

Механизм формирования полярных циклонов и возможность их предсказания по данным спутниковых наблюдений

Мингалев И.В.⁽¹⁾, Орлов К.Г.⁽¹⁾, Мингалев В.С.⁽¹⁾

(1) *Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской обл.,
E-mail: mingalev_i@pgia.ru.*

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ
№ 10-01-00451.

При помощи численного моделирования исследуются механизмы формирования циклонических возмущений в области внутритропической зоны конвергенции.

Для моделирования использовалась 3-мерная модель циркуляции атмосферы в области, которая является частью шарового слоя над ограниченным участком земной поверхности. Модель основана на решении полной системы уравнений газовой динамики и имеет разрешение по высоте 200 м, а по горизонту 0.08 градуса.

В созданной модели учитываются процессы нагрева-охлаждения воздуха за счет поглощения-испускания инфракрасного излучения, а также за счет фазовых переходов водяного пара в микрокапли воды и частицы льда, которые играют важную роль. Также учитывается оседание микрокапель воды и частиц льда в поле силы тяжести.

Описание модели

- атмосферный газ рассматривается как смесь воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли двух видов: микро капли воды и микрочастиц льда.
- Считаем частицы аэрозолей сферами радиусов 0.1 мм и 0.03 мм, соответственно, движущимися относительно смеси воздуха и водяного пара со скоростями осаждения
- Температуру смеси и частиц аэрозолей считаем одинаковой
- Считаем, что аэрозоль из капель воды может присутствовать только при насыщенности водяного пара и температуре не ниже 273.15 К
- аэрозоль из частиц льда может присутствовать только при насыщенности водяного пара и температуре не выше 273.15 К
- При температуре среды 273.15 К эта температура не может увеличиться, пока не расплавятся все частицы льда, и не может уменьшиться, пока не замерзнут все капли воды.

Зависимость плотности насыщенного пара от температуры задается по формулам :

$$\rho_{\text{п}}^{\text{max}}(T) = \left(T/T_0\right)^a \exp\left(b(T - T_0)/(T T_0)\right) p_0^{\text{max}} / (R_{\text{п}} T)$$

$$\text{при } T \geq T_0 \quad a = (3/2 - C_{\text{вод}}/R_{\text{п}}) ,$$

$$b = \left(q_{\text{исп}}^0 - T_0 (3 R_{\text{п}}/2 - C_{\text{вод}})\right) / R_{\text{п}}$$

$$\text{при } T < T_0 \quad a = (3/2 - C_{\text{л}}/R_{\text{п}}) ,$$

$$b = \left(q_{\text{исп}}^0 + q_{\text{пл}} - T_0 (3 R_{\text{п}}/2 - C_{\text{л}})\right) / R_{\text{п}}$$

В модели в каждом узле расчетной сетки вычисляются: температура, плотности воздуха и водяного пара, гидродинамическая скорость смеси, общая масса в единице объема соответственно, водяных капель и микрочастиц льда.

Система уравнений

$$\frac{\partial \rho_{\text{ВОЗ}}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{ВОЗ}} \mathbf{v}) = 0 ,$$

$$\frac{\partial (\rho_{\text{П}} + \rho_{\text{ВОД}} + \rho_{\text{Л}})}{\partial t} + \text{div} \left(\rho_{\text{П}} \mathbf{v} + \rho_{\text{ВОД}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{ВОД}}^{\text{OC}}) + \rho_{\text{Л}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{Л}}^{\text{OC}}) \right) = 0 ,$$

$$\frac{\partial (\rho_{\text{СМ}} \mathbf{v})}{\partial t} + \text{div}(\rho_{\text{СМ}} \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = \left(-\nabla p + \text{div} \hat{\mathcal{T}} \right) + (\rho_{\text{СМ}} + \rho_{\text{ВОД}} + \rho_{\text{Л}}) \mathbf{F} ,$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial W}{\partial t} + \text{div} \left(W_{\text{СМ}} \mathbf{v} + W_{\text{ВОД}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{ВОД}}^{\text{OC}}) + W_{\text{Л}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{Л}}^{\text{OC}}) \right) = \\ & = \left(\rho_{\text{СМ}} \mathbf{v} + \rho_{\text{ВОД}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{ВОД}}^{\text{OC}}) + \rho_{\text{Л}} (\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{Л}}^{\text{OC}}) , \mathbf{F} \right) + \text{div}(\hat{\mathcal{T}} \cdot \mathbf{v} - p \mathbf{v} - \mathbf{j}) + Q \end{aligned}$$

где обозначено: $\rho_{\text{СМ}} = \rho_{\text{ВОЗ}} + \rho_{\text{П}}$,

$p = (\rho_{\text{ВОЗ}} R_{\text{ВОЗ}} + \rho_{\text{П}} R_{\text{П}}) T$ — давление смеси,

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

где g_0 — ускорение силы тяжести на полюсах на поверхности Земли, \mathbf{r} — радиус-вектор от центра Земли до точки рассмотрения, r — его длина, r_3 — радиус Земли, $\boldsymbol{\Omega}$ — вектор угловой скорости вращения Земли. Тензор вязких напряжений $\hat{\mathcal{T}}$ задается с учетом турбулентного обмена как девиатор симметричного тензора \hat{D} по формулам

$$\hat{\mathcal{T}} = \hat{D} - \frac{1}{3} \hat{I} \text{Tr}(\hat{D}), \quad \hat{D} = \hat{\eta} (\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T \hat{\eta},$$

где \hat{I} — единичный тензор, $\text{Tr}(\hat{D})$ — след тензора \hat{D} , $\nabla \mathbf{v}$ — тензор градиента гидродинамической скорости, а $\hat{\eta}$ — симметричный тензор коэффициентов вязкости, который в географической системе координат является диагональным,

$$W = W_{\text{см}} + W_{\text{вод}} + W_{\text{л}}, \quad W_{\text{л}} = \rho_{\text{л}} \left((\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{л}}^{\text{oc}})^2 / 2 + C_{\text{л}} T \right),$$

$$W_{\text{вод}} = \rho_{\text{вод}} \left((\mathbf{v} + \mathbf{v}_{\text{вод}}^{\text{oc}})^2 / 2 + C_{\text{вод}} (T - T_0) + q_{\text{пл}} + C_{\text{л}} T_0 \right),$$

$$W_{\text{см}} = \rho_{\text{см}} \mathbf{v}^2 / 2 + 3p/2 + \rho_{\text{п}} \left(q_{\text{исп}}^0 + q_{\text{пл}} + C_{\text{л}} T_0 - 3R_{\text{п}} T_0 / 2 \right).$$

Коэффициенты турбулентного обмена зависят от шага сетки в направлении данного орта и задаются по формуле Ричардсона.

Область моделирования имеет размеры по высоте от поверхности Земли до высоты 15 км, по долготе 36 град., а по широте 25 град.

На нижней границе заданы условия:

- 1) прилипания и насыщенности воздуха водяным паром
- 2) задан поток тепла, пропорциональный разности температур воздуха и поверхности воды,
- 3) задан восходящий поток теплового излучения, пропорциональный 4-й степени температуры поверхности.

На верхней границе заданы

- 1) условие проскальзывания для горизонтальных компонент скорости
- 2) условие непротекания для ее вертикальной компоненты;
- 3) условие равенства нулю производной по высоте от вертикальной компоненты вектора потока тепла
- 4) нисходящий поток теплового излучения.

На **северной и южной вертикальных границах** области моделирования значения всех трех компонент скорости ветра считаются заданными, причем вертикальная компонента равна нулю, а меридиональная компонента на высотах ниже 2.5 км направлена внутрь области моделирования, а выше 2.5 км для этой компоненты задано нулевое значение ее производной по широте.

Температура воздуха на этих границах также считается заданной. Плотность воздуха рассчитывается с использованием условия нулевого потока массы вдоль нормали через границу.

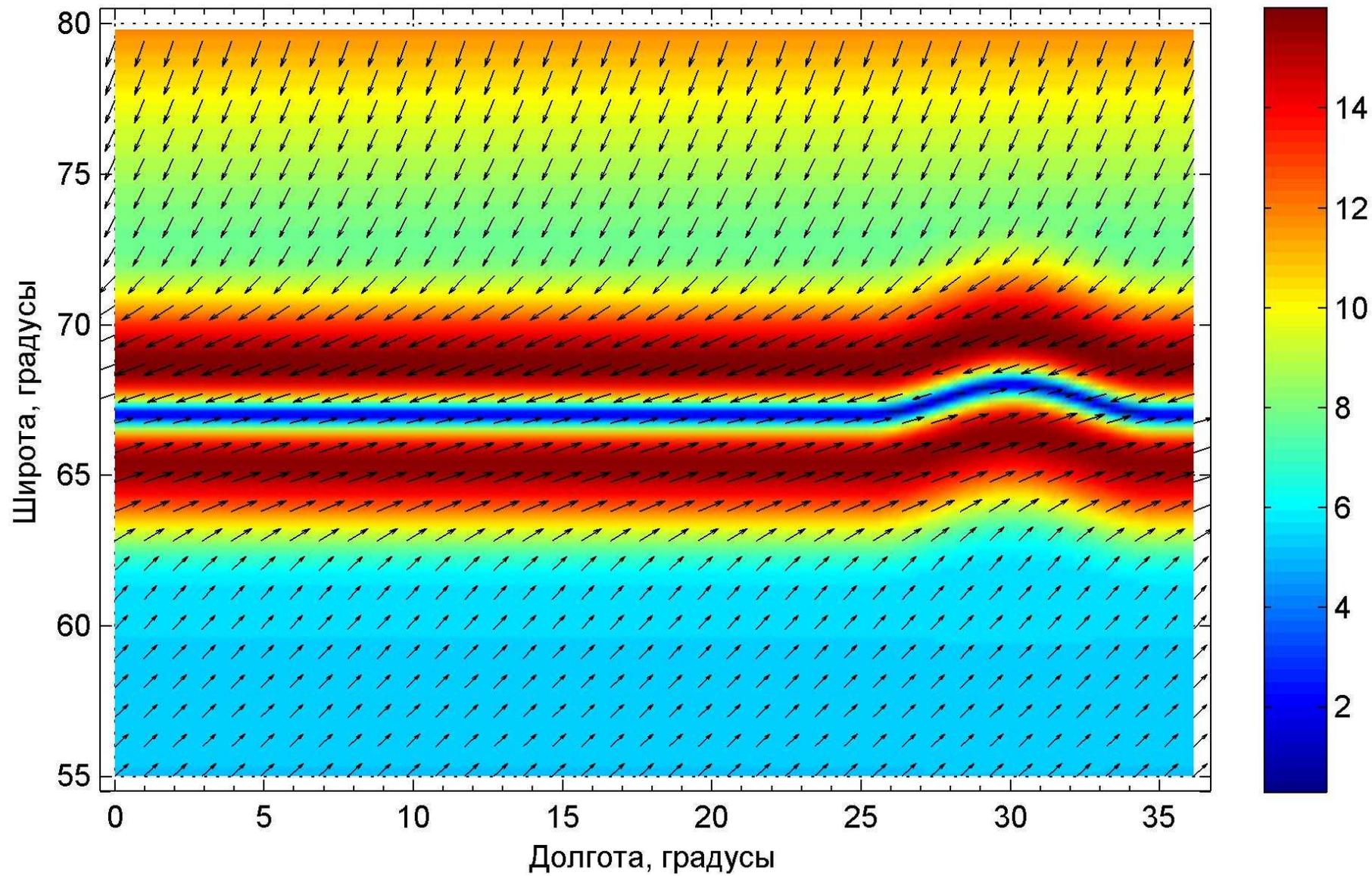
На **западной границе** задаются нулевые значения производной вдоль нормали к границе от всех переменных.

На **восточной границе** заданы все компоненты скорости ветра, температура, плотность воздуха и содержание в нем водяного пара, а также нулевое содержание микрокапель воды и частиц льда.

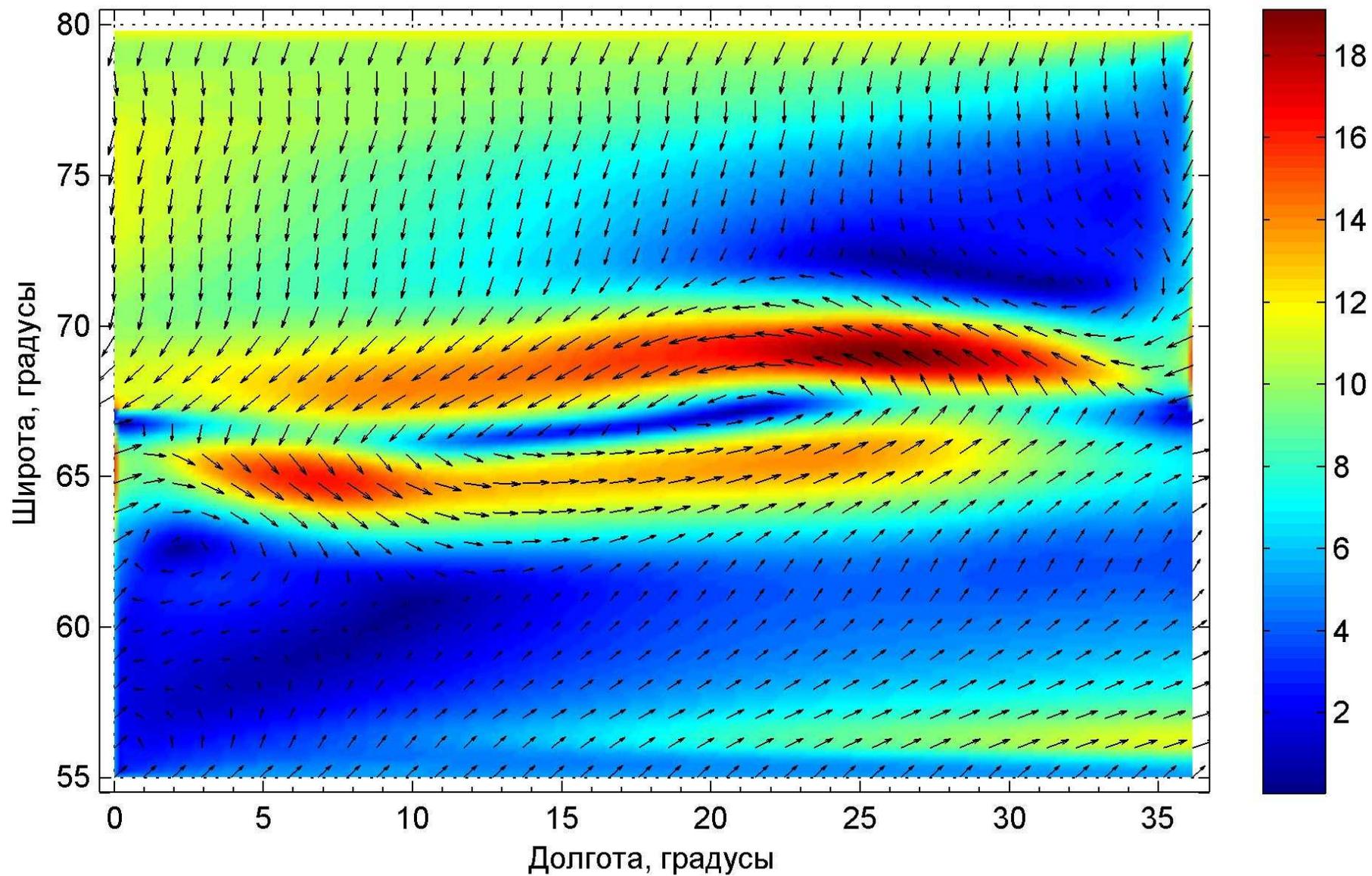
Заданные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе арктического фронта. Зональная компонента ветра к северу от фронта направлена на запад и увеличивается при приближении к фронту. Меридиональная компонента направлена к центру фронта на высотах менее 2.5 км и направлена от центра фронта на высотах более 2.5 км. Плотность воздуха удовлетворяет условию гидростатического равновесия. Вертикальная компонента ветра определяется из уравнения неразрывности. Вне центральной области фронта она равна нулю, а над этой областью направлена вверх, достигая максимальных значений над центром фронта.

Начальные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе ВЗК и задаются также как на восточной границе, являясь продолжением граничных условий внутрь области моделирования. При этом ВЗК задавалась с изгибами, размер и форма которых соответствовали данным спутниковых наблюдений.

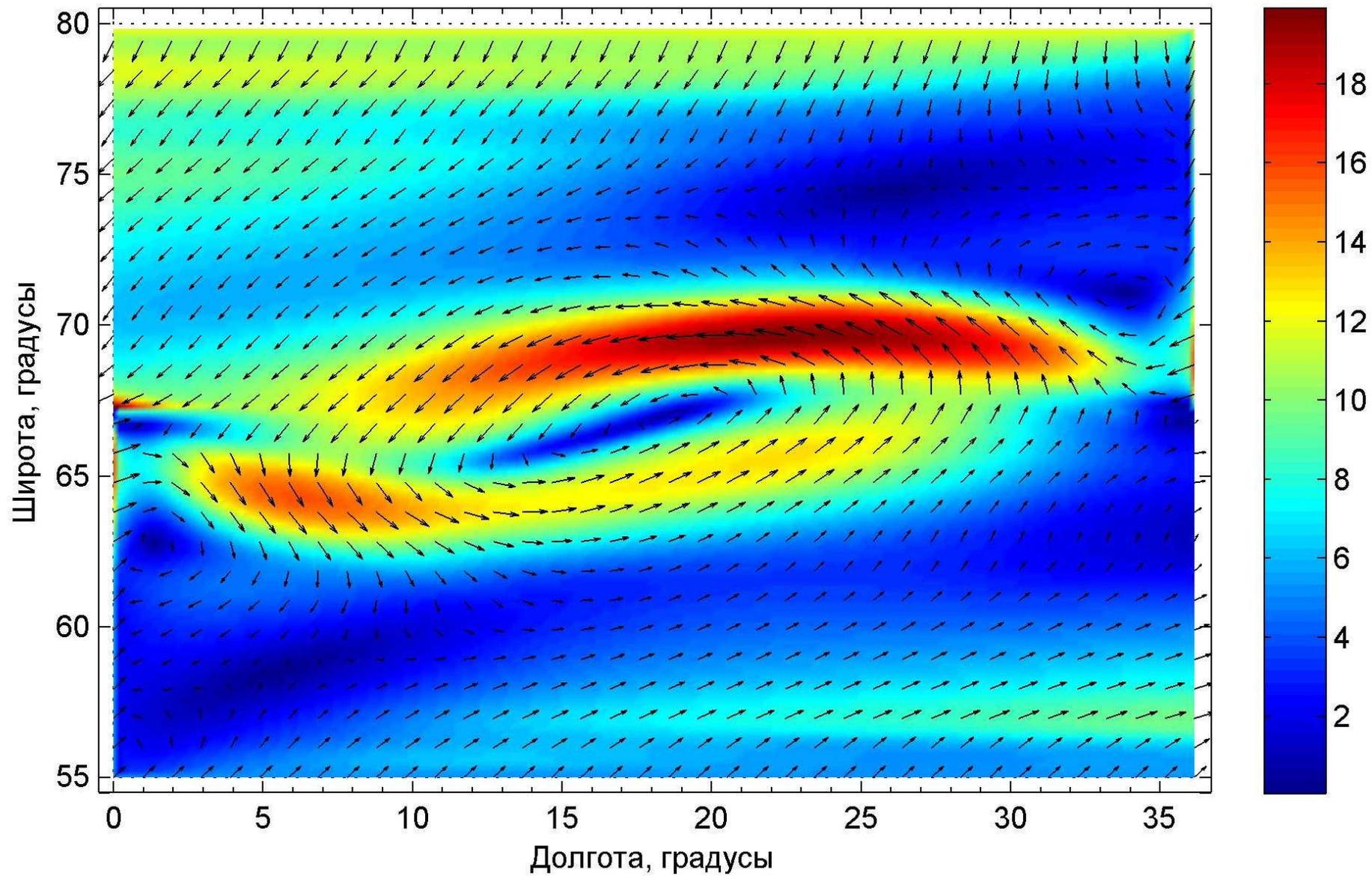
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км в начальный момент



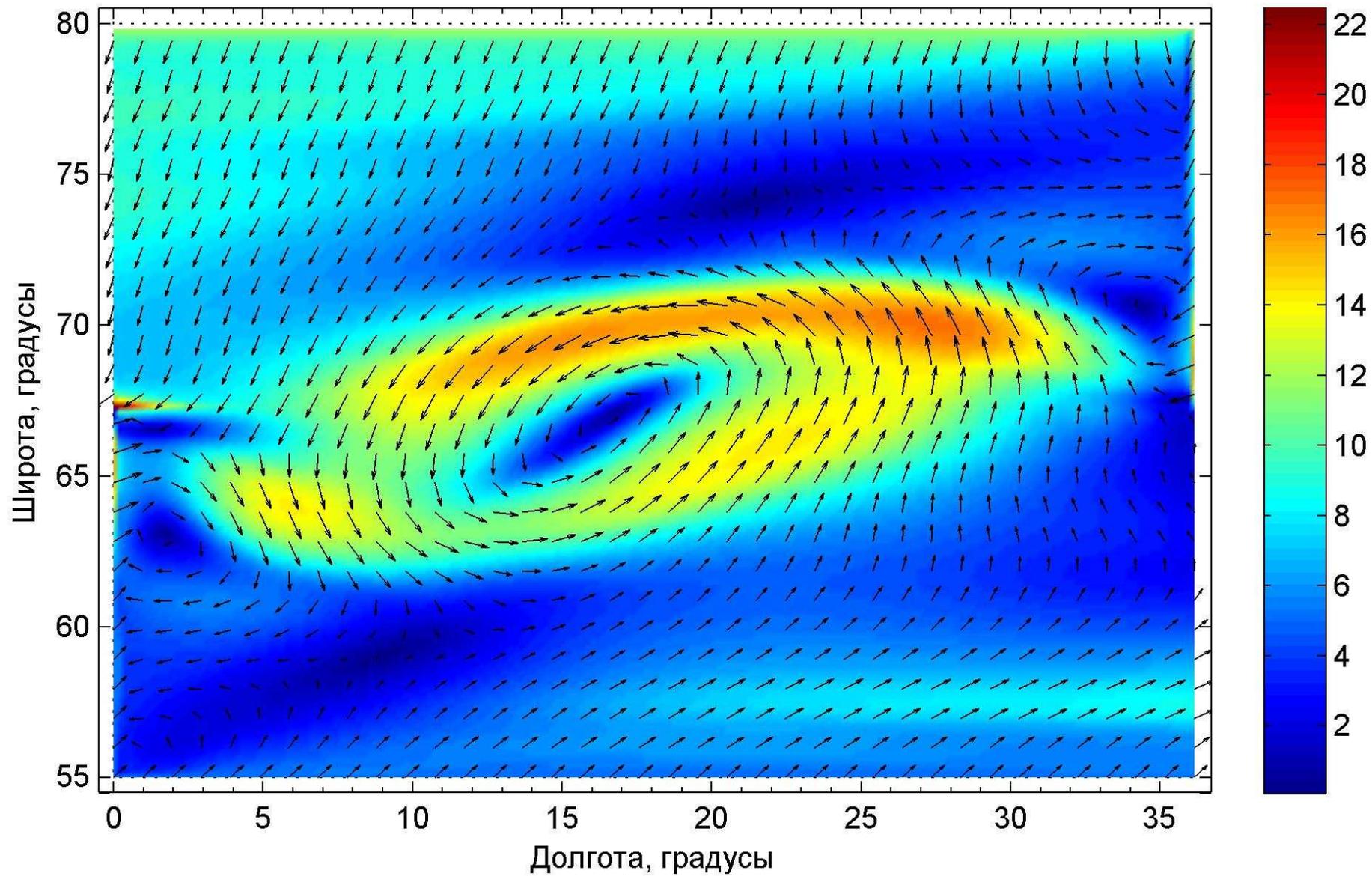
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 10 часов



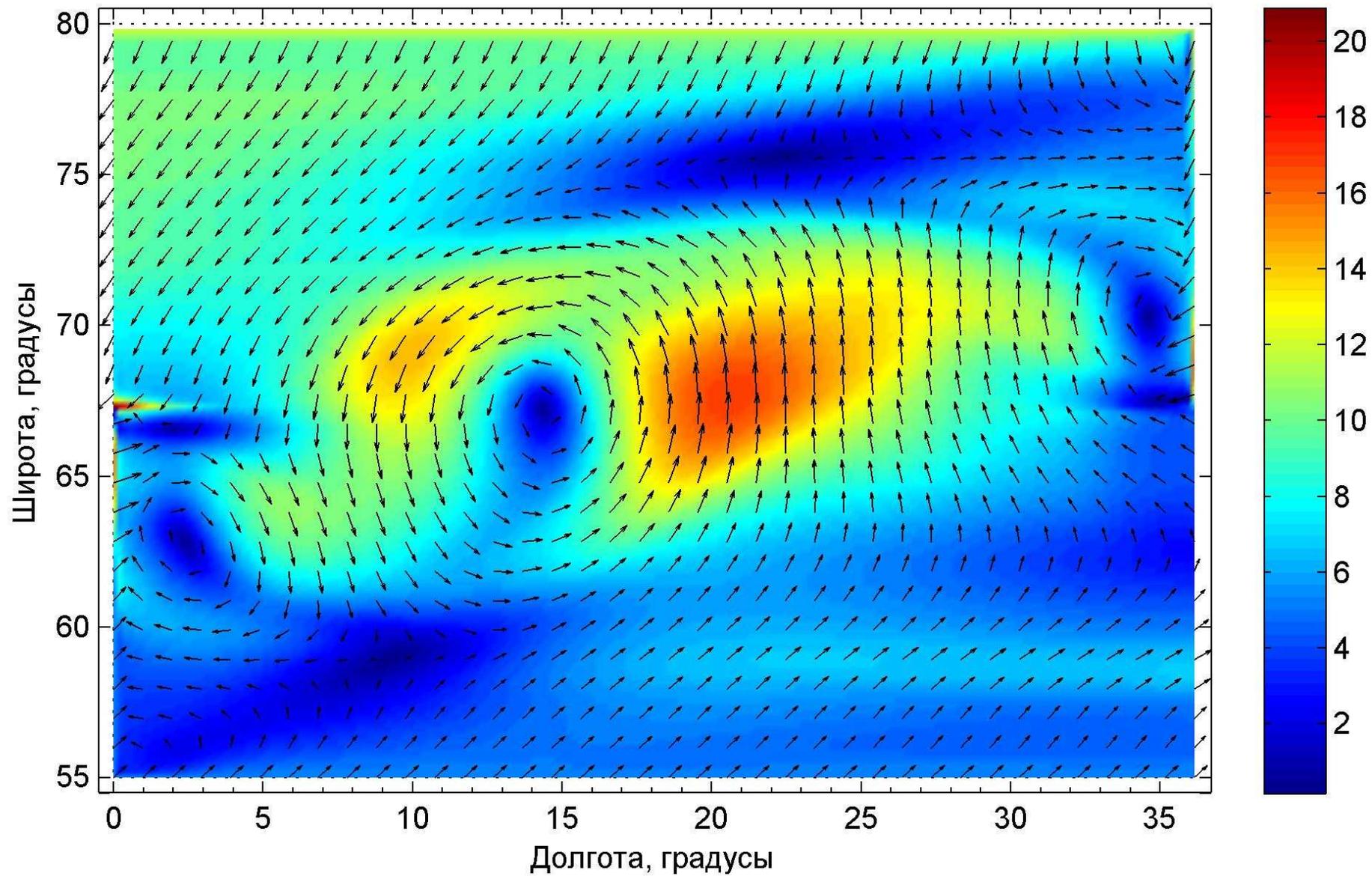
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 15 часов



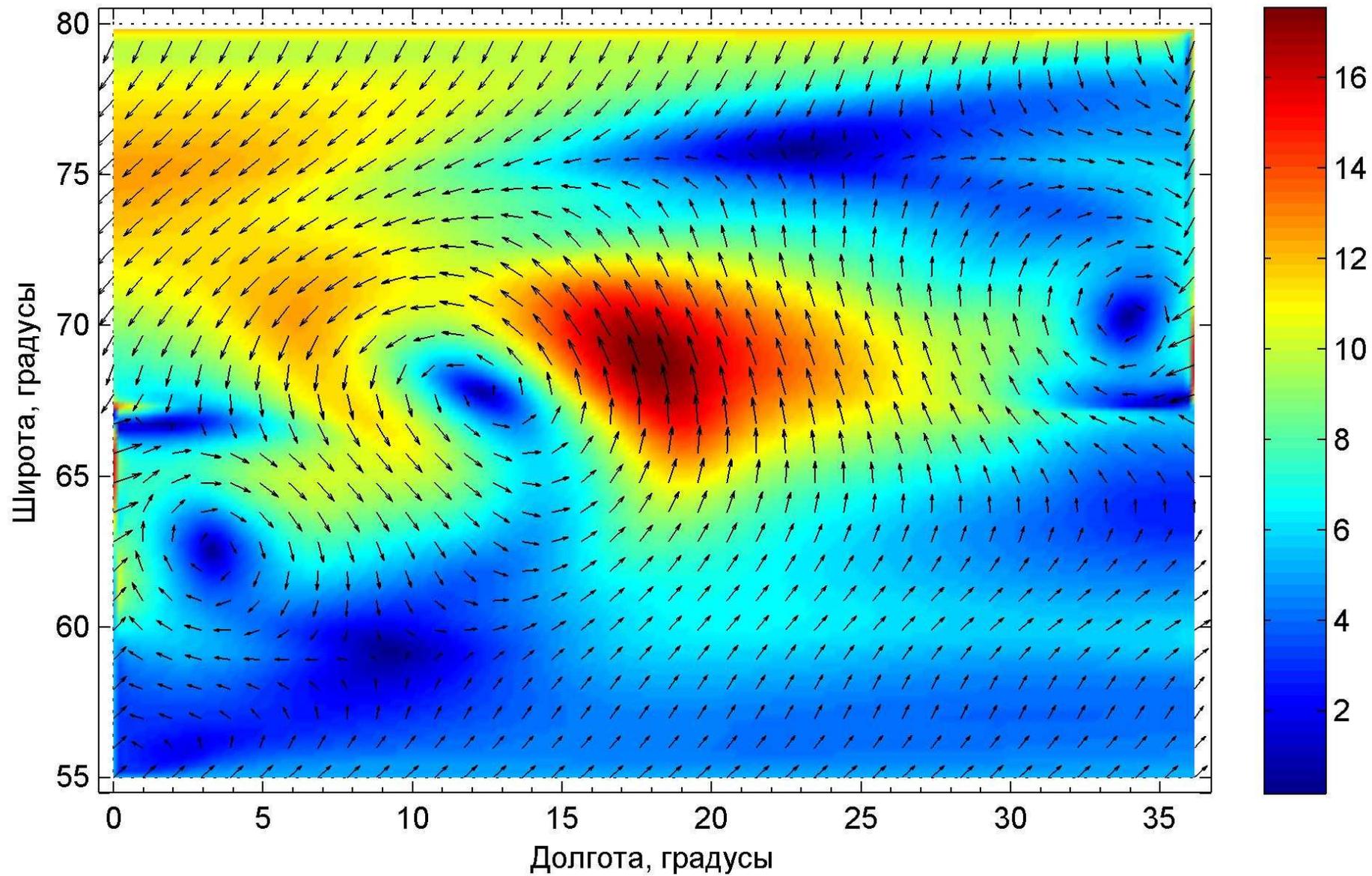
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 20 часов



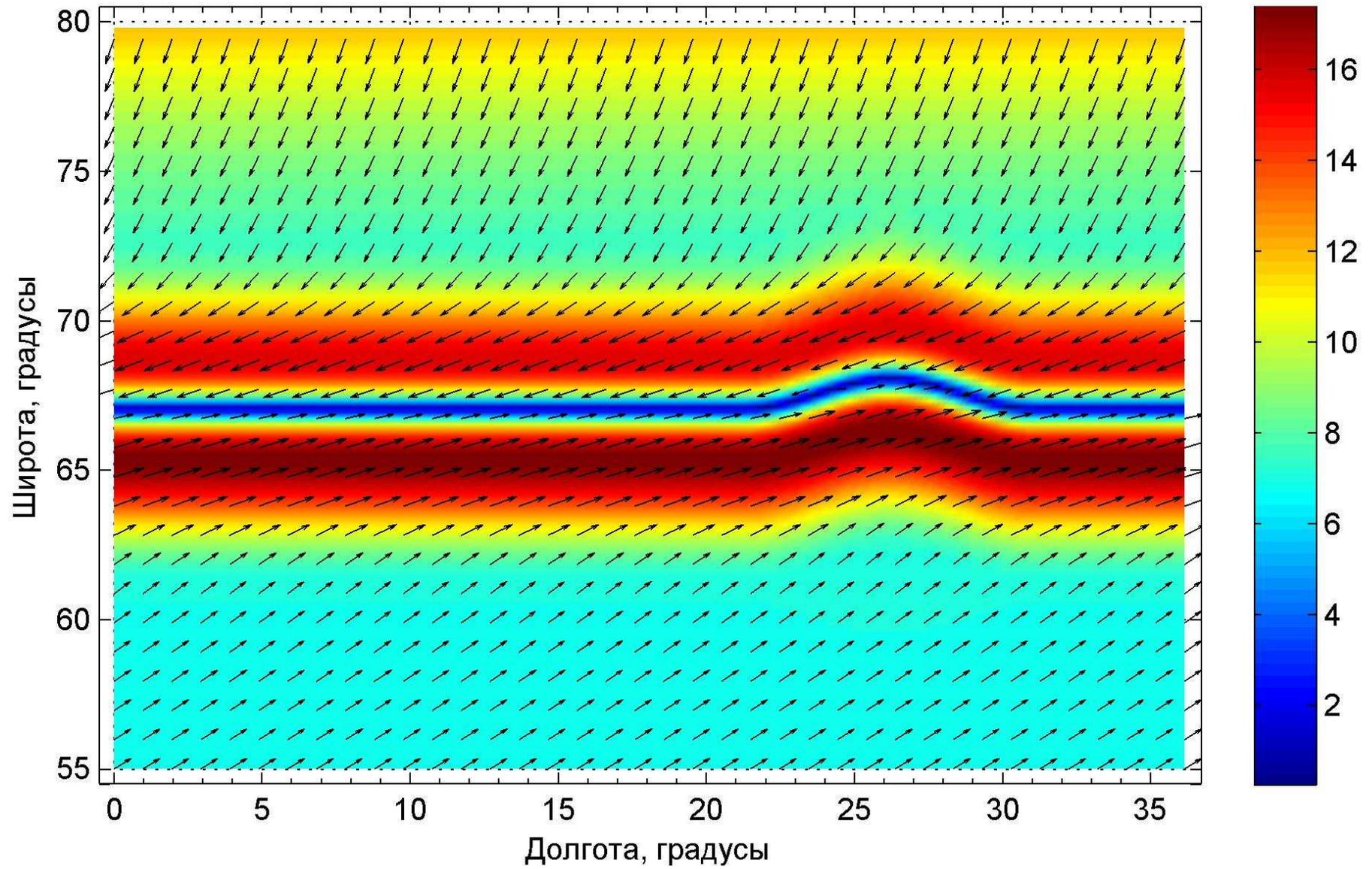
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 30 часов



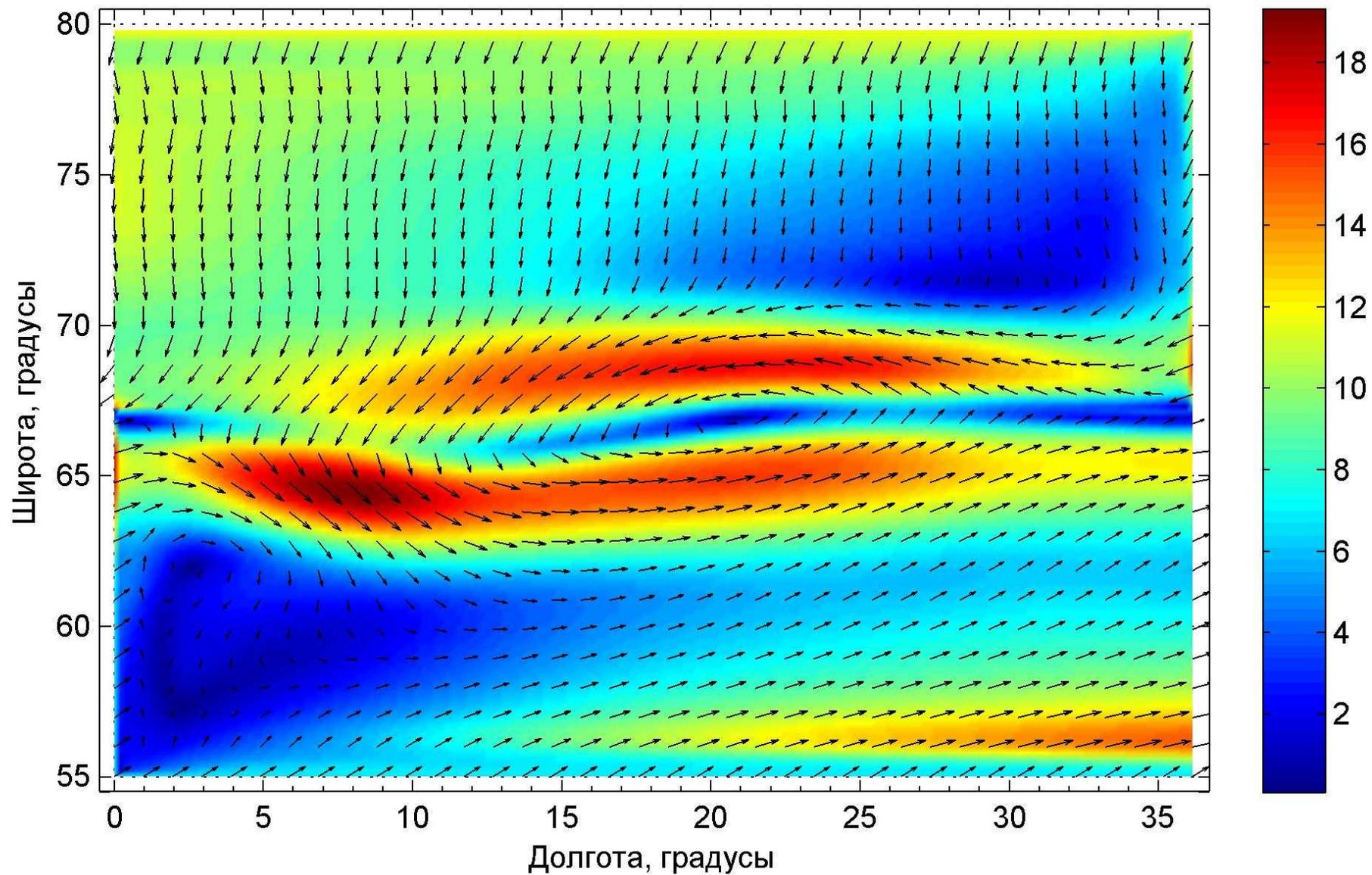
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 40 часов



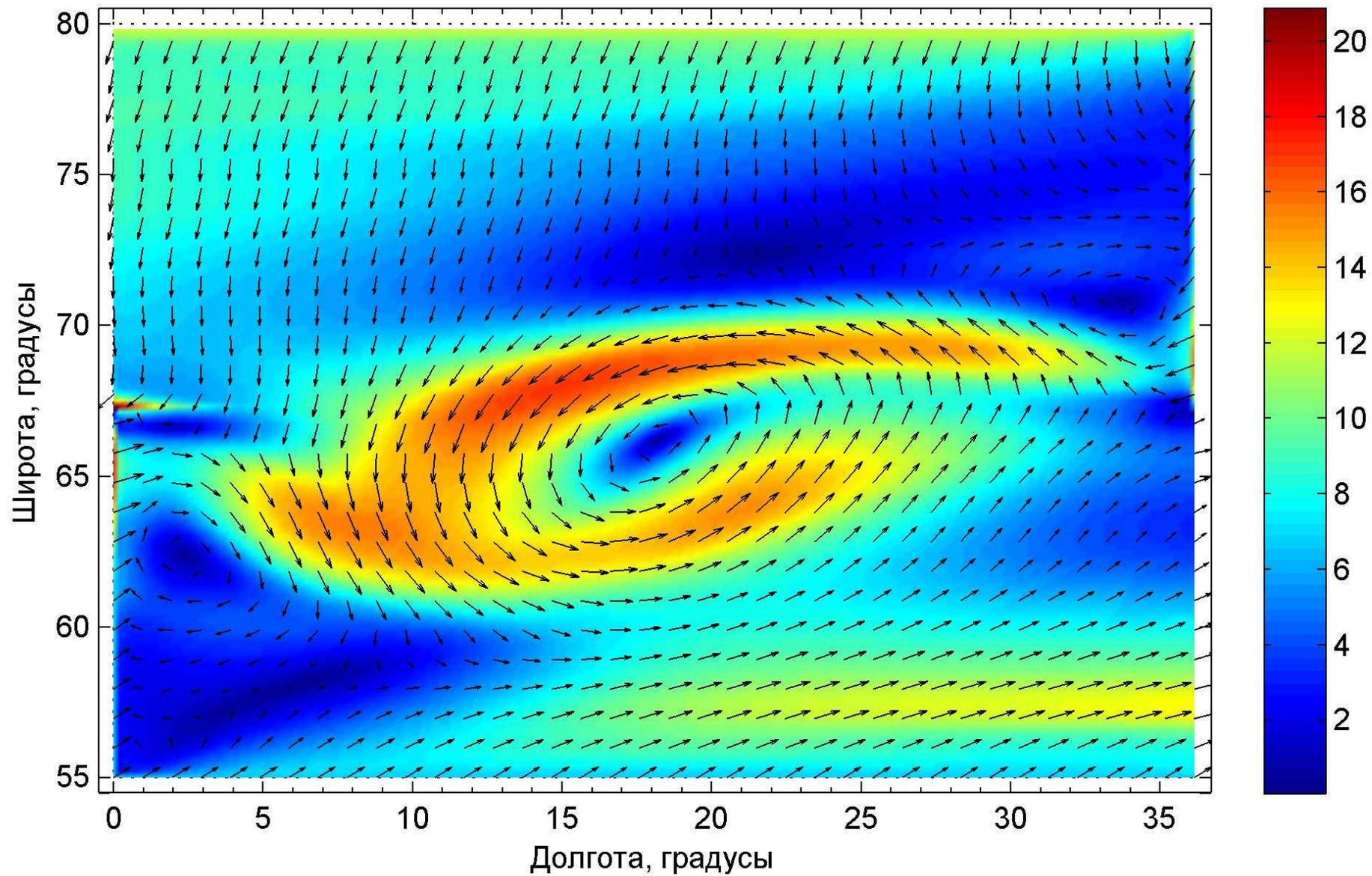
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км в начальный момент



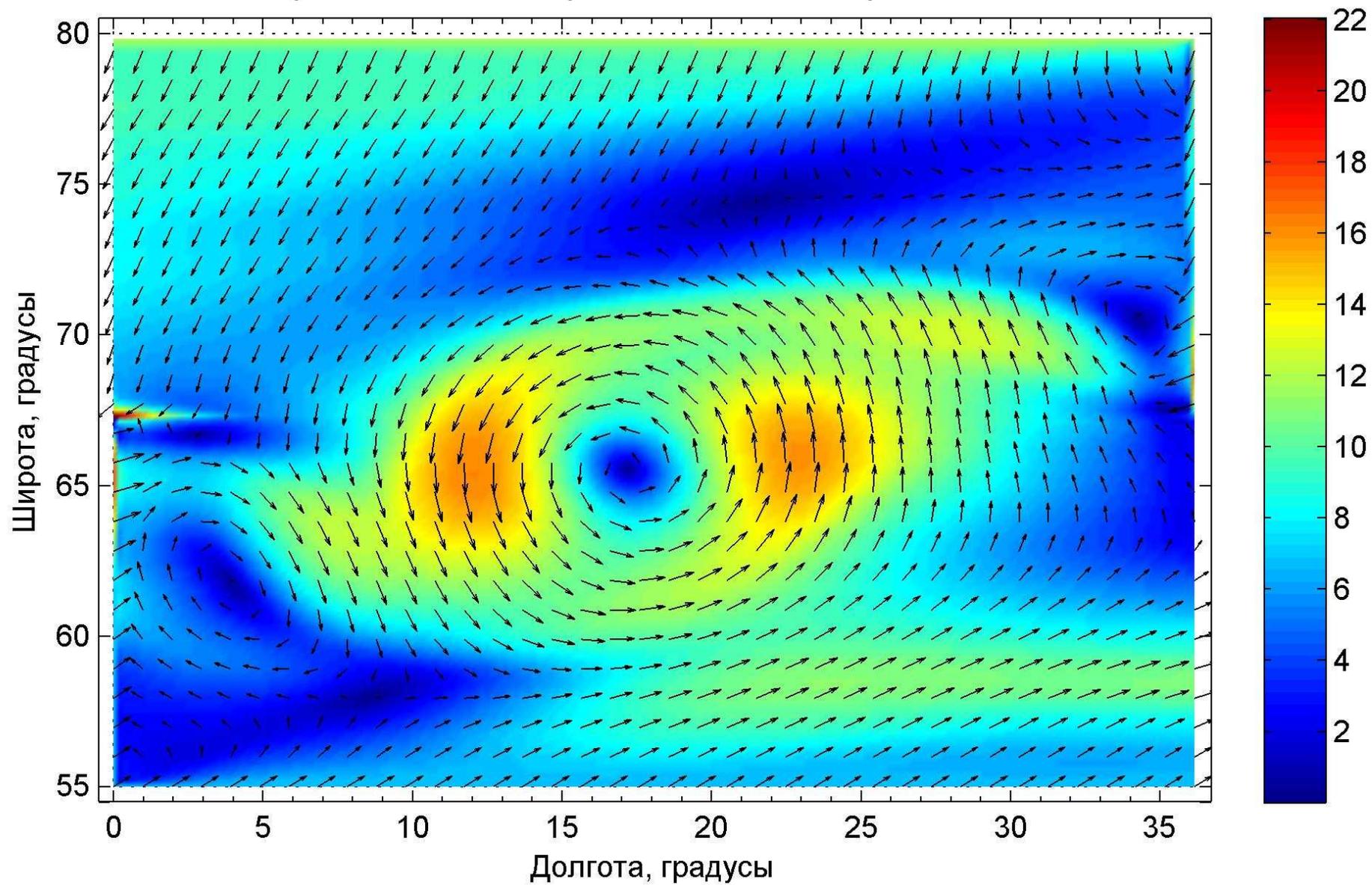
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 10 часов



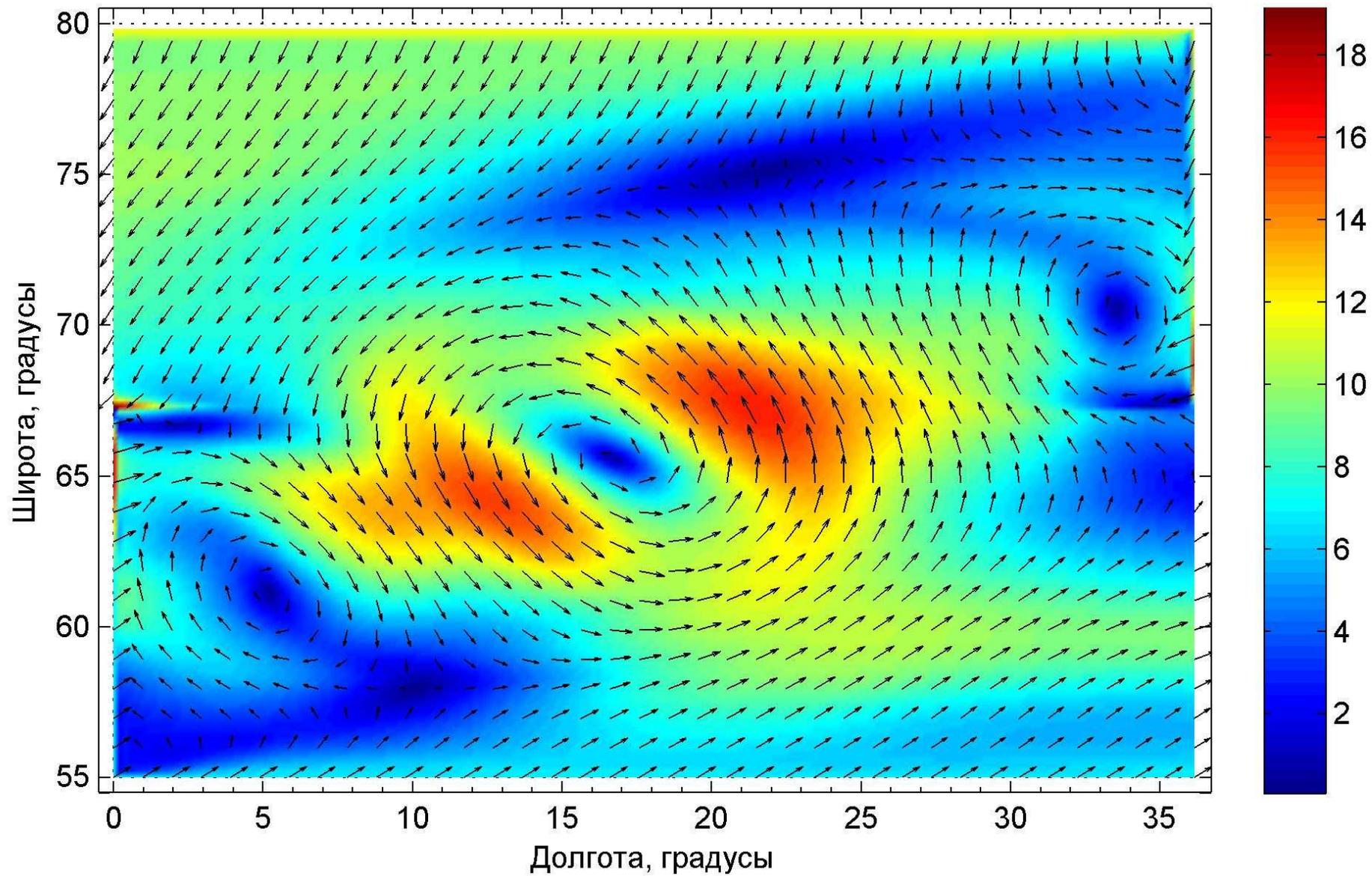
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 20 часов



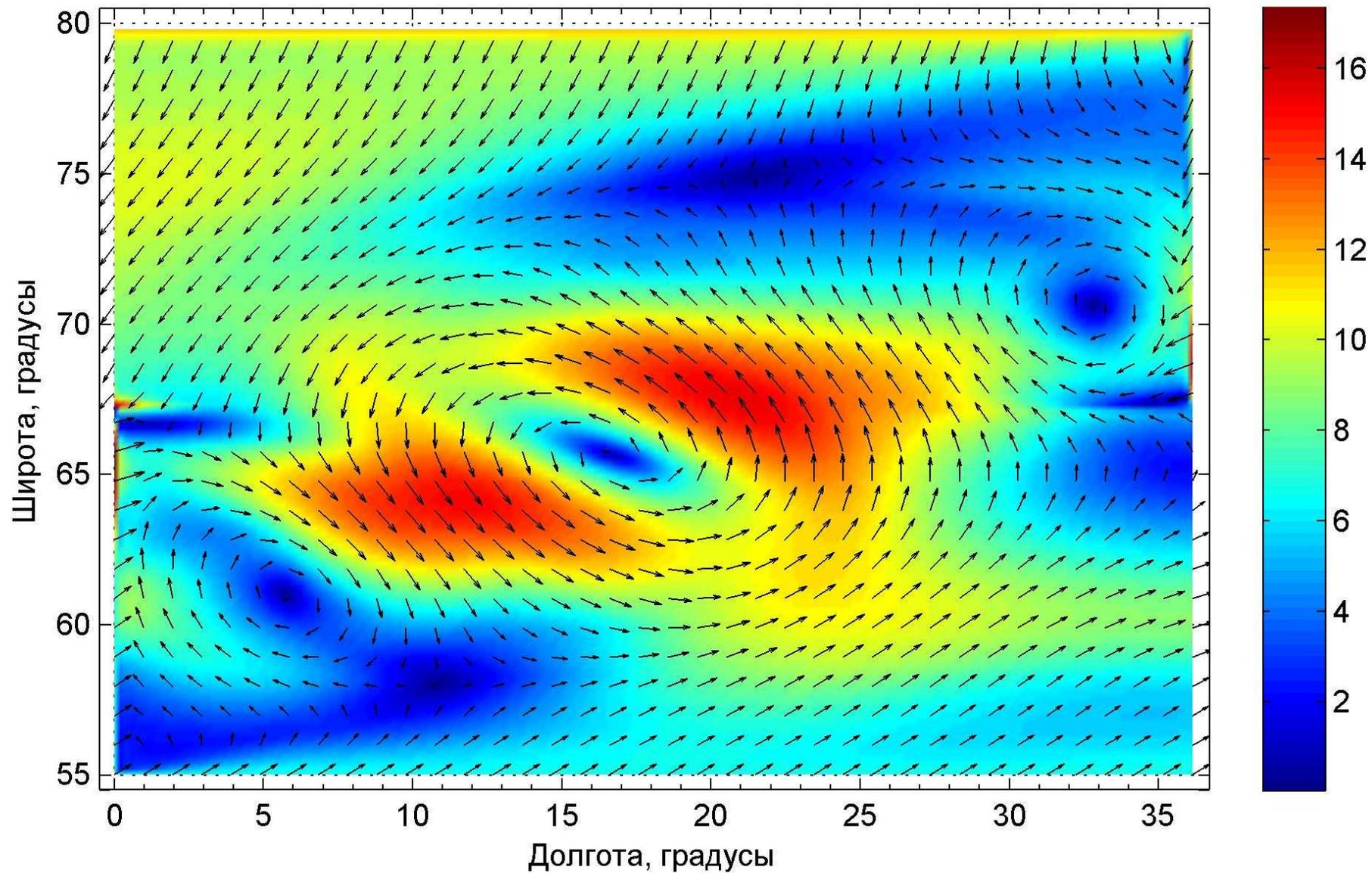
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 30 часов



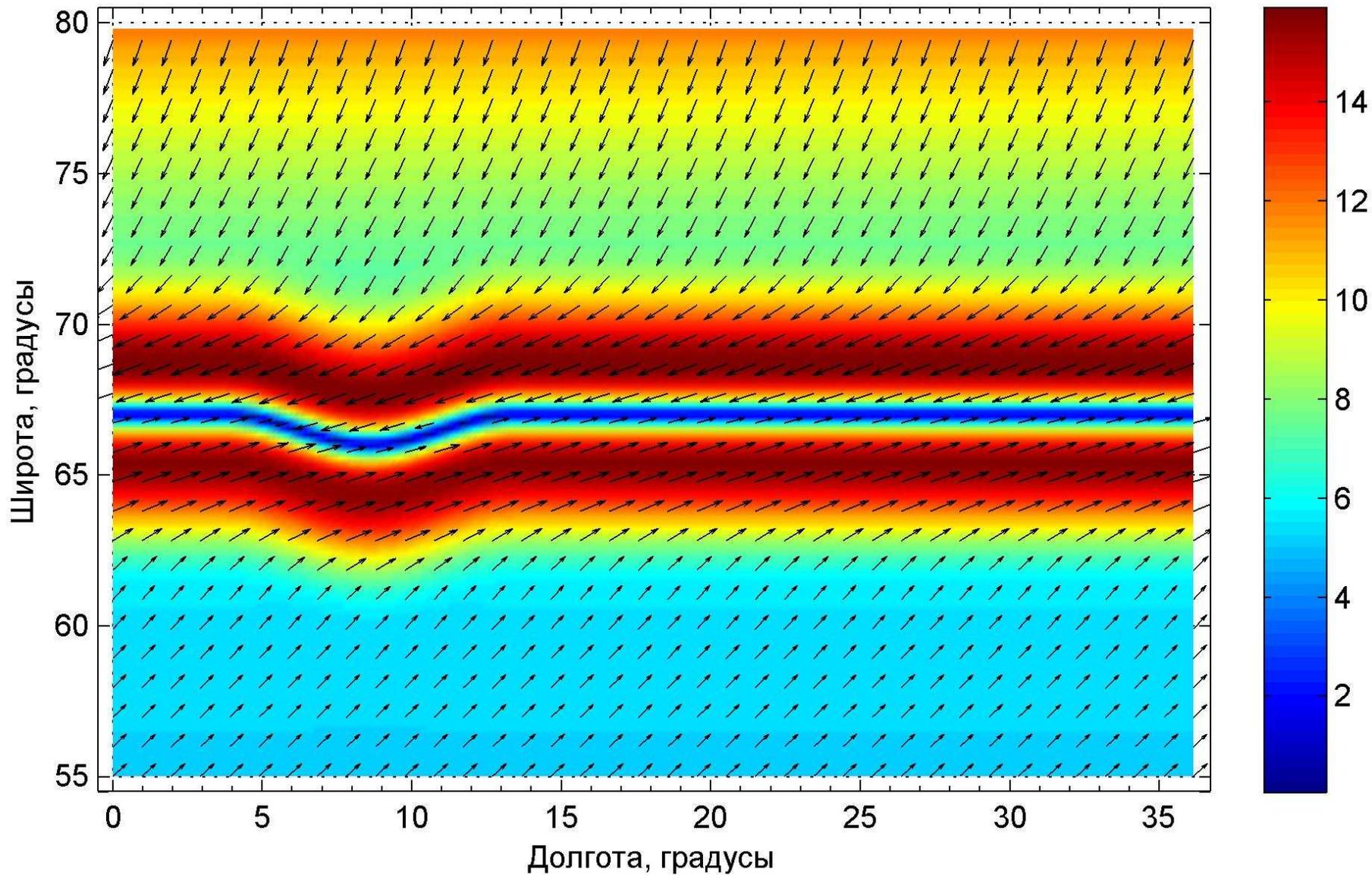
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 40 часов



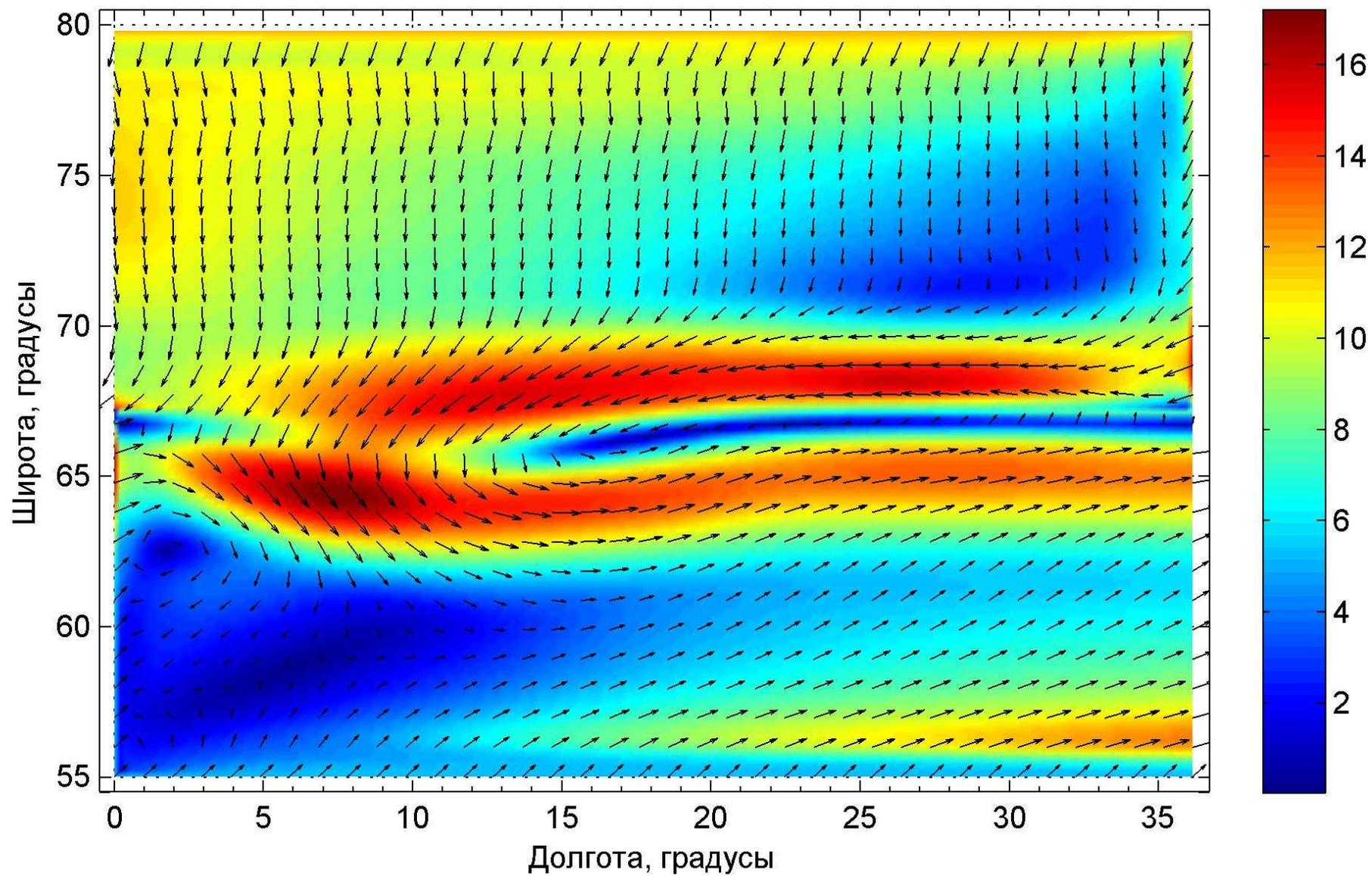
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 45 часов



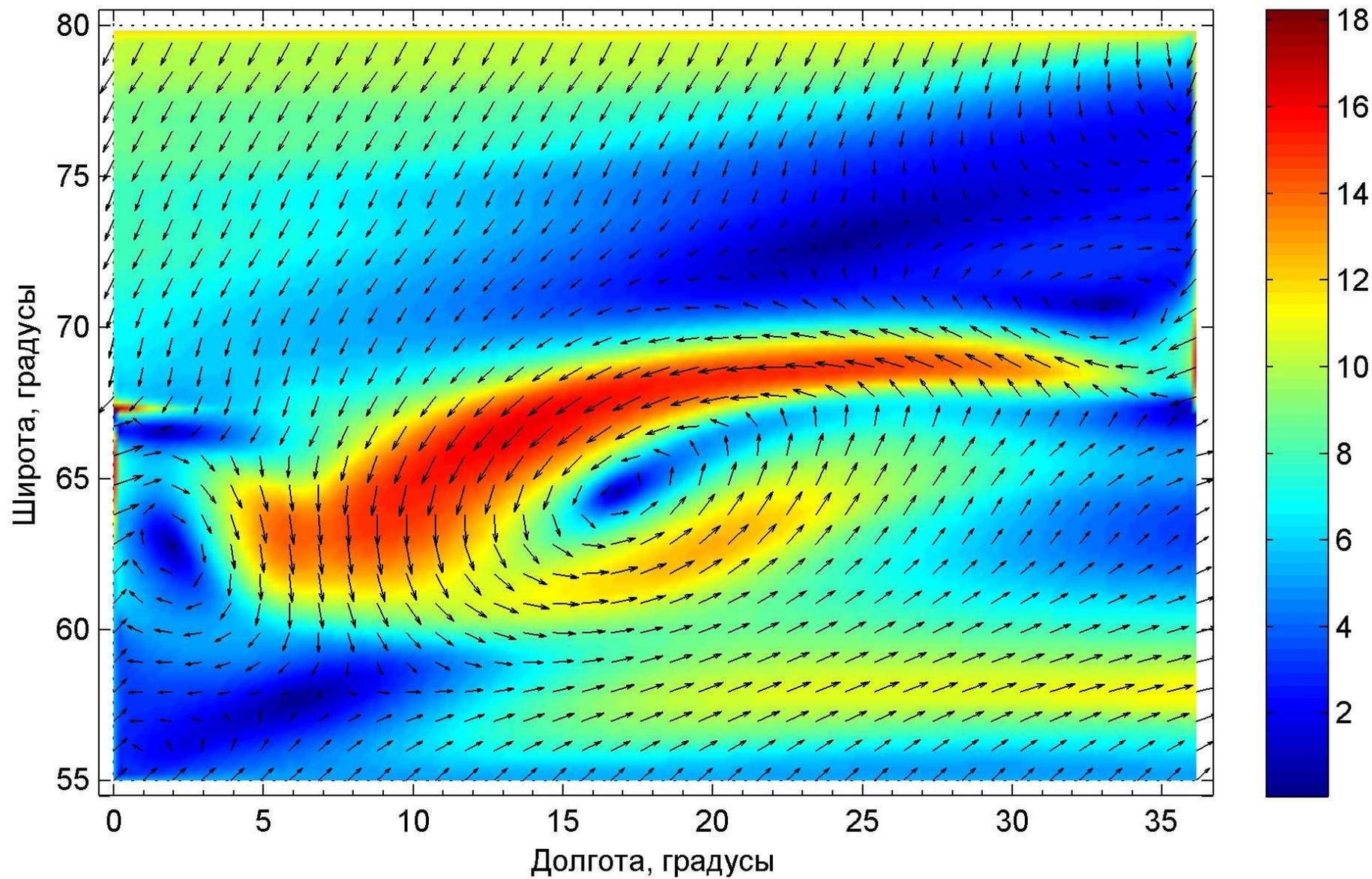
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км в начальный момент



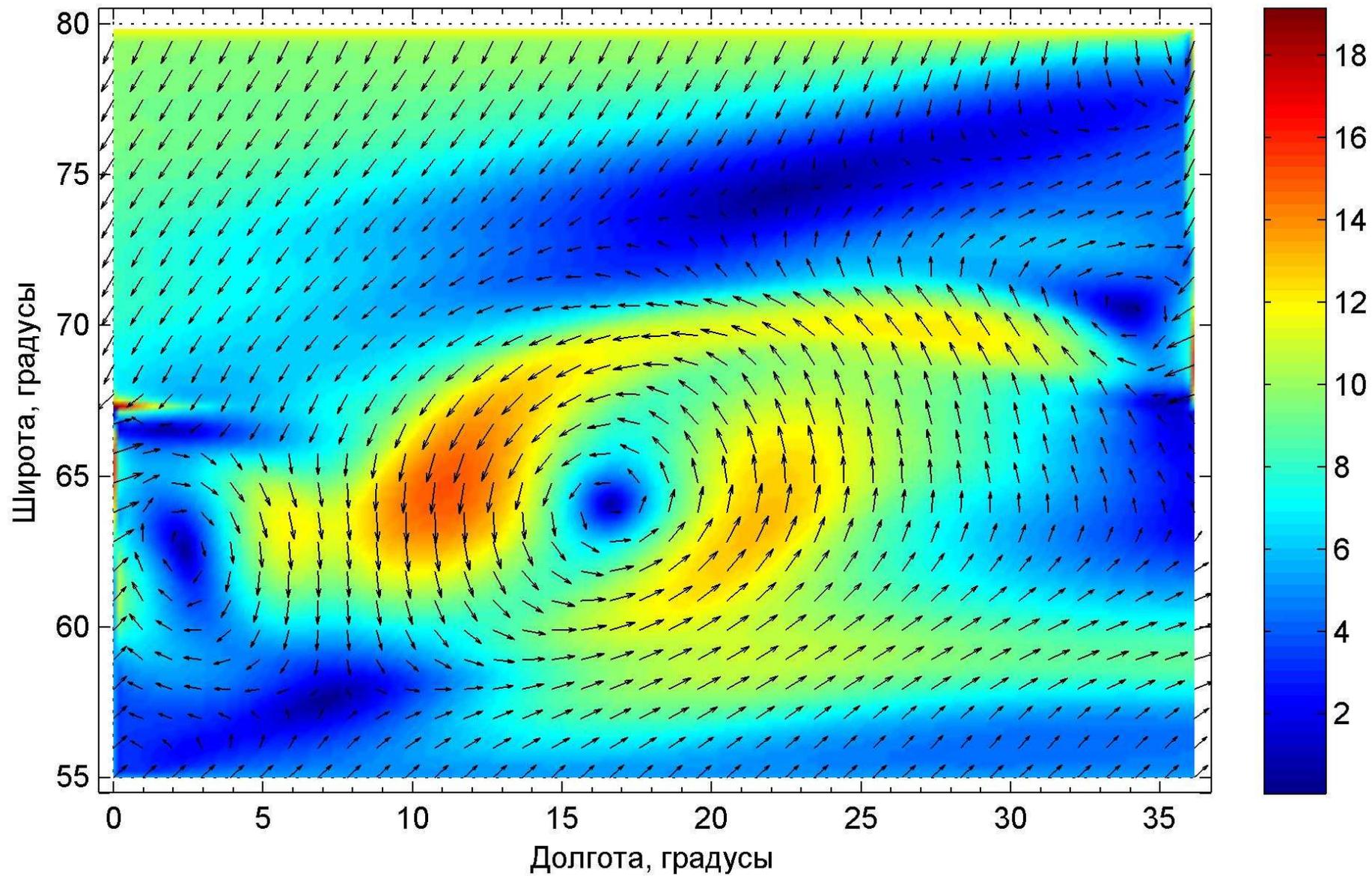
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 10 часов



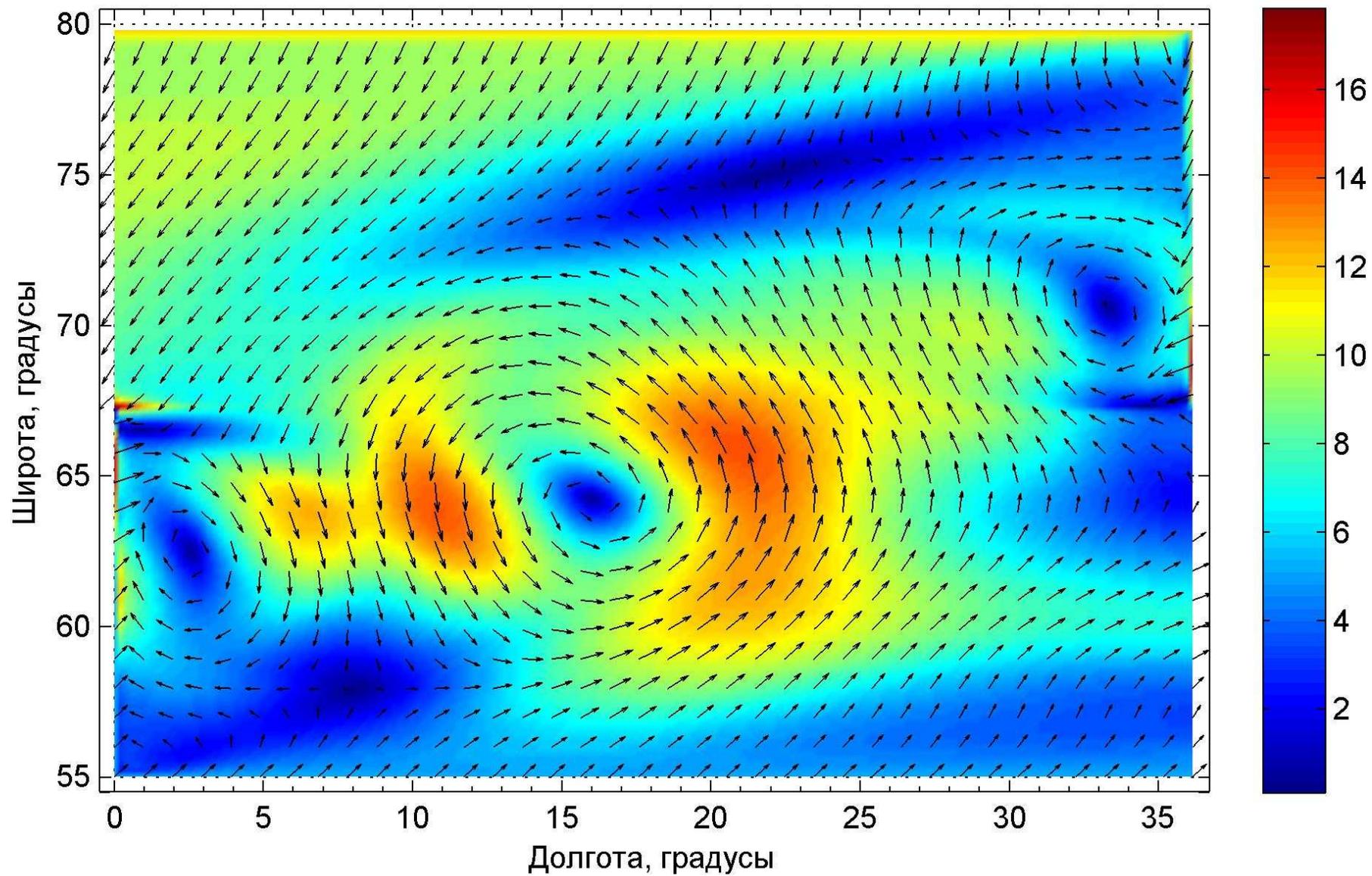
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 25 часов



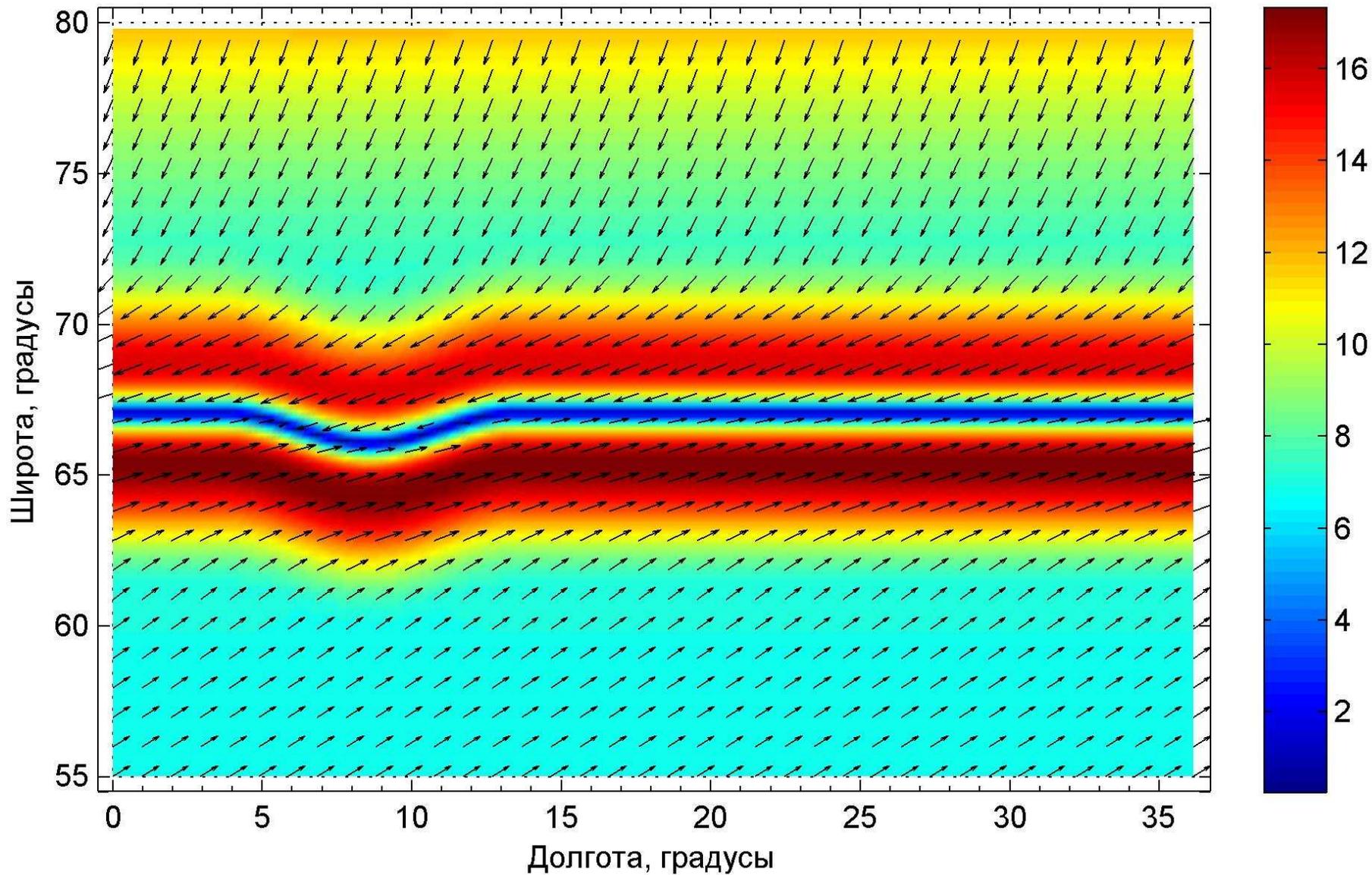
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 35 часов



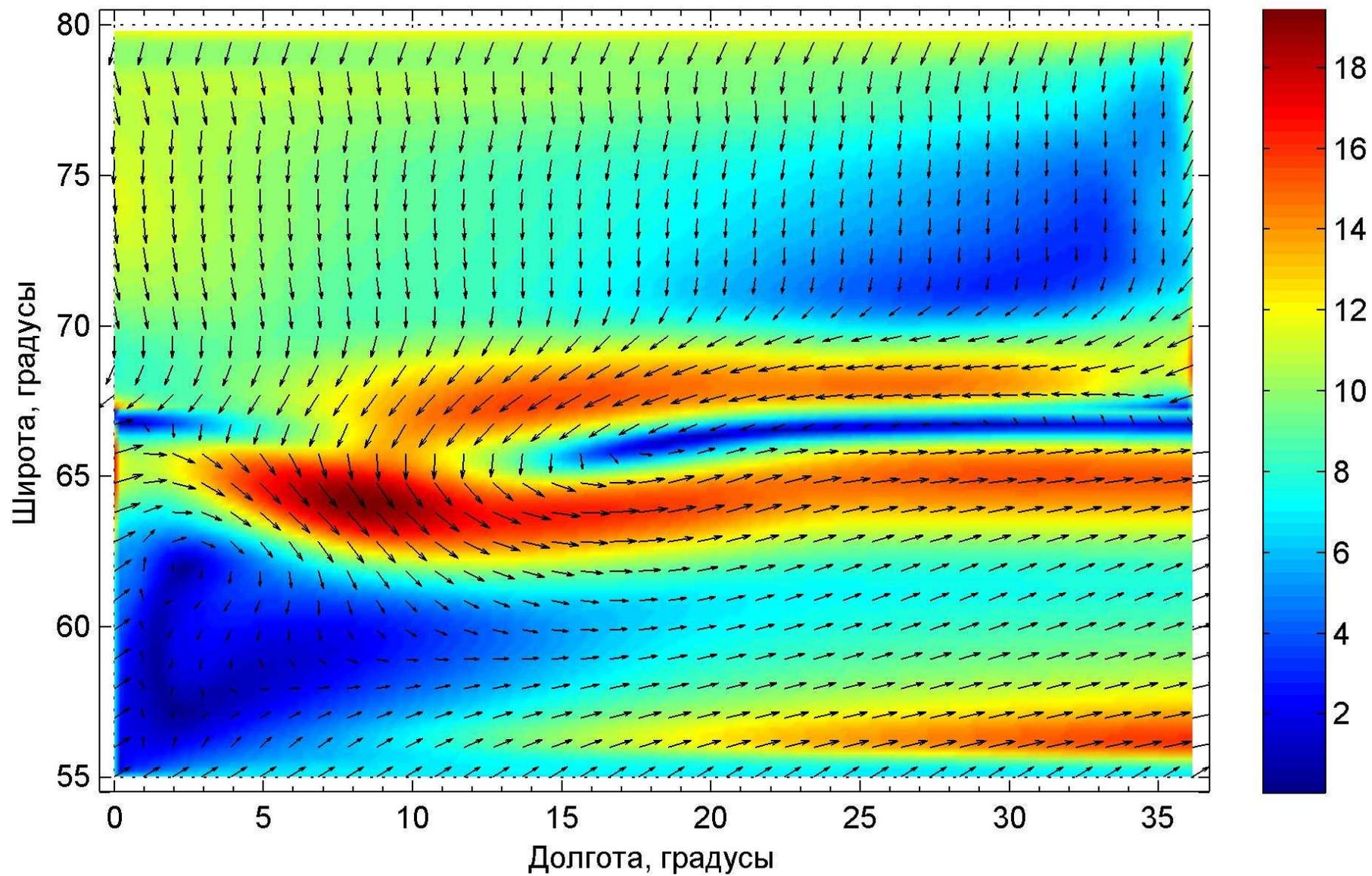
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 45 часов



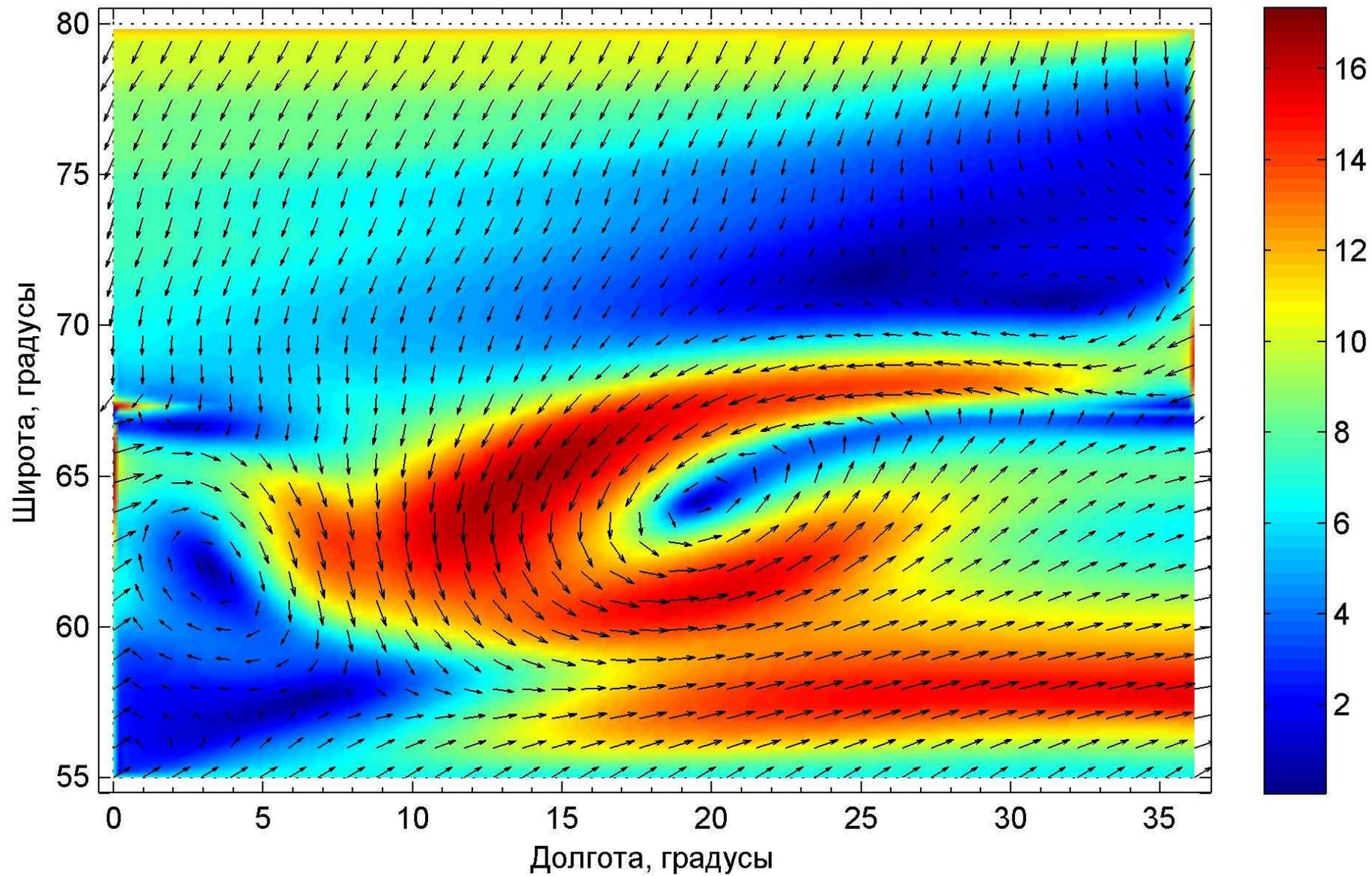
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км в начальный момент



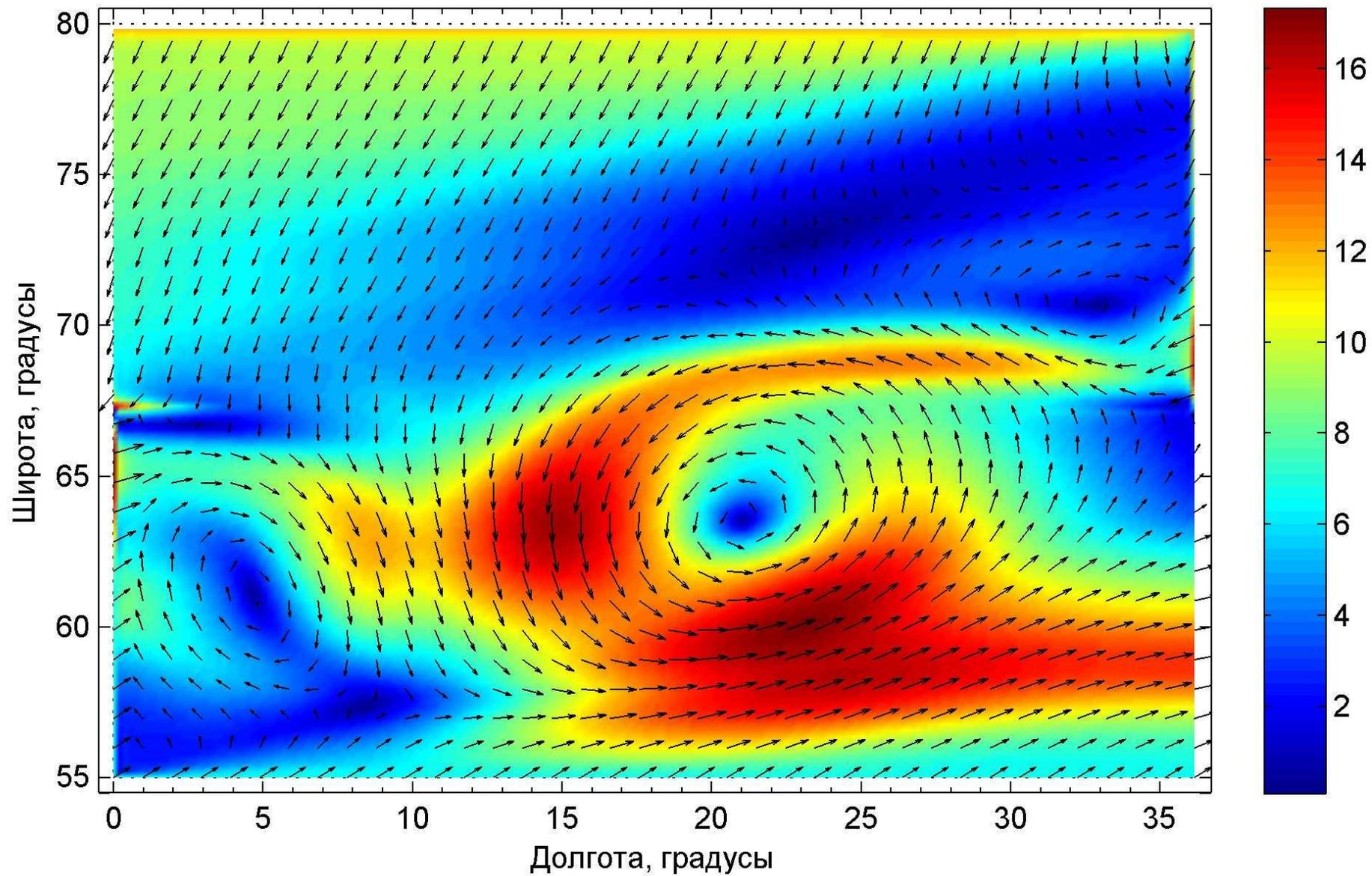
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 10 часов



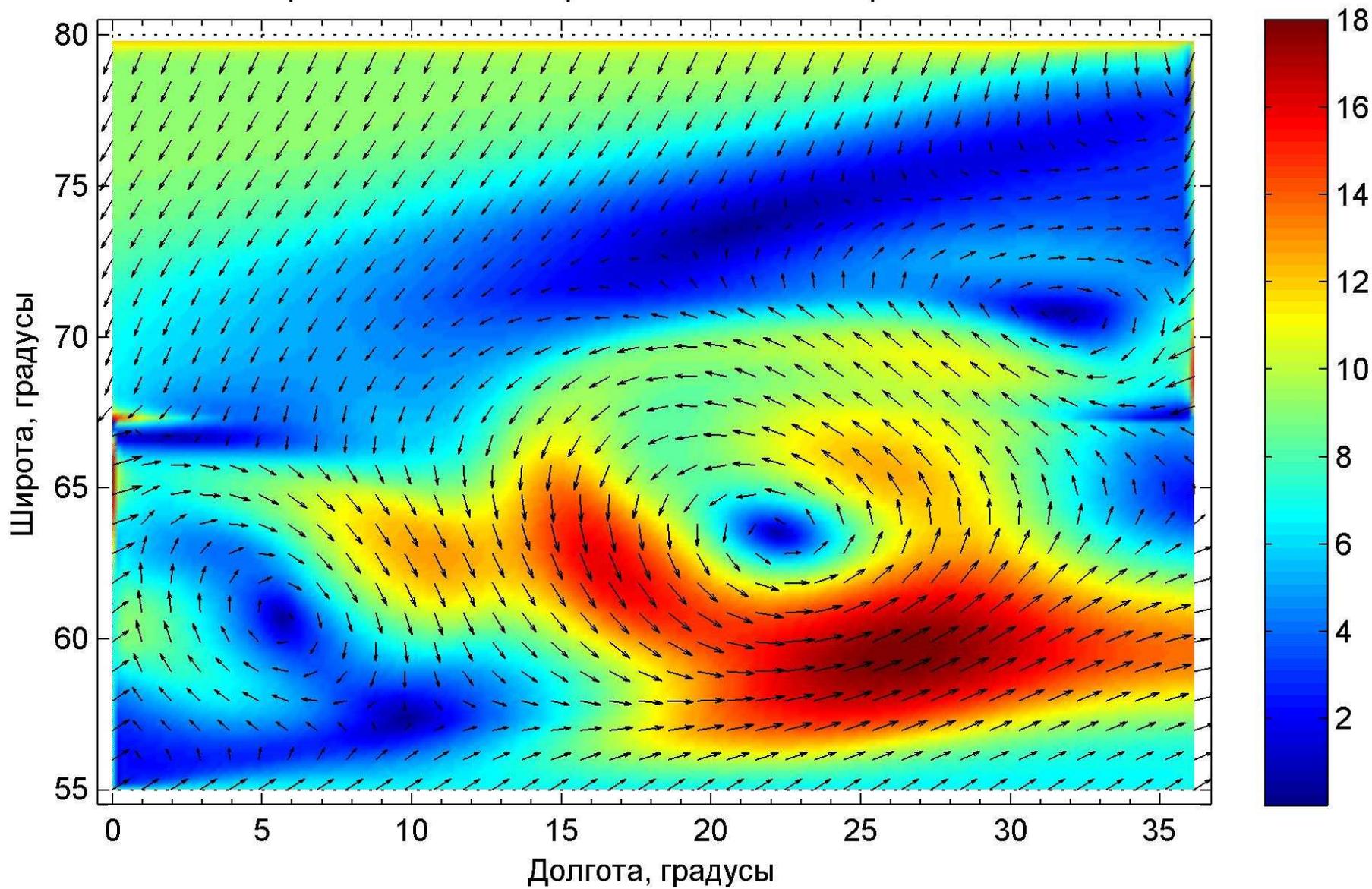
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 25 часов



Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 35 часов



Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 45 часов



Выводы

- Результаты численного моделирования показали, что если начальные и граничные условия достаточно точно соответствуют горизонтальным и вертикальным движениям воздуха в районе арктического фронта, то циклонические течения формируются после появления искривленных участков этого фронта.
- Главной физической причиной формирования начального крупномасштабного циклонического вихря является возникновение достаточно большого искривленного участка арктического фронта.