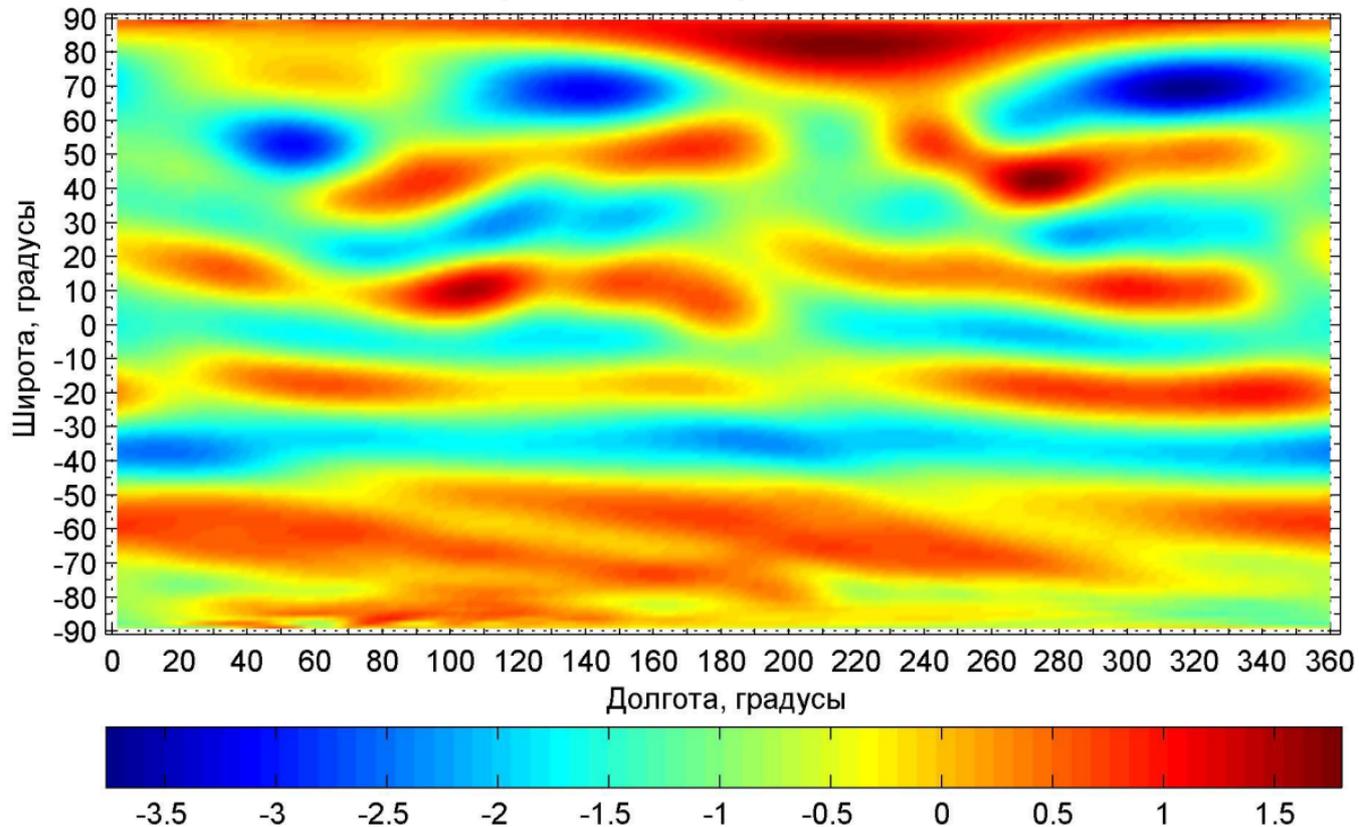
Вертикальный ветер на высоте 350 км



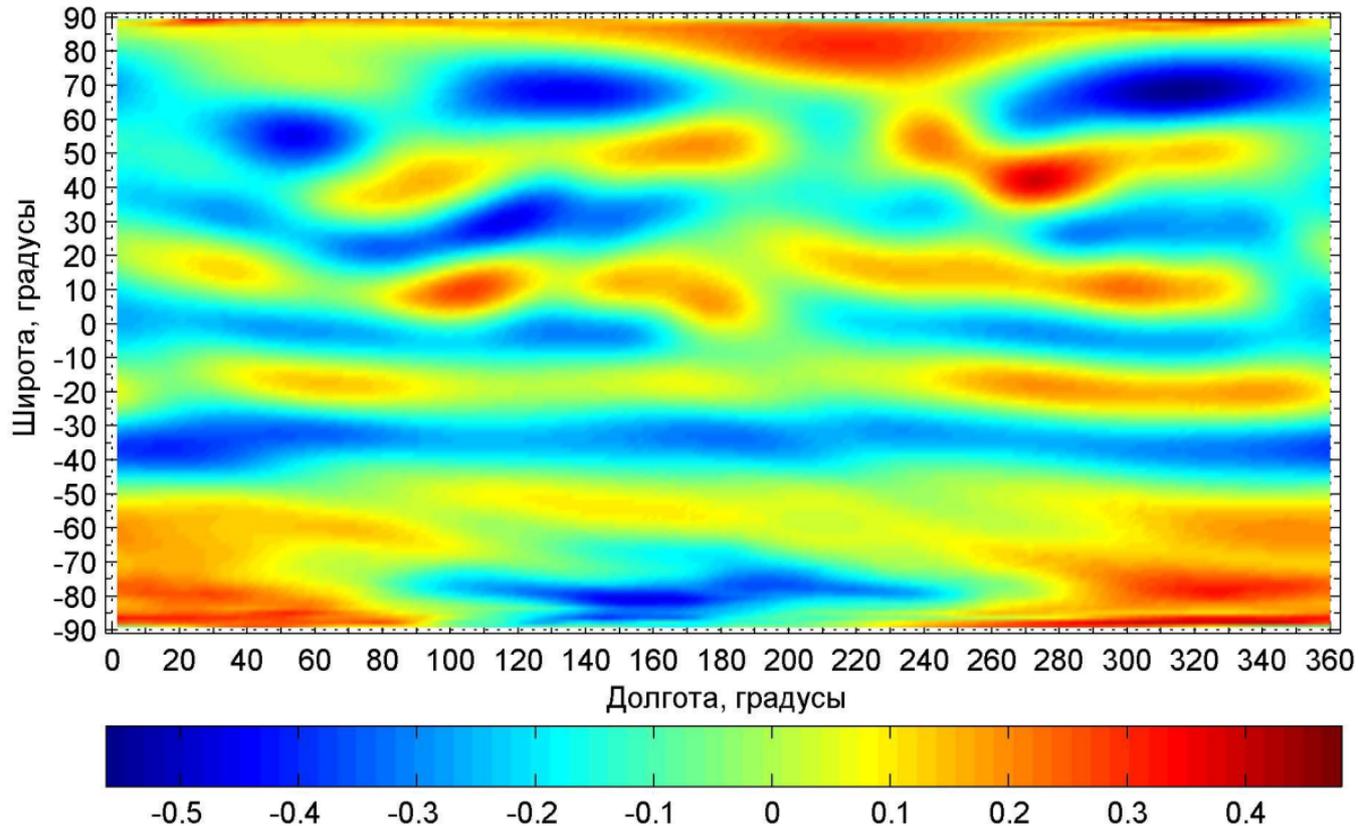
Вертикальный ветер на высоте 300 км



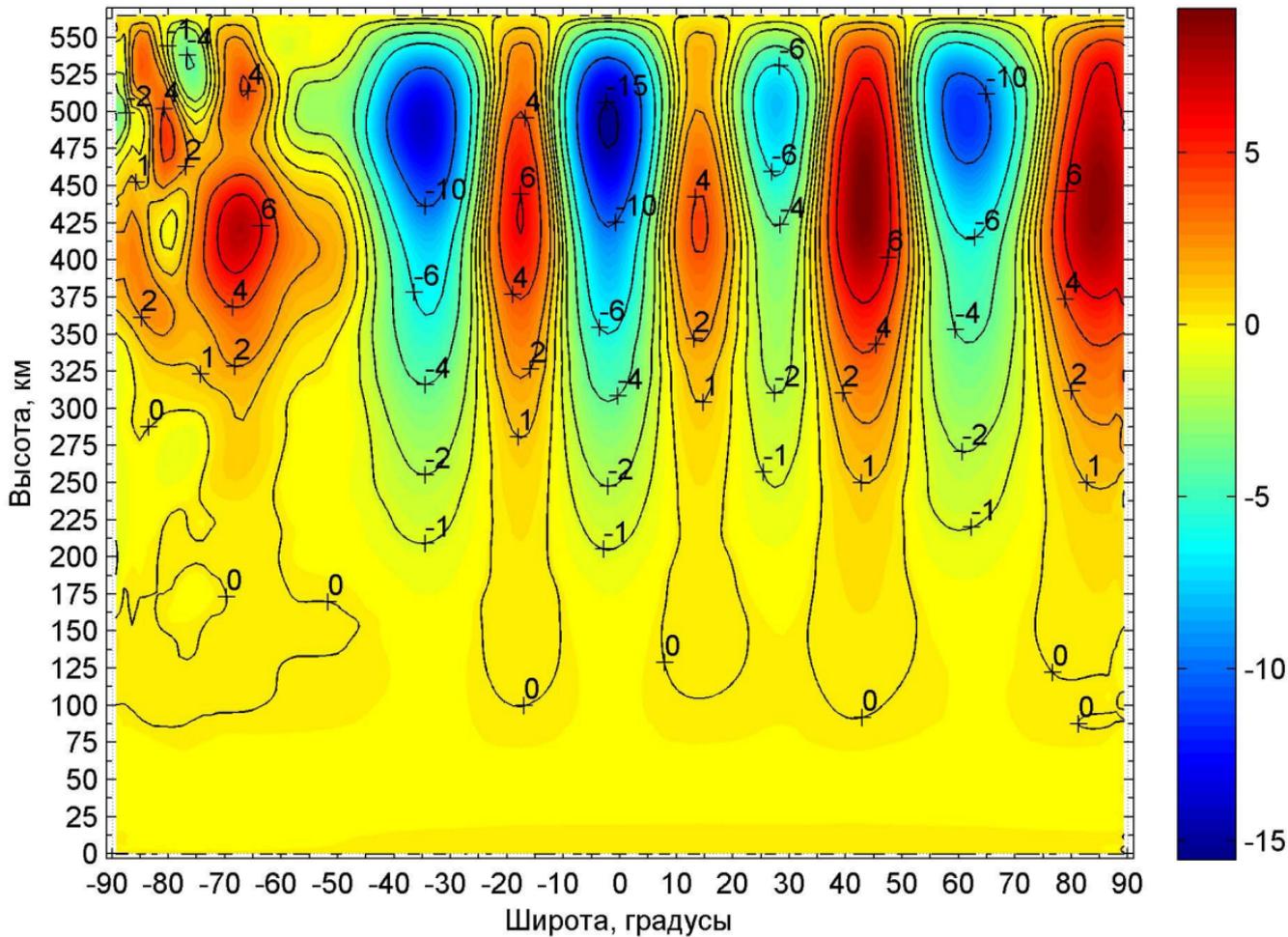
Вертикальный ветер на высоте 250 км



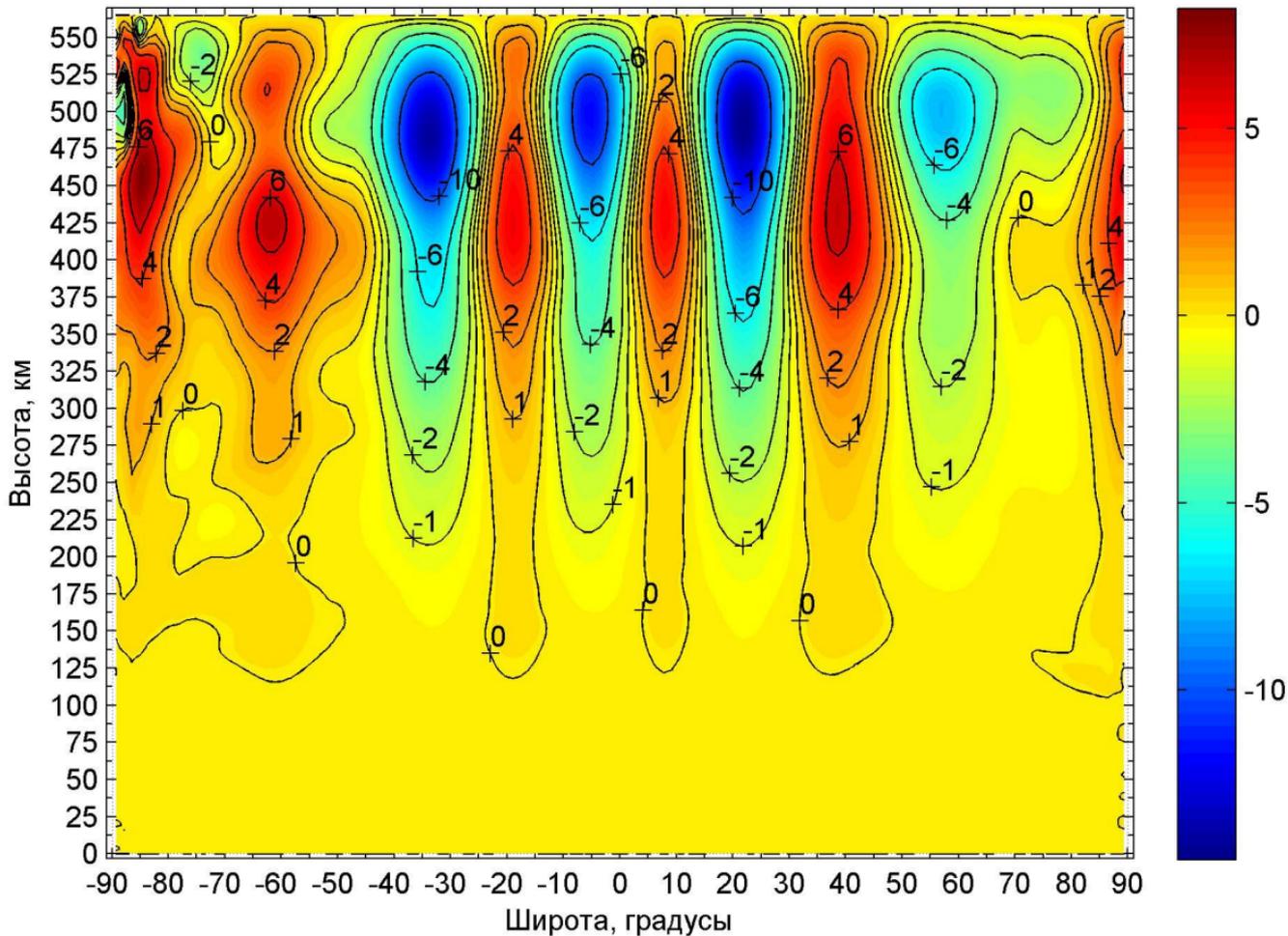
Вертикальный ветер на высоте 150 км



Вертикальный ветер вблизи вечернего терминатора



Вертикальный ветер вблизи утреннего терминатора



Зональный ветер вблизи утреннего терминатора

