

Возможность предсказания образования тропических циклонов и ураганов по данным спутниковых наблюдений

*Мингалев И.В.⁽¹⁾, Астафьева Н.М.⁽²⁾, Орлов К.Г.⁽¹⁾,
Мингалев В.С.⁽¹⁾, Мингалев О.В.⁽¹⁾, Чечеткин В.М.⁽³⁾*

- (1) Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, г. Апатиты Мурманской обл.,
E-mail: mingalev_i@pgia.ru.*
- (2) Институт космических исследований РАН, Москва,
E-mail: ast@iki.rssi.ru*
- (3) Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша
РАН, Москва*

Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН №16 и 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.

Краткое описание модели:

- атмосферный газ рассматривается как смесь воздуха и водяного пара, в которой могут присутствовать аэрозоли двух видов: микрокапли воды и микрочастицы льда;
- частицы аэрозолей считаются сферами радиусов 0.1 мм и 0.03 мм, соответственно, движущимися относительно смеси воздуха и водяного пара со скоростями осаждения;
- температура смеси и микрочастиц аэрозолей считается одинаковой;
- считается, что аэрозоль из микрокапель 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 :

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

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

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

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

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

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,

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

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

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

Влияние турбулентности, имеющей масштабы, меньшие шагов расчетной сетки, на среднее течение атмосферного газа принимается во внимание, для параметризации этой турбулентности используется одна из существующих эмпирических моделей. А именно, коэффициенты турбулентного обмена зависят от шага сетки в направлении данного орта и задаются по формуле Ричардсона

$$K = C \cdot (0.1 \cdot L)^{4/3}, \quad C = 0.37 \text{ м}^{2/3} / \text{с},$$

где L - масштаб турбулентности в метрах, в качестве которого берется расстояние между узлами сетки вдоль координатных линий. Тензор коэффициентов вязкости имеет вид

$$\hat{\eta} = \begin{pmatrix} \mu_r & 0 & 0 \\ 0 & \mu_\varphi & 0 \\ 0 & 0 & \mu_\beta \end{pmatrix}, \quad \text{где} \begin{cases} \mu_r = \mu(T) + \rho \cdot C \cdot (0.1 \cdot \Delta h)^{4/3}, \\ \mu_\varphi = \mu(T) + \rho \cdot C \cdot (0.1 \cdot r \cdot \cos \beta \cdot \Delta \varphi)^{4/3}, \\ \mu_\beta = \mu(T) + \rho \cdot C \cdot (0.1 \cdot r \cdot \Delta \beta)^{4/3}, \end{cases}$$

$$\mu(T) = \frac{A \cdot T^{3/2}}{T + 114 \text{ К}}, \quad \text{где} \quad A = 14.65 \cdot 10^{-7} \left(\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{1/2}} \right).$$

Численное моделирование применялось для исследования поведения циклонов и другими авторами. В качестве примера можно привести работы

Rotunno R., and Emanuel K. A., An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part II. // J. Atmos. Sci., 1987. V.44. P. 542-561;

Emanuel K. A., Genesis and maintenance of "Mediterranean hurricanes". // Advances in Geosciences, 2005. V.2. P. 217-220;

в которых используется численная негидростатическая мезомасштабная модель эволюции циклона. В этой модели в качестве начального условия задается достаточно интенсивный горизонтальный вихрь и рассчитывается его эволюция, приводящая к формированию циклона или урагана. Вопрос же о зарождении начального горизонтального вихря в этих работах не рассматривается.

внутритропическая зона конвергенции (ВЗК) - это промежуточная область преимущественно зональных ветров экваториальной барической ложбины между пассатами Северного и Южного полушарий шириной несколько сотен км. Ее отождествляют со статистически значимой границей между двумя циркуляционными ячейками Хедли. Из наблюдений известно, что в ВЗК зональная компонента ветра, направленная преимущественно в западном направлении, увеличивается при приближении к центру ВЗК. Меридиональная компонента направлена к центру ВЗК на высотах менее 3 км и направлена от центра ВЗК на высотах более 3 км. Вертикальная компонента ветра над ВЗК направлена вверх.

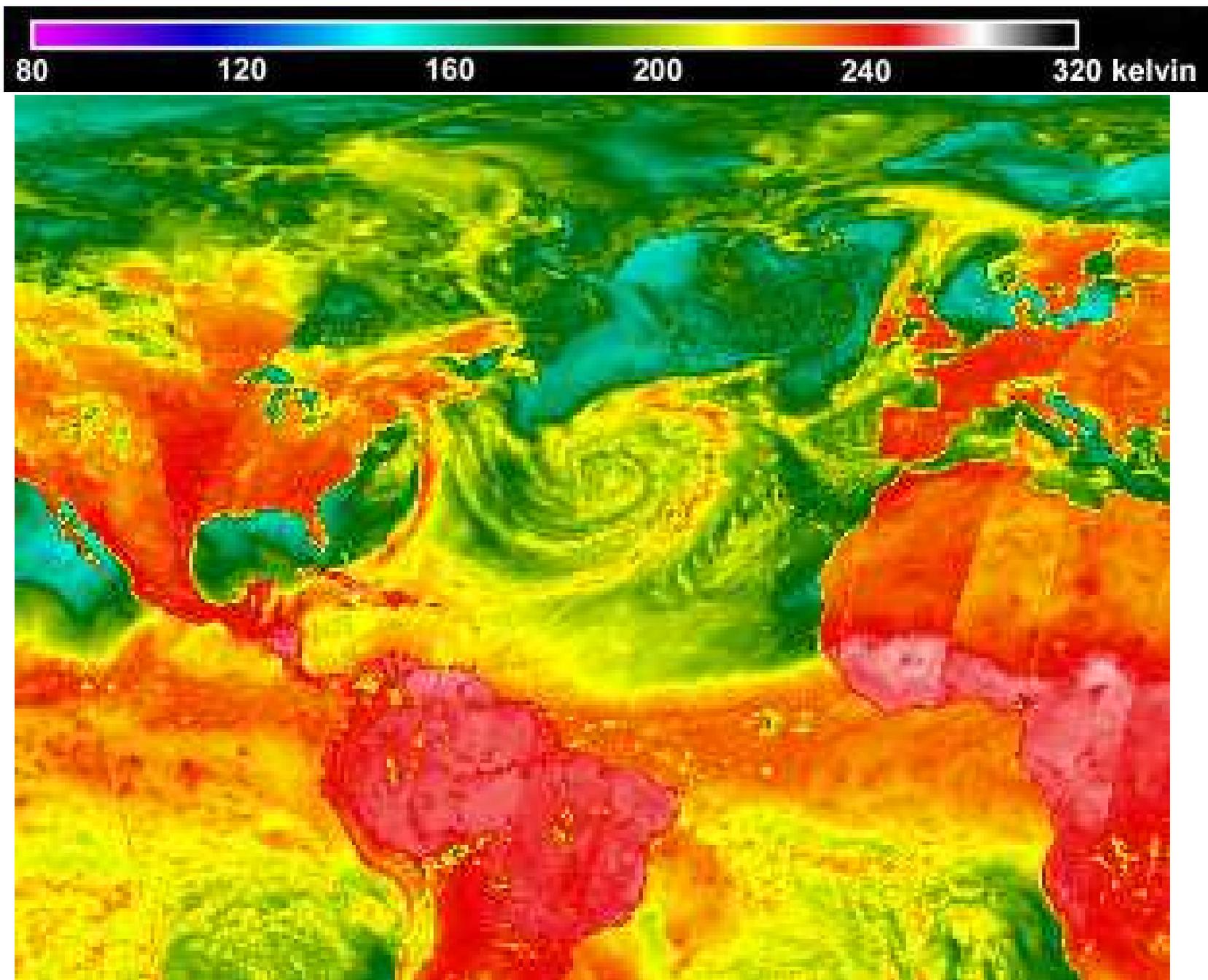
На основе данных спутникового мониторинга Земли, полученных при помощи СВЧ-радиометрических приборов SSM/I (Special Sensor Microwave / Imager), установленных на космических аппаратах серии DMSP (Defense Meteorological Satellite Program, <http://dmsp.ngdc.noaa.gov/dmsp.html>) сотрудниками ИКИ РАН сформирована постоянно обновляемая база, содержащая глобальные радиотепловые поля Земли, входящие в электронную коллекцию ИКИ РАН "GLOBAL-Field" (<http://www.iki.rssi.ru/asp/>), за период с 1995 по 2007 г.

Пассивные микроволновые радиометрические приборы SSM/I на космических аппаратах серии DMSP регистрируют излучение на четырех частотах 19.35, 22.24, 37.0 и 85.5 ГГц (длина волн 1.58, 1.35, 0.81 и 0.35 см). Эти частоты отражают присутствие в тропосфере примесей воды в разных видах (пар, кристаллы льда и капли воды разных размеров).

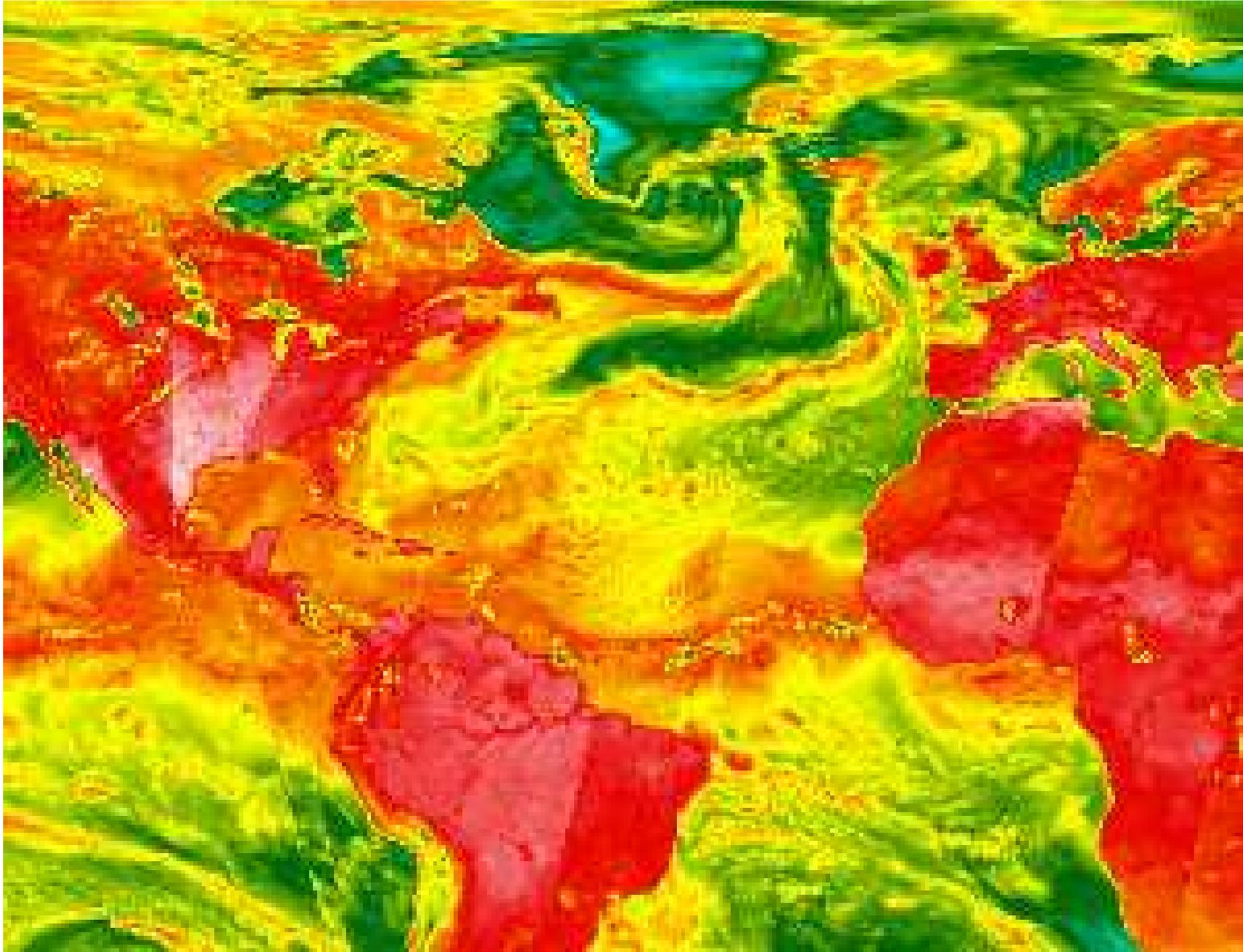
Радиояркость на частоте 19.35 ГГц используется для дистанционной индикации осадков;

на частотах 22.24 и 37.0 ГГц характеризует суммарную концентрацию паров воды в атмосфере, а также количество выпадающего дождя и содержание воды в облаках;

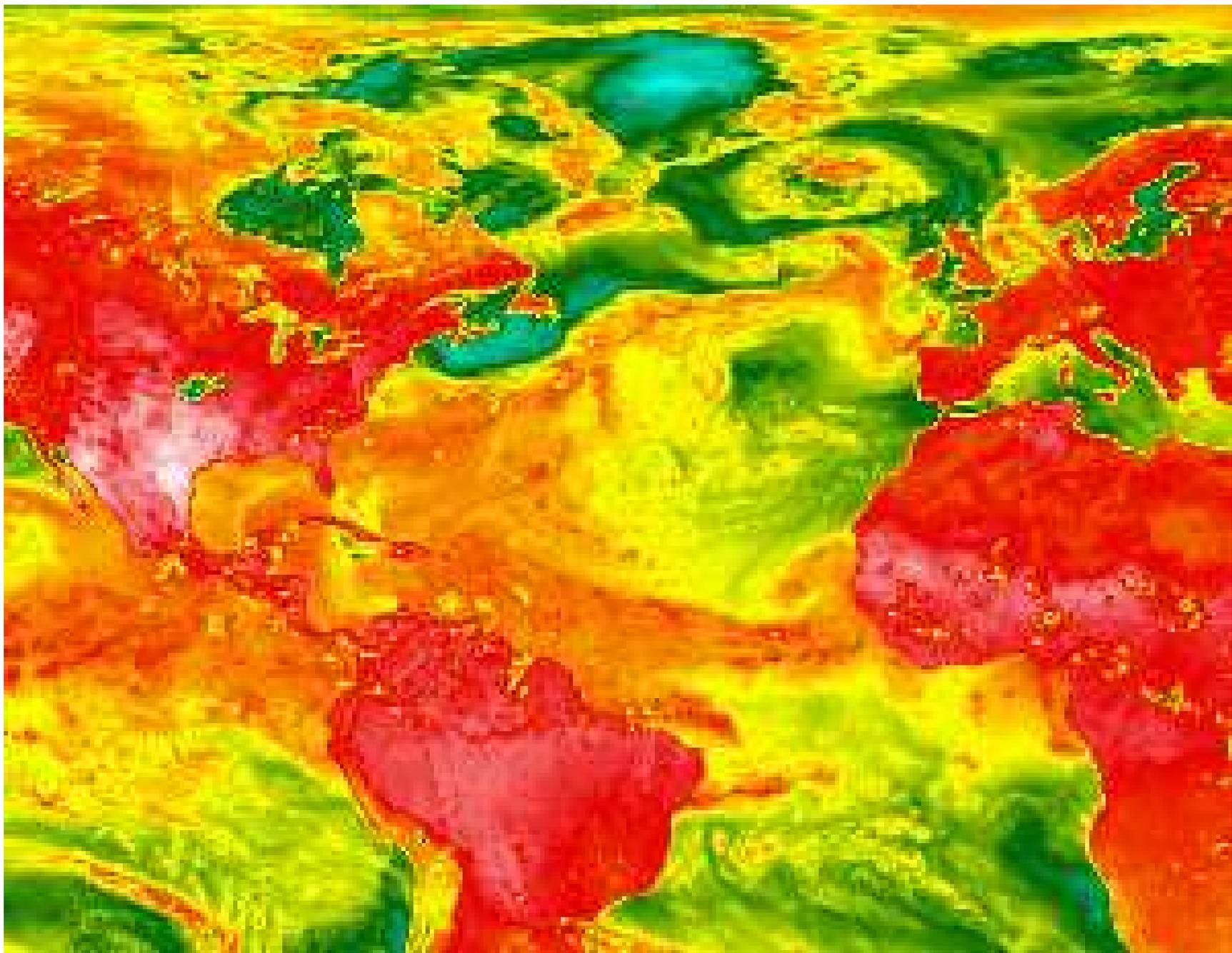
на частоте 85.5 ГГц характеризует общее содержание воды во всех видах, включая кристаллы льда в высоких слоях атмосферы, а также используется для определения ее температуры.



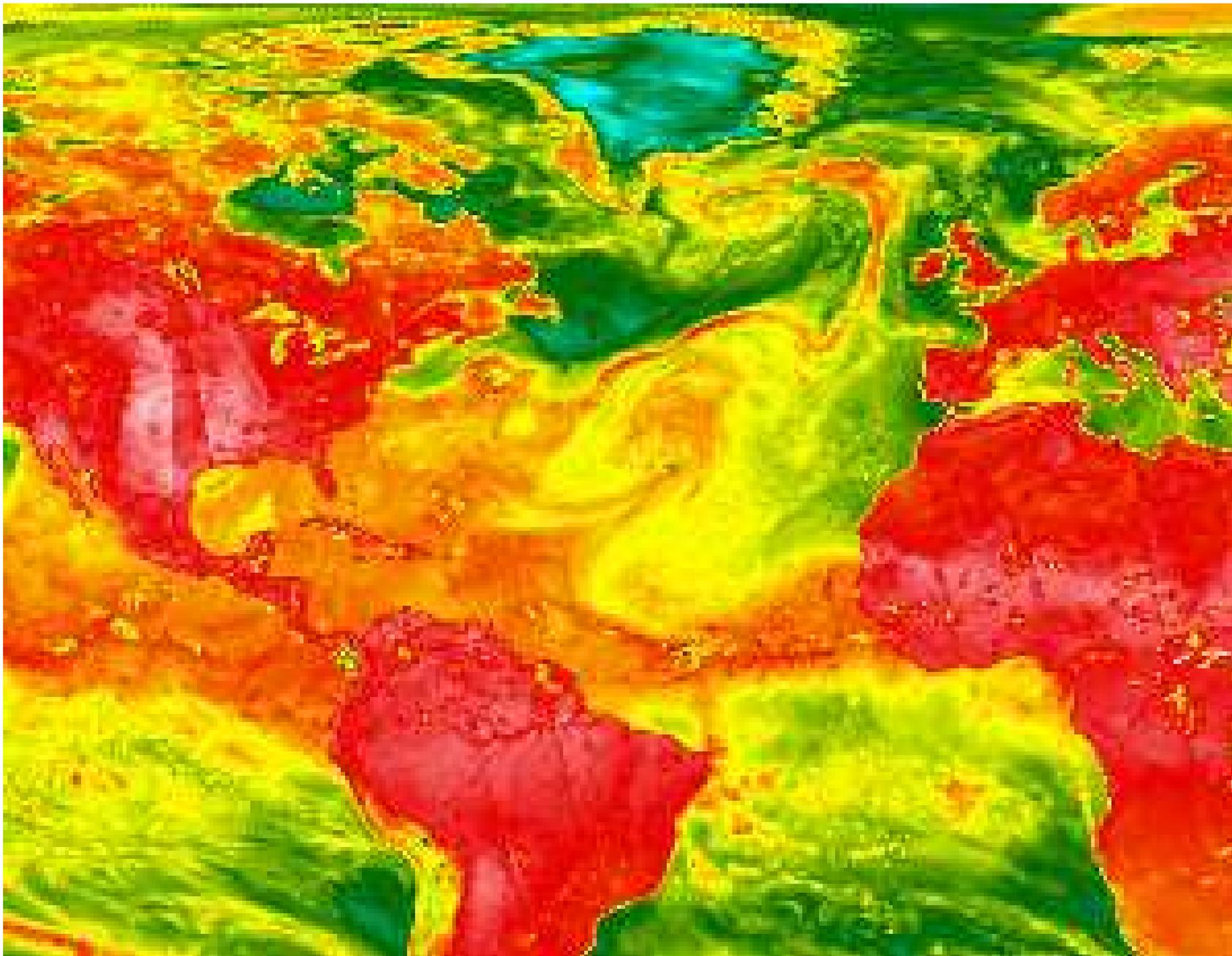
Фрагмент радиотеплового поля (85.5 ГГц) 3 апреля 2005 г. ВЗК без изгибов



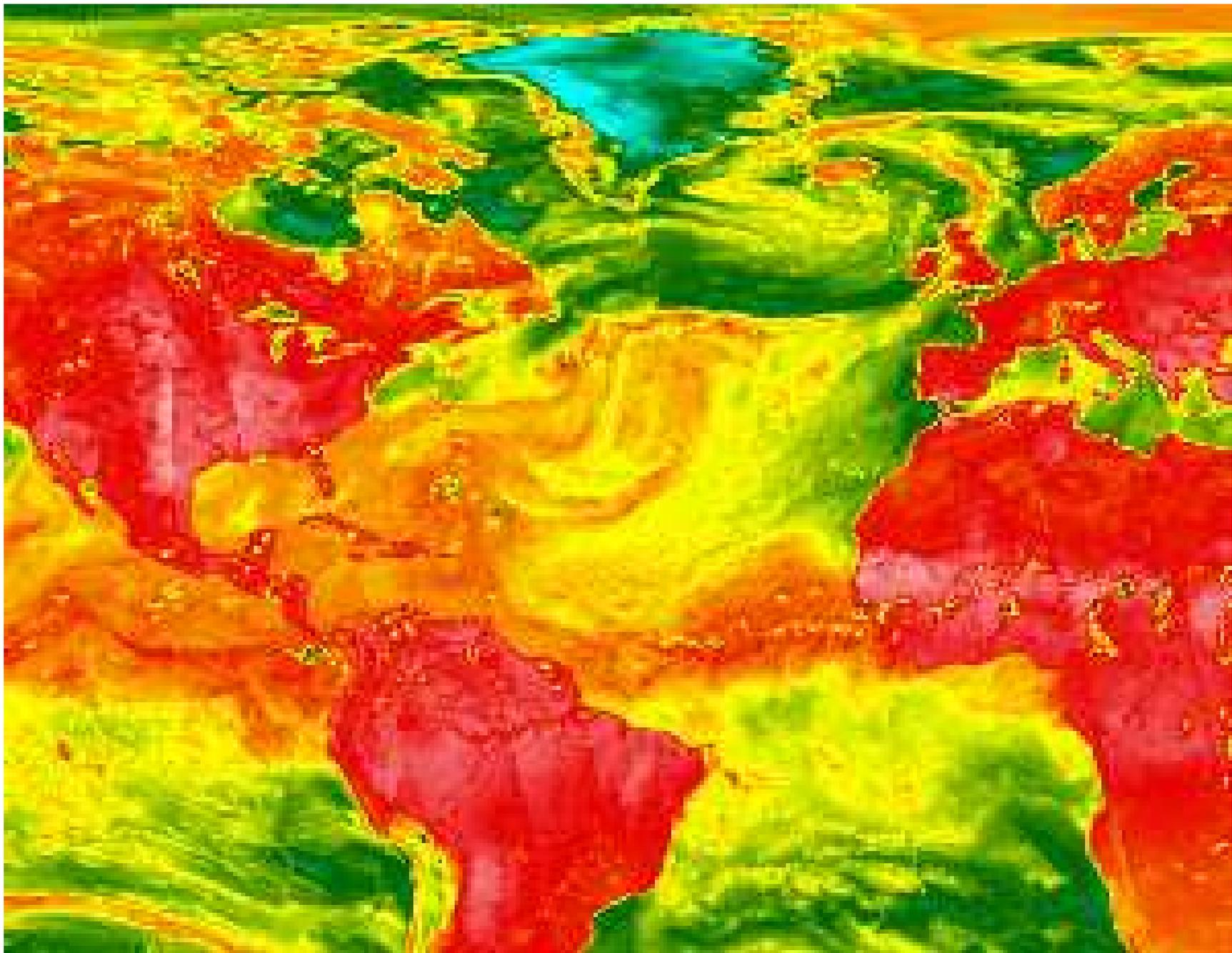
Фрагмент радиотеплового поля (85.5 ГГц) 29 июня 2005 г. ВЗК с изгибом



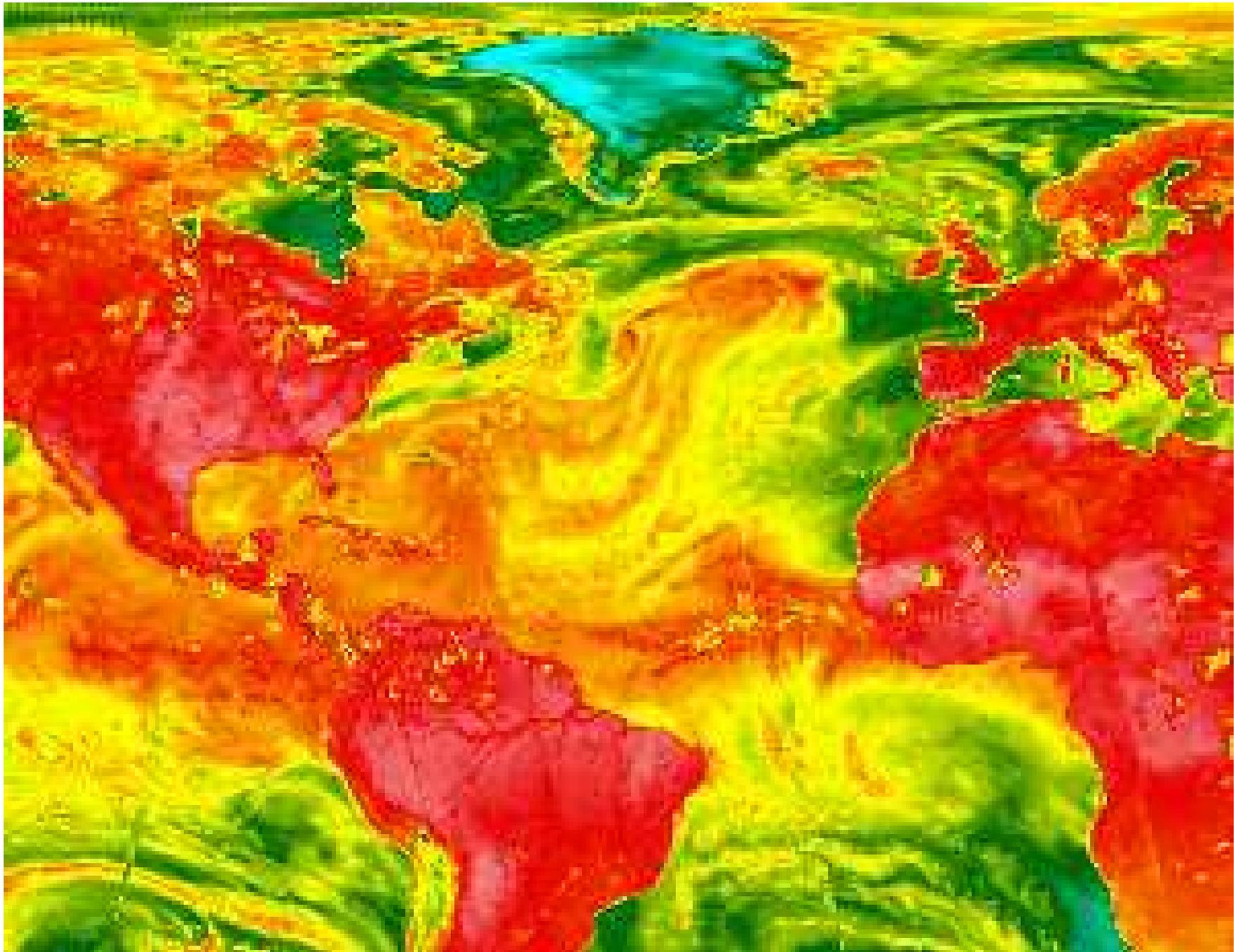
Фрагмент глобального радиотеплового поля (85.5 ГГц) от 3 июля 2005 г.



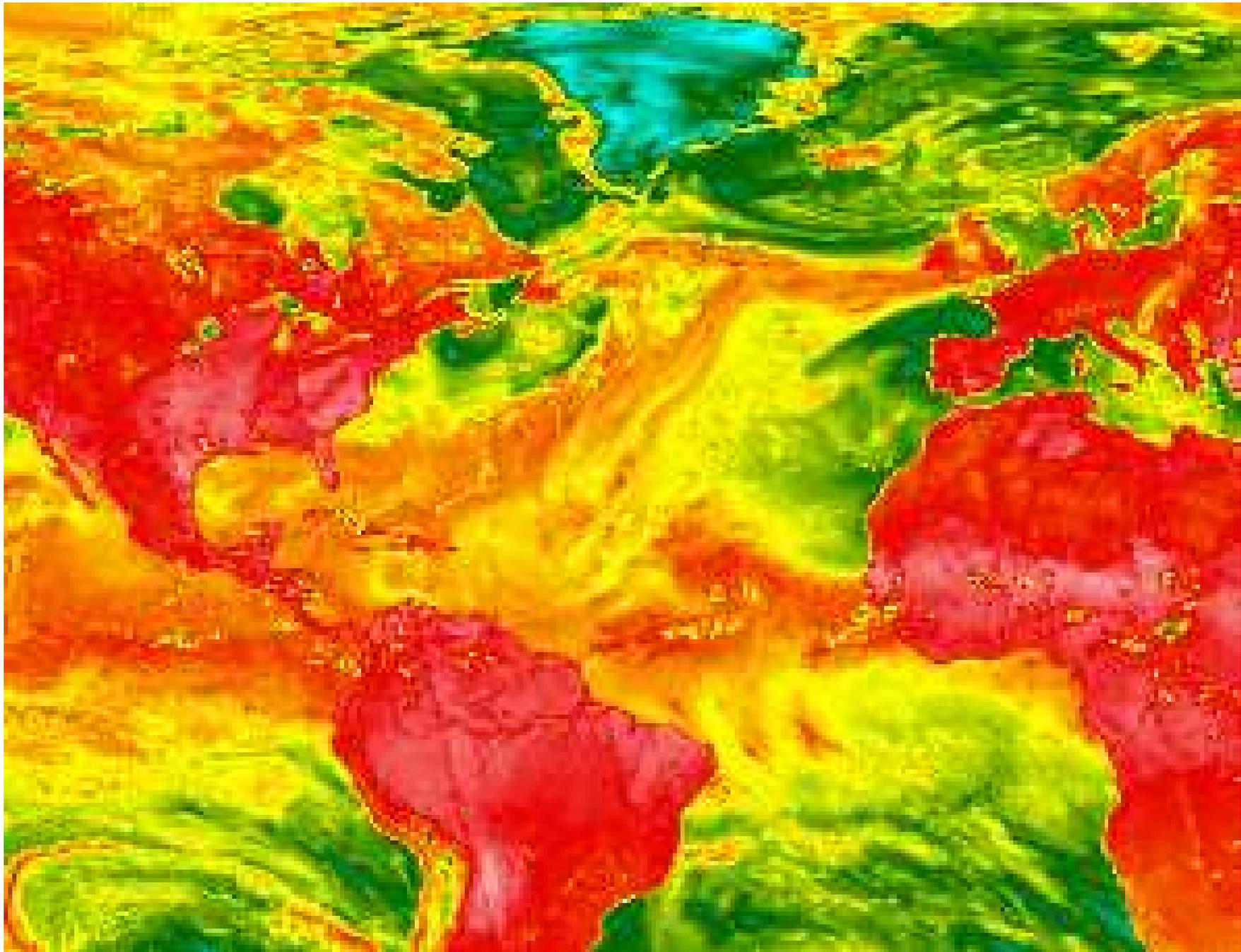
фрагмент глобального радиотеплового поля (85.5 ГГц) от 3 августа 2005 г.



фрагмент глобального радиотеплового поля (85.5 ГГц) от 4 августа 2005 г.



фрагмент глобального радиотеплового поля (85.5 ГГц) от 5 августа 2005 г.



фрагмент глобального радиотеплового поля (85.5 ГГц) от 6 августа 2005 г.

Анализ приведенных и других имеющихся в электронной коллекции ИКИ РАН "GLOBAL-Field" радиотепловых полей Земли позволил авторам выдвинуть рабочую гипотезу о том, что появление искривленных участков ВЗК приводит к зарождению циклонических вихрей.

Для проверки этой гипотезы были проведены модельные расчеты, результаты которых будут представлены ниже.

Область моделирования располагалась между 5 град ю.ш. и 20 град с.ш. Граничные и начальные условия воспроизводили в области моделирования в начальный момент течения, характерные для внутритропической зоны конвергенции. При этом ВЗК задавалась с изгибами, соответствующими данным спутниковых наблюдений в микроволновом и инфракрасном диапазонах. Рассматривались различные варианты задания начального течения воздуха, в частности, формы изгибов ВЗК в области моделирования, и проводилось численное моделирование эволюции этого течения на временах порядка 45 часов физического времени.

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 3 км направлена внутрь области моделирования, а выше 3 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 ВЗК. Зональная компонента ветра направлена на запад и увеличивается при приближении к центру ВЗК. Меридиональная компонента направлена к центру ВЗК на высотах менее 3 км и направлена от центра ВЗК на высотах более 3 км. Плотность воздуха удовлетворяет условию гидростатического равновесия. Вертикальная компонента ветра определяется из уравнения неразрывности. Вне центральной области ВЗК она равна нулю, а над этой областью направлена вверх, достигая максимальных значений над центром ВЗК.

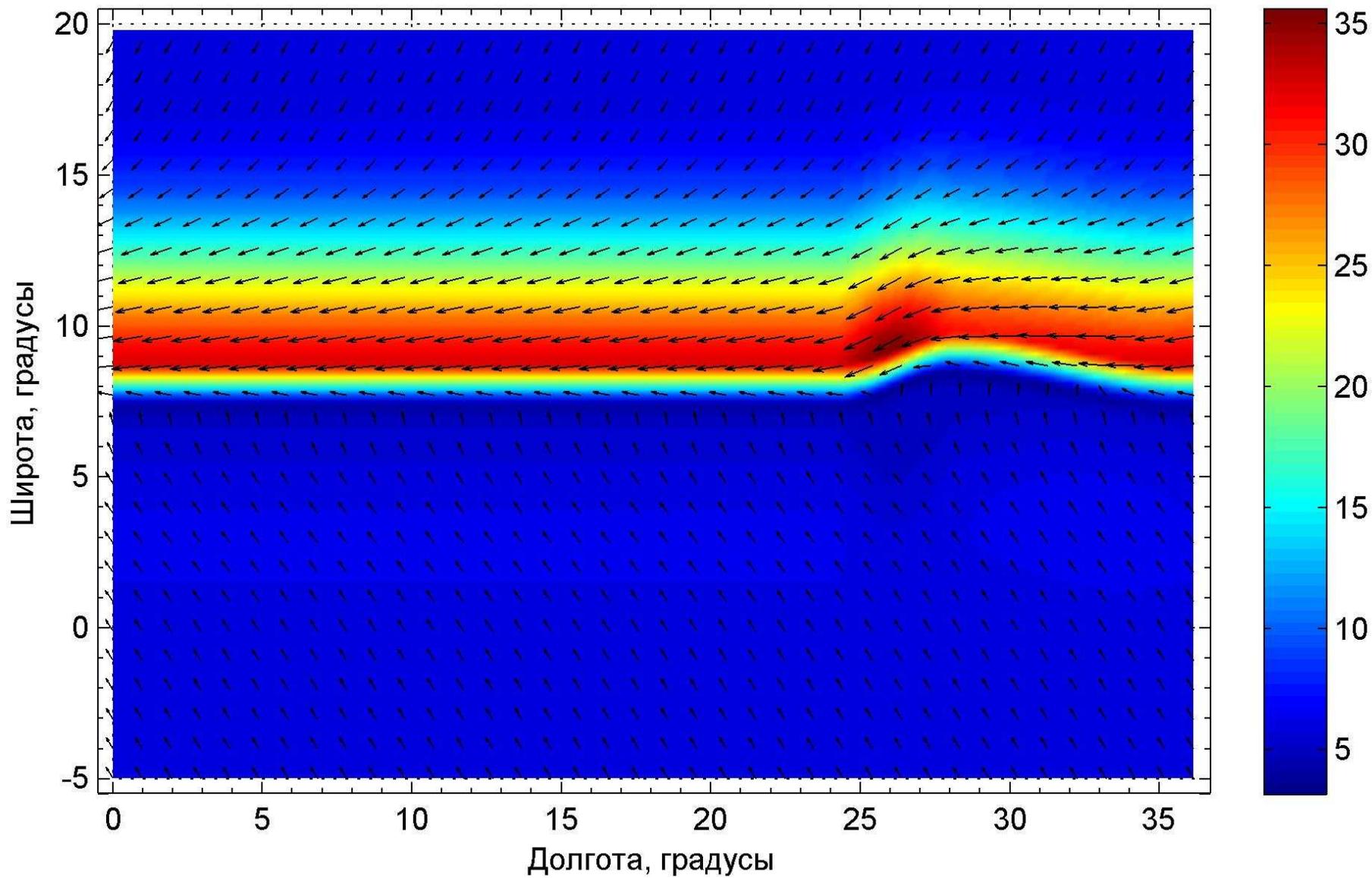
Начальные распределения компонент скорости ветра моделируют течение в районе ВЗК и задаются также как на восточной границе, являясь продолжением граничных условий внутрь области моделирования. При этом ВЗК задавалась с изгибами, размер и форма которых соответствовали данным спутниковых наблюдений.

В результате проведенных расчетов удалось выявить два типа изгибов ВЗК, при которых зарождаются крупномасштабные вихревые течения.

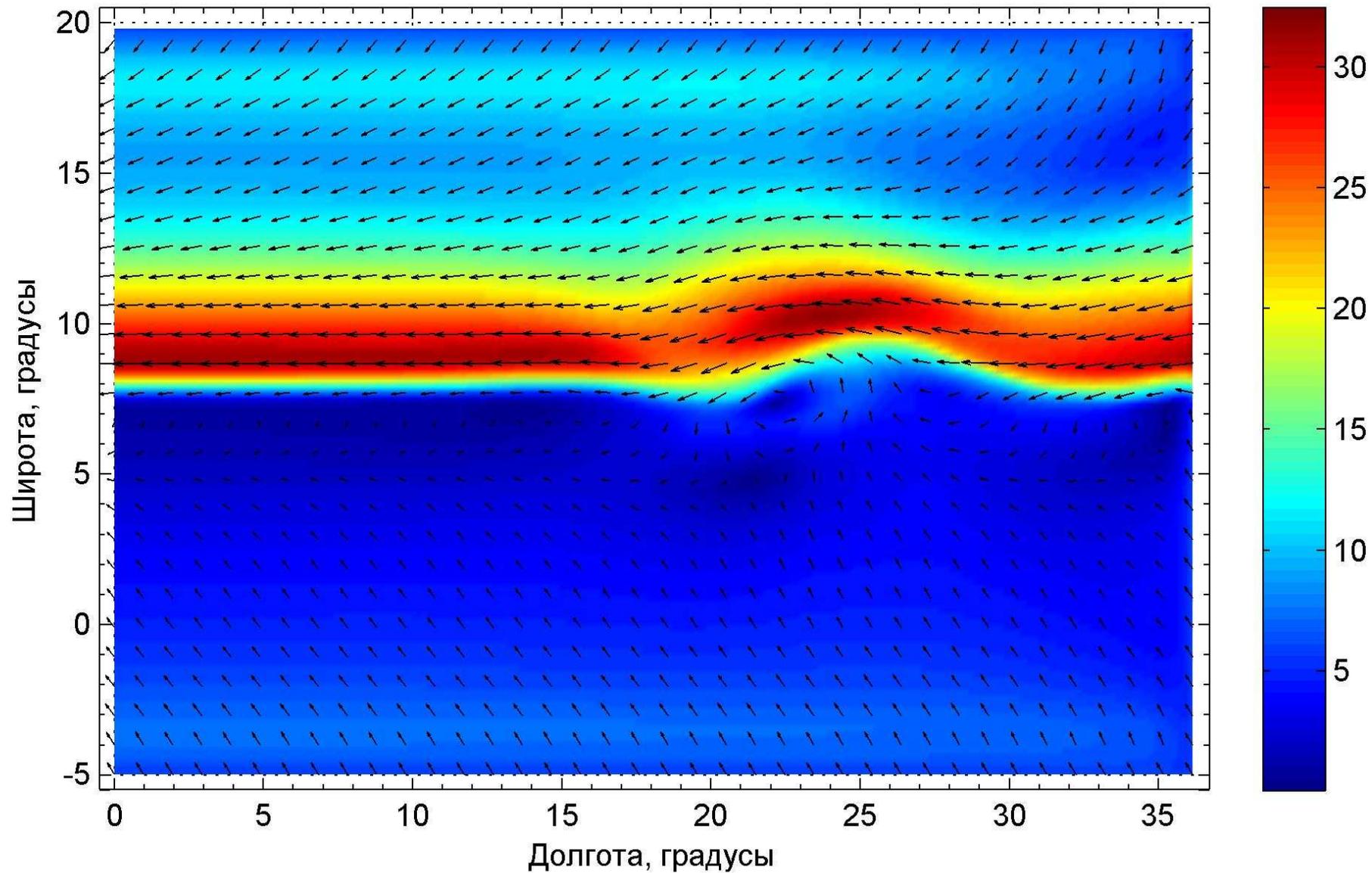
Первый тип характеризуется тем, что ВЗК имеет изогнутый на север участок длиной 800-1000 км с величиной максимального отклонения в меридиональном направлении 300 км или более, и при этом западный склон изгиба ВЗК имеет наклон существенно больший, чем восточный склон, а центральная линия зонального течения ВЗК к западу от изгиба может находиться южнее или севернее центральной линии этого течения к востоку от изгиба. В этом случае в течение суток на южной границе ВЗК формируется циклоническое горизонтальное вихревое течение.

Результаты расчетов для этого случая представлены на следующих рисунках.

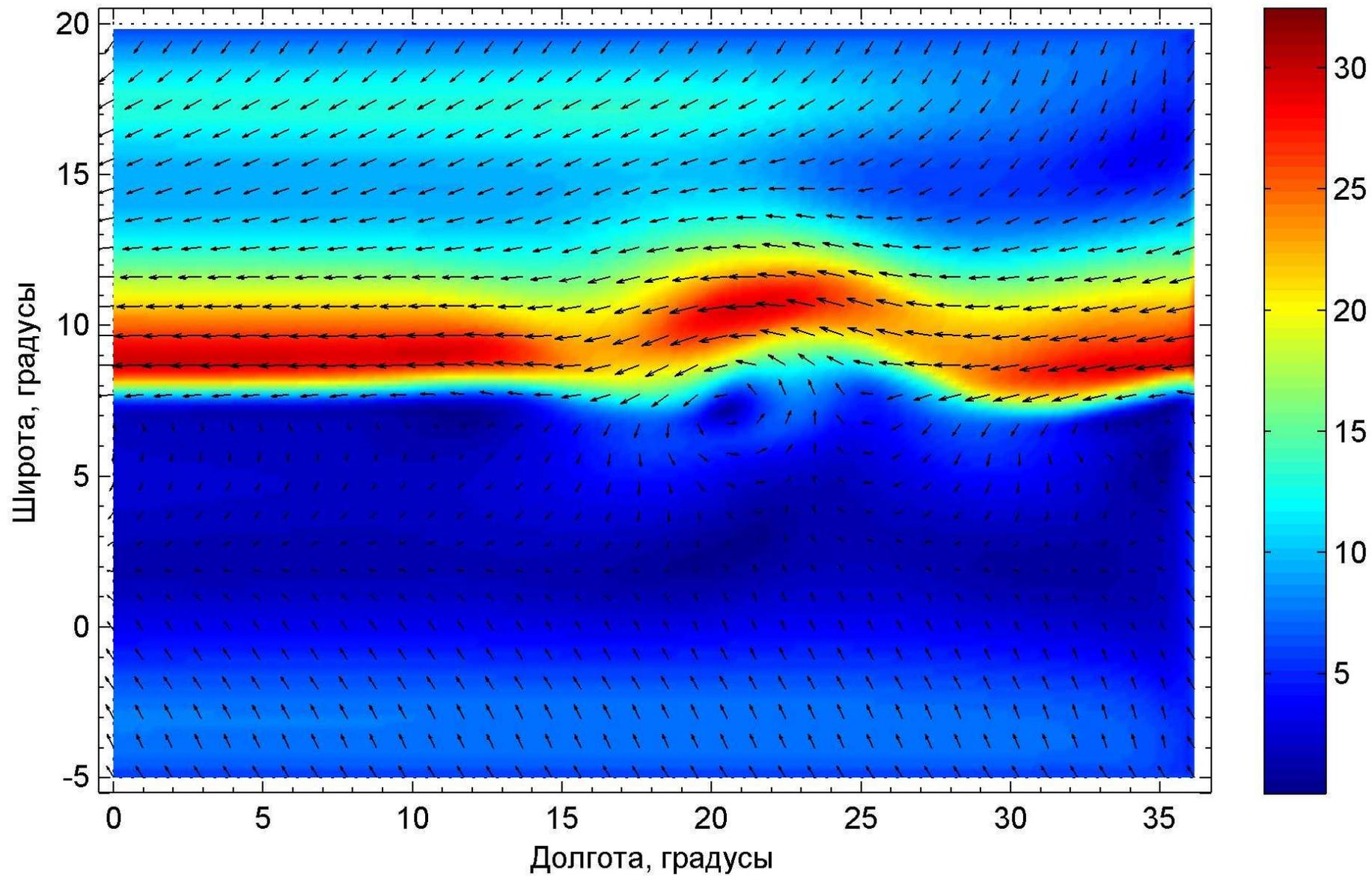
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км в начальный момент



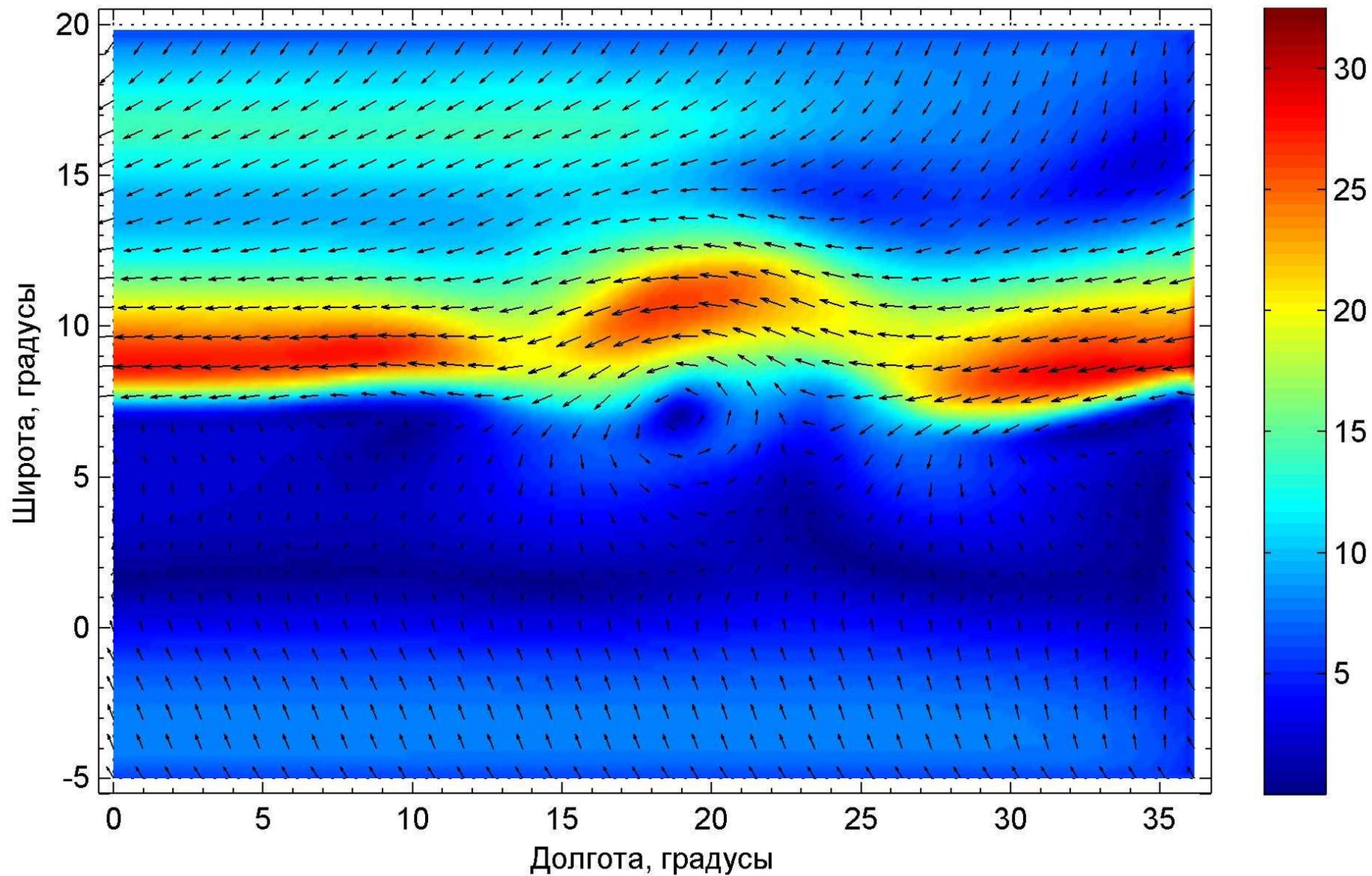
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 10 часов



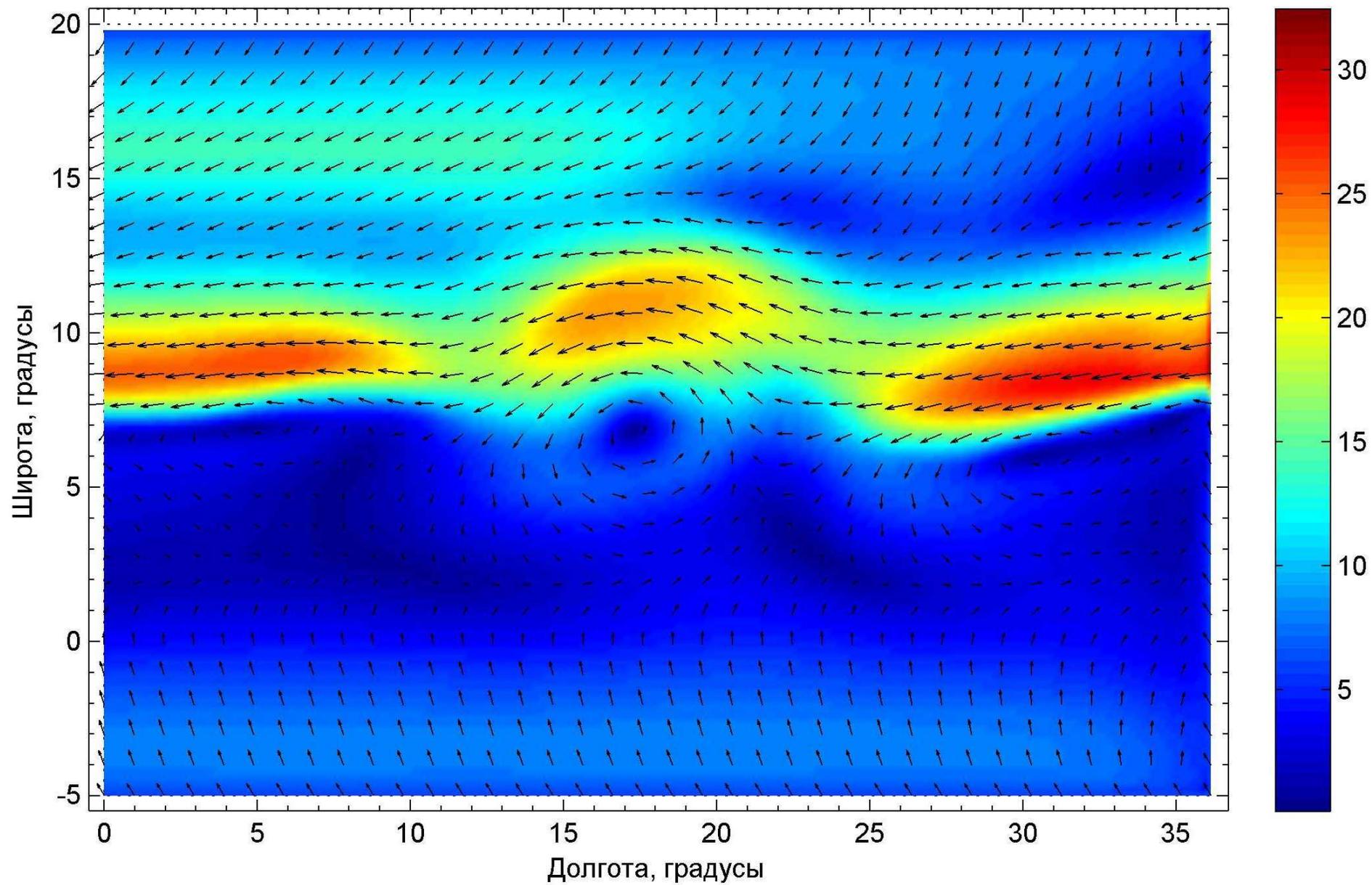
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 15 часов



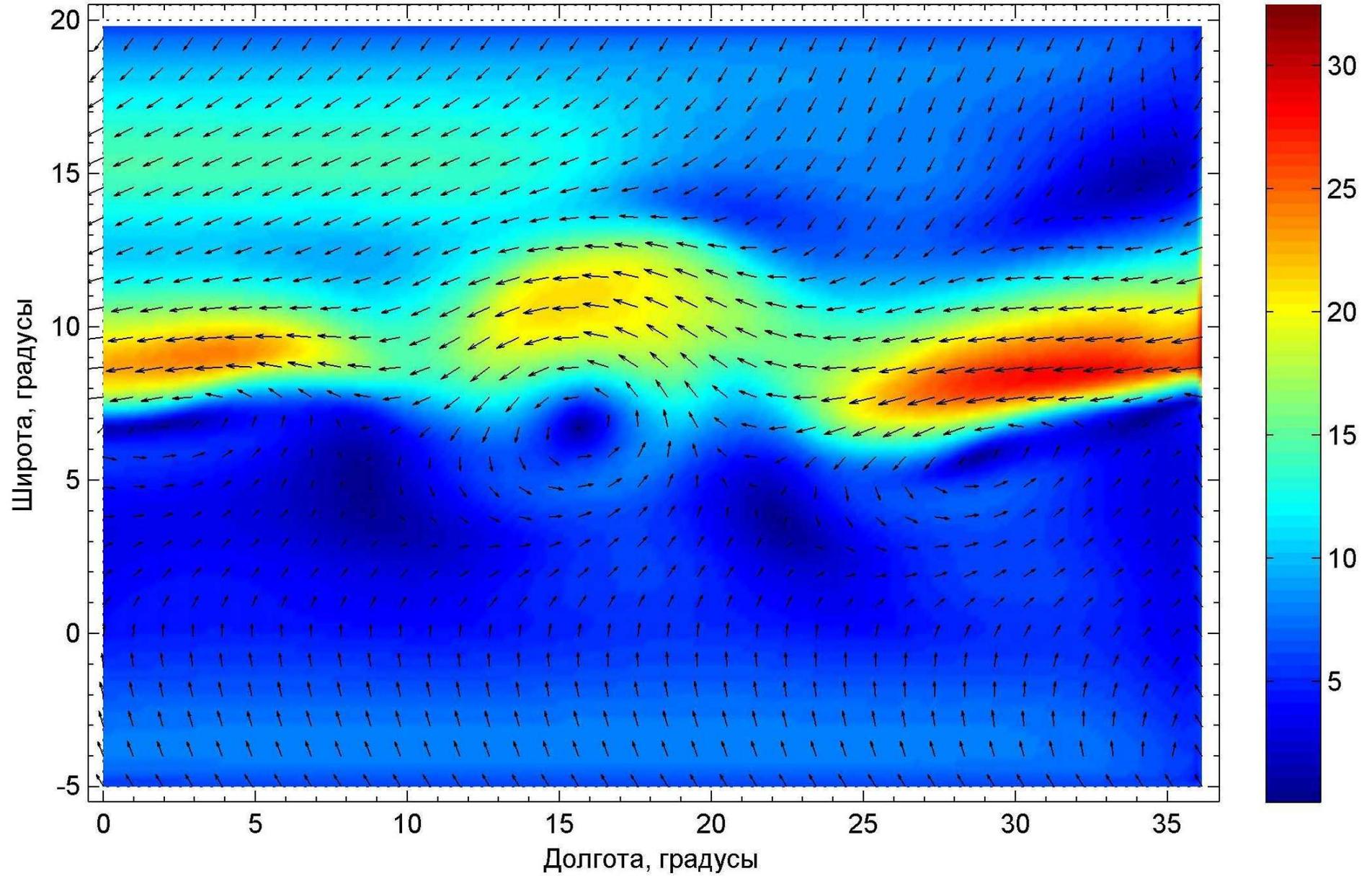
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 20 часов



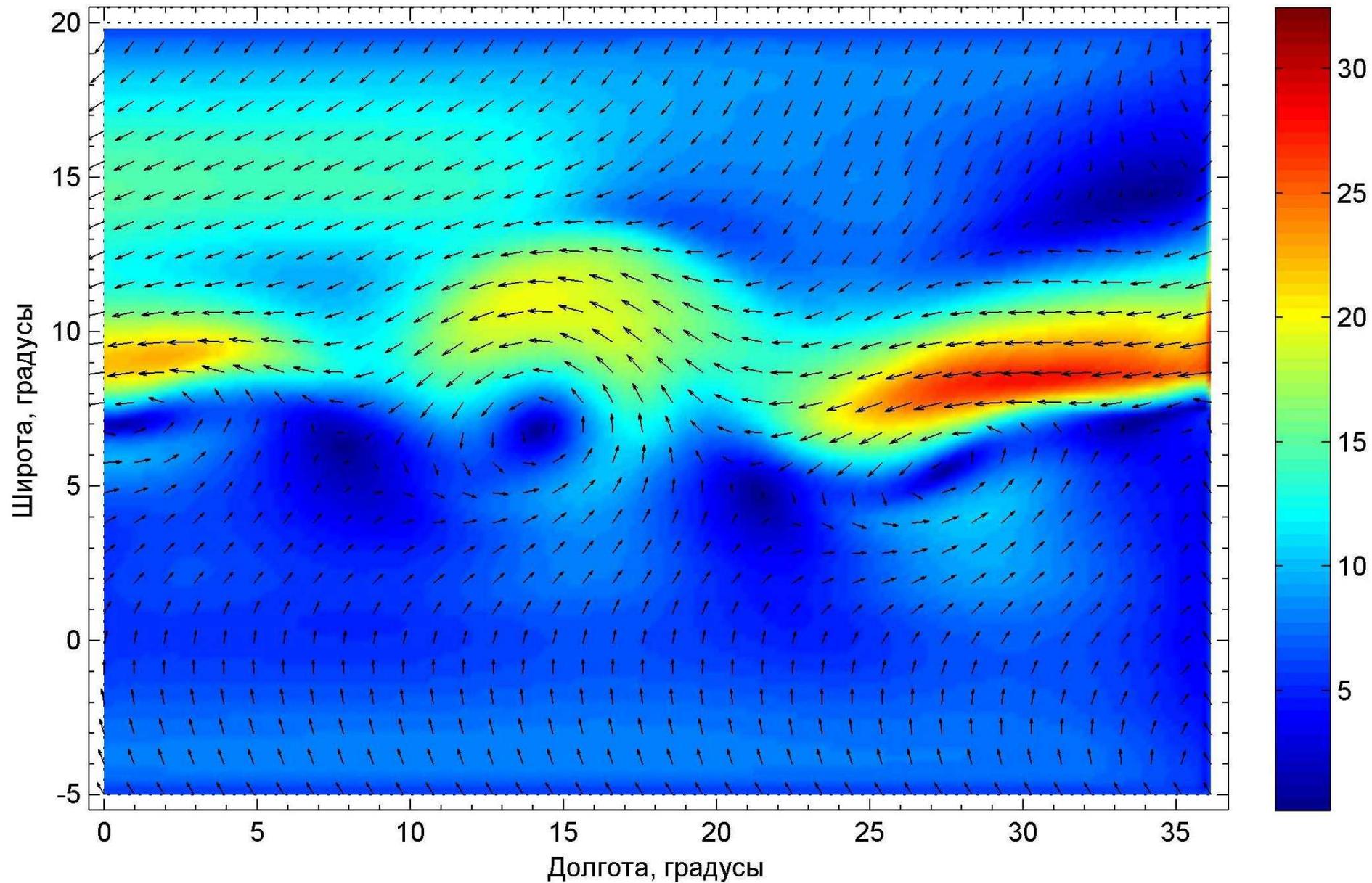
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 25 часов



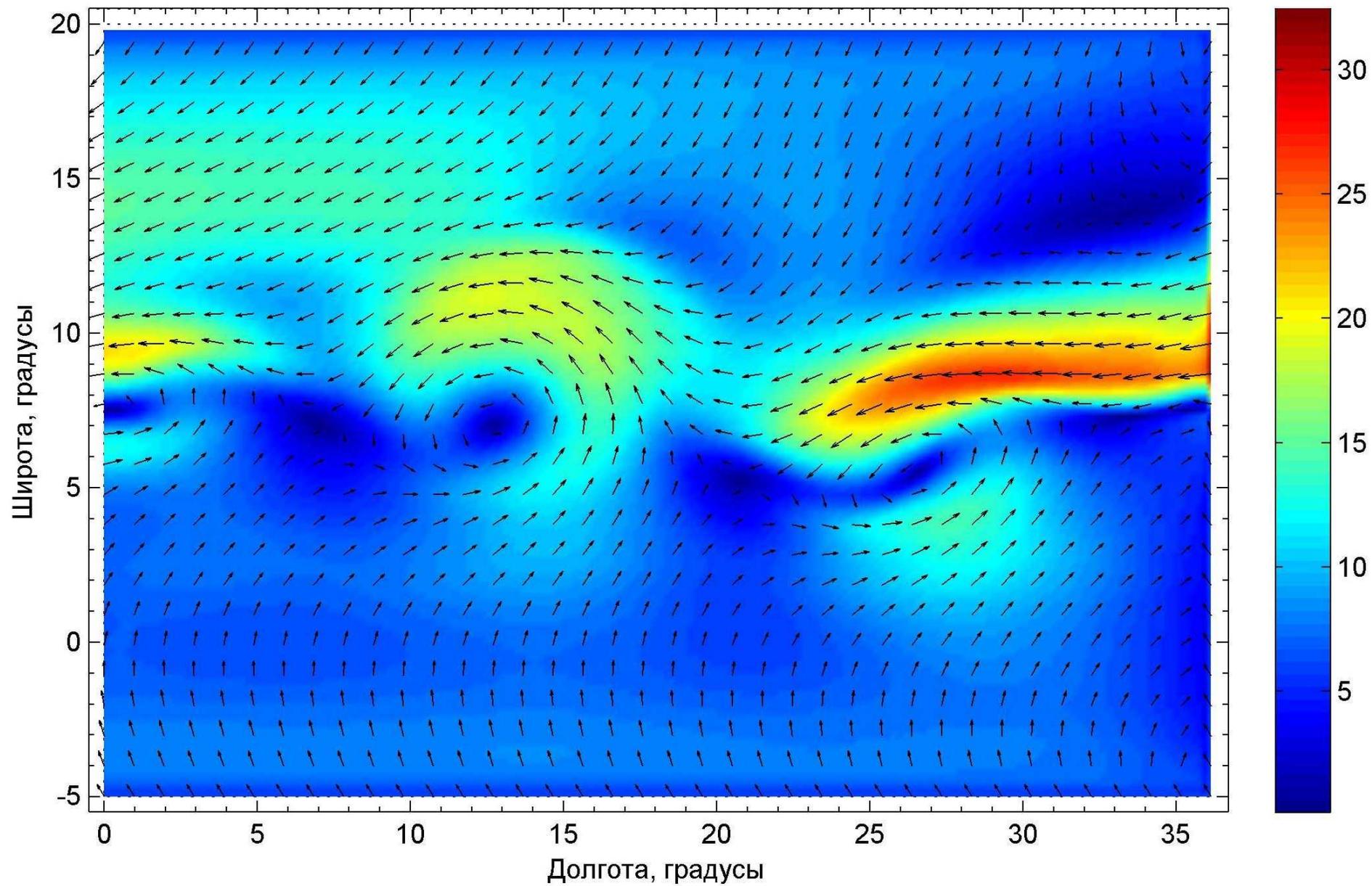
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 30 час



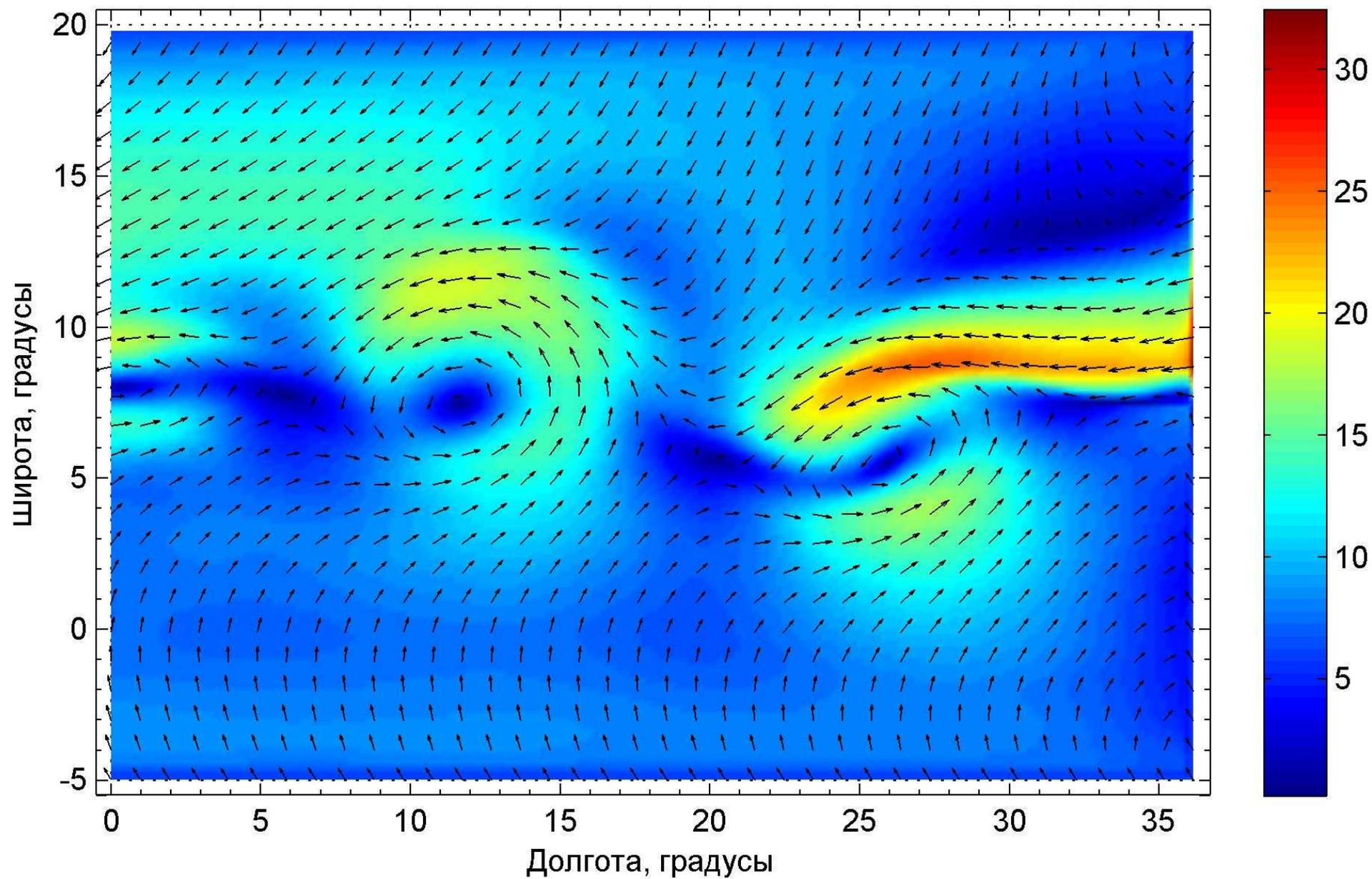
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 35 часов



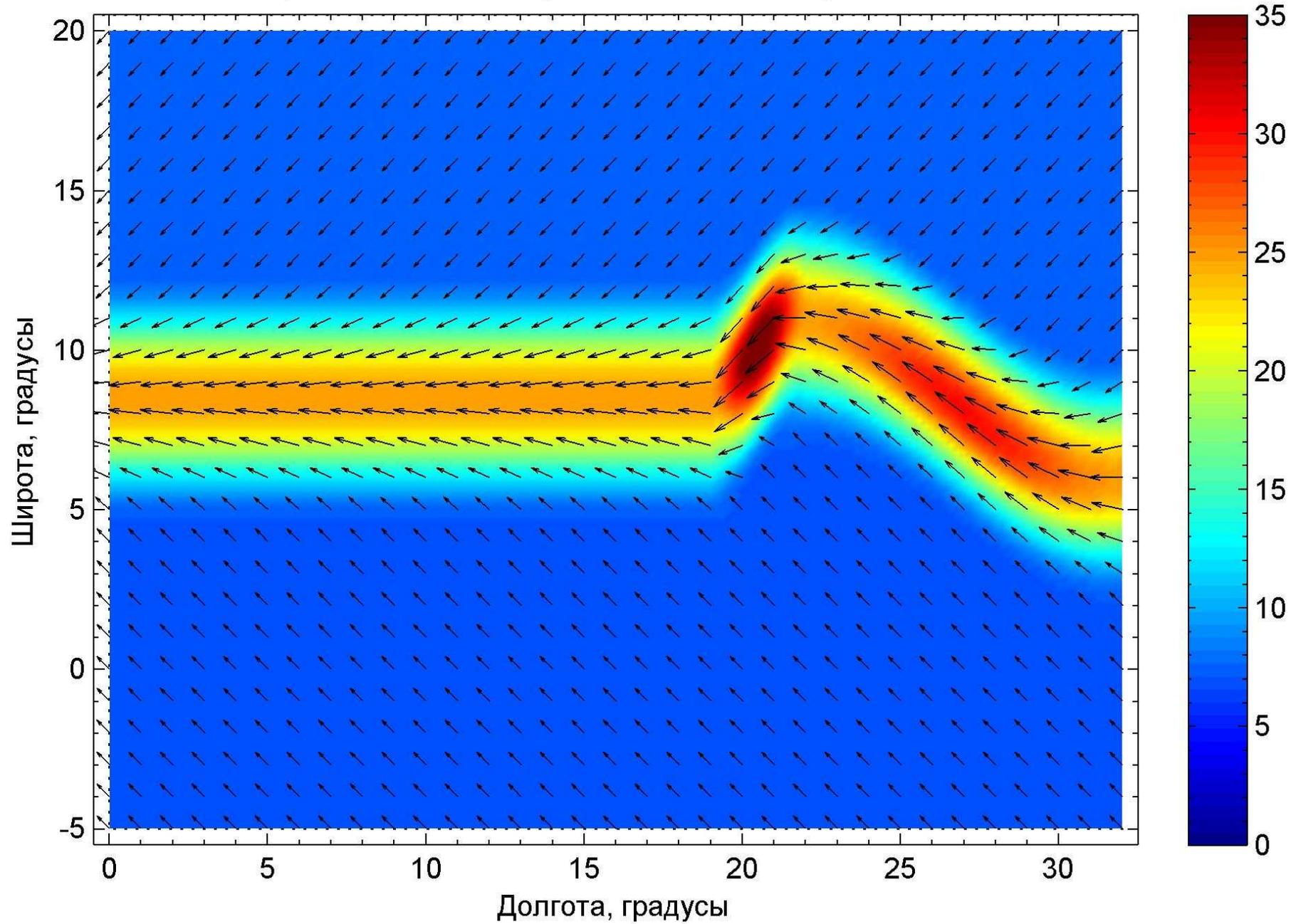
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 40 часов



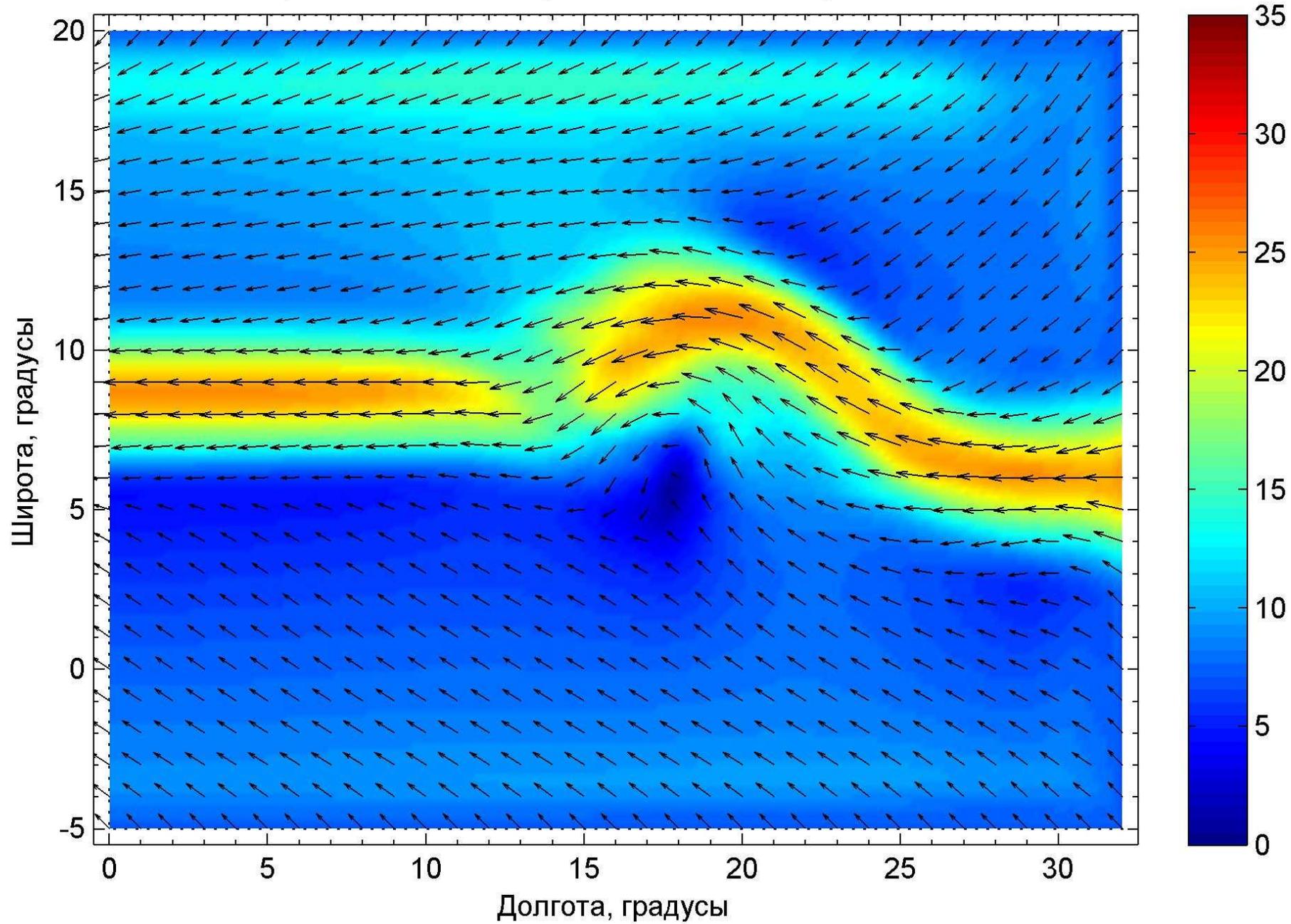
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 45 часов



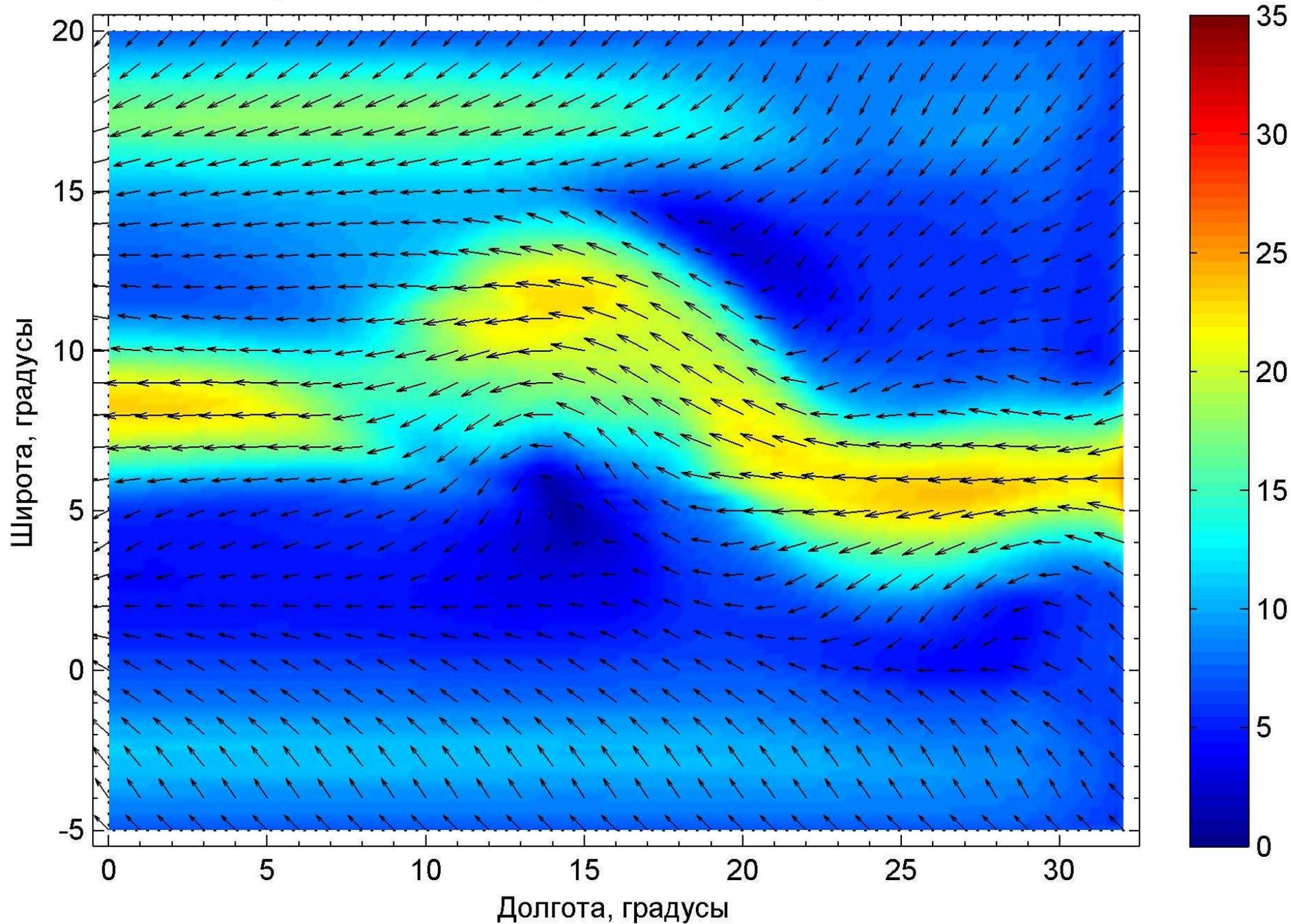
Горизонтальный ветер на высоте 600 м через 0 часов



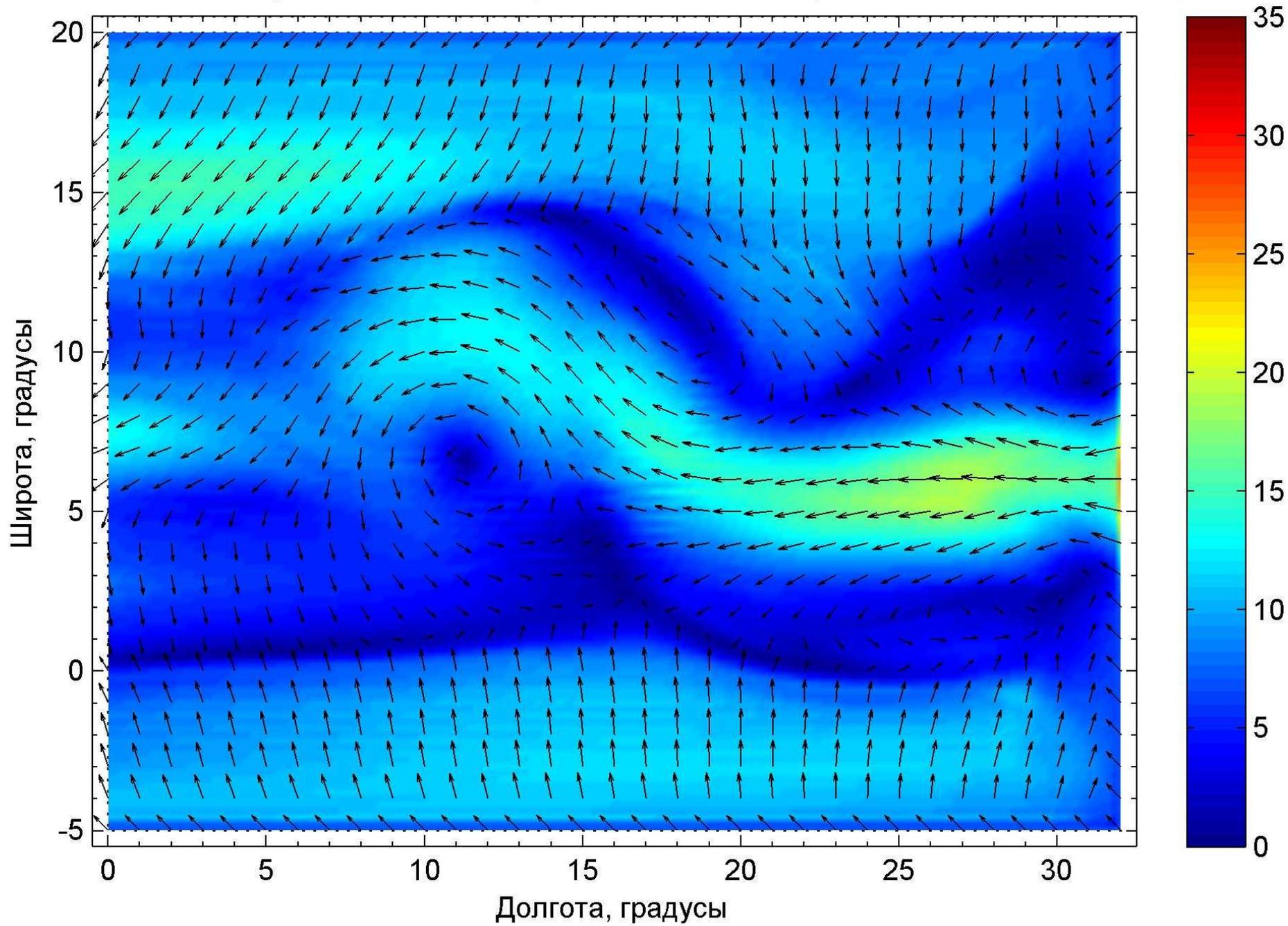
Горизонтальный ветер на высоте 600 м через 9 часов



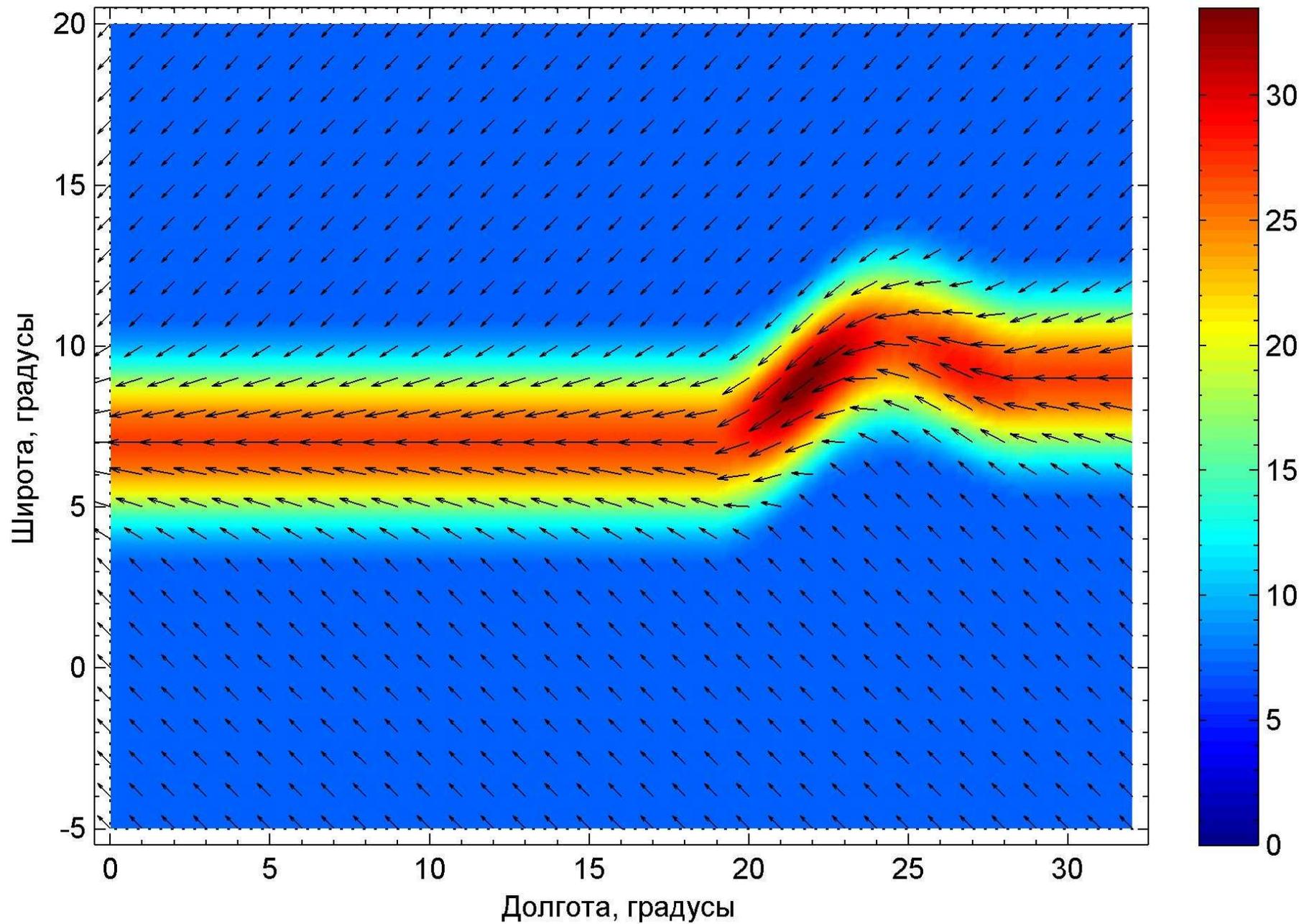
Горизонтальный ветер на высоте 600 м через 18 часов



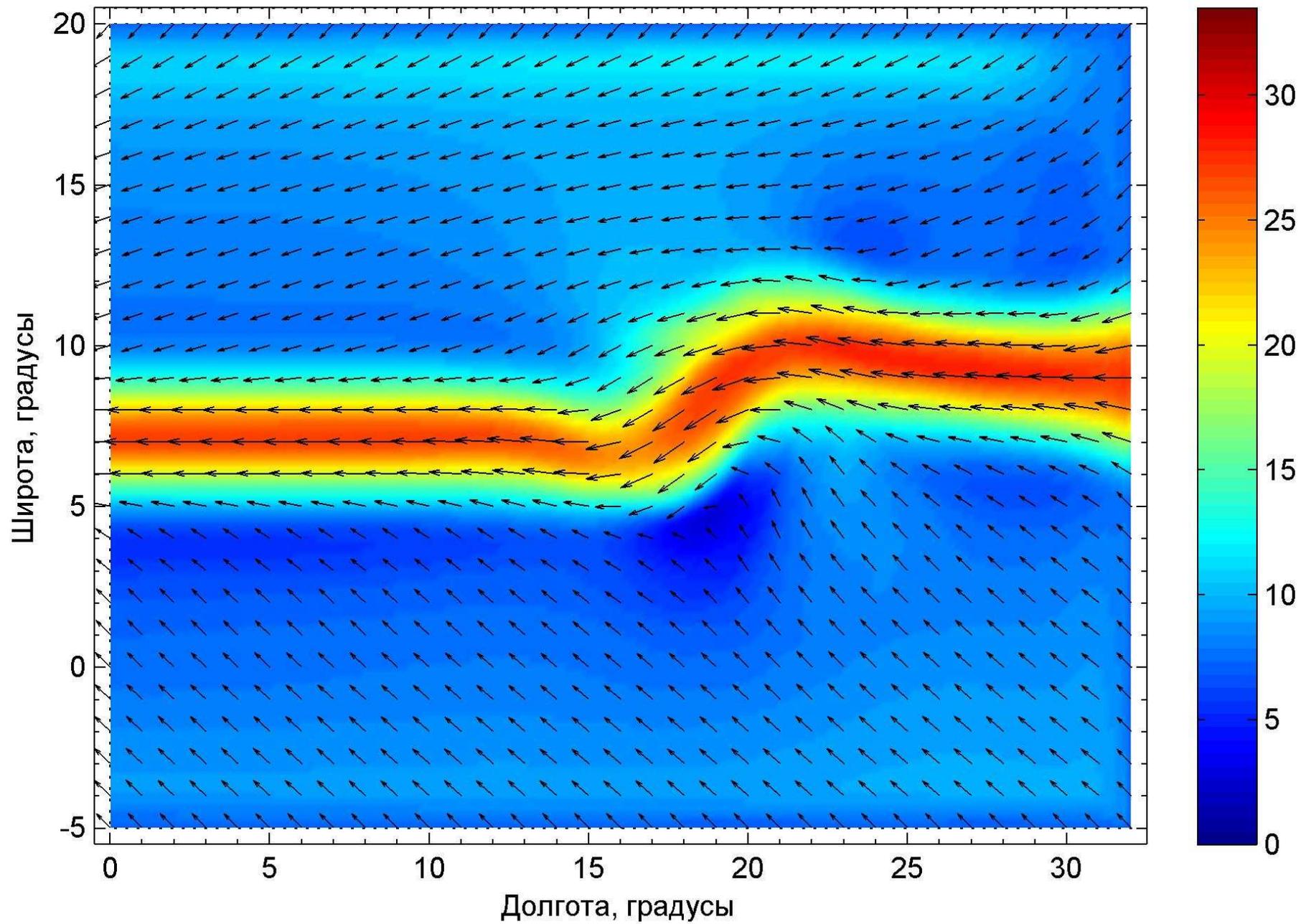
Горизонтальный ветер на высоте 600 м через 27 часов



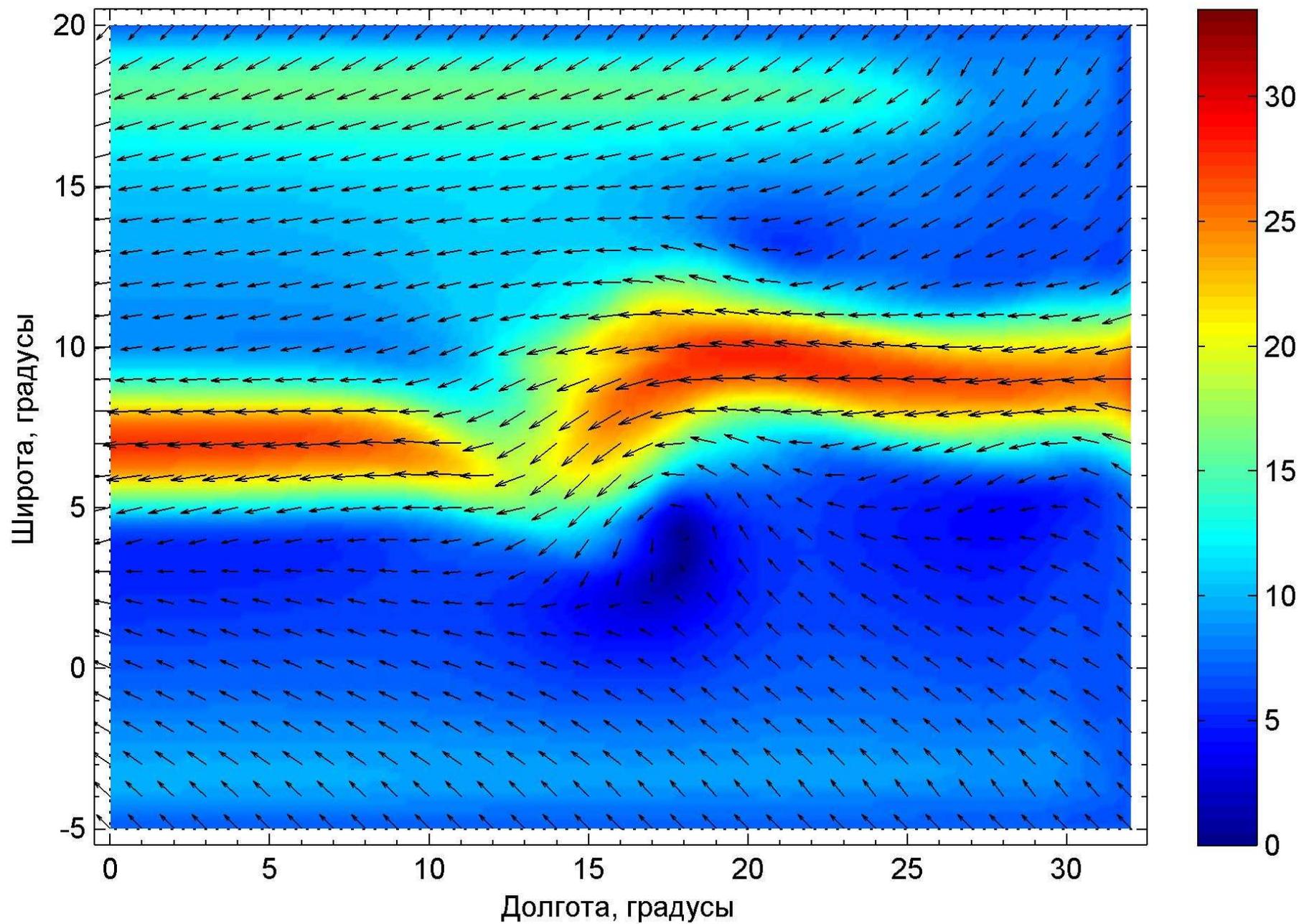
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 0 часов



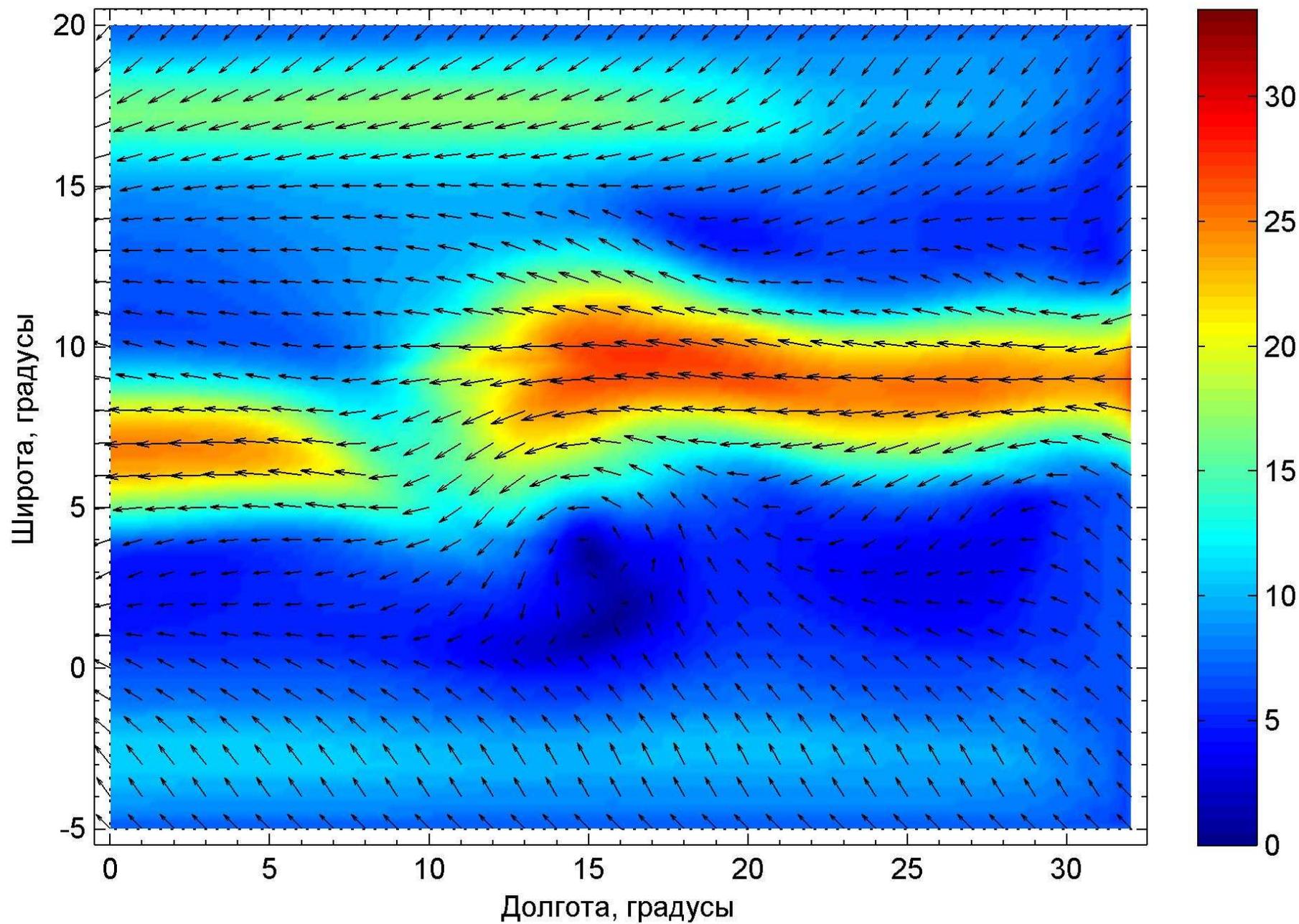
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 6 часов



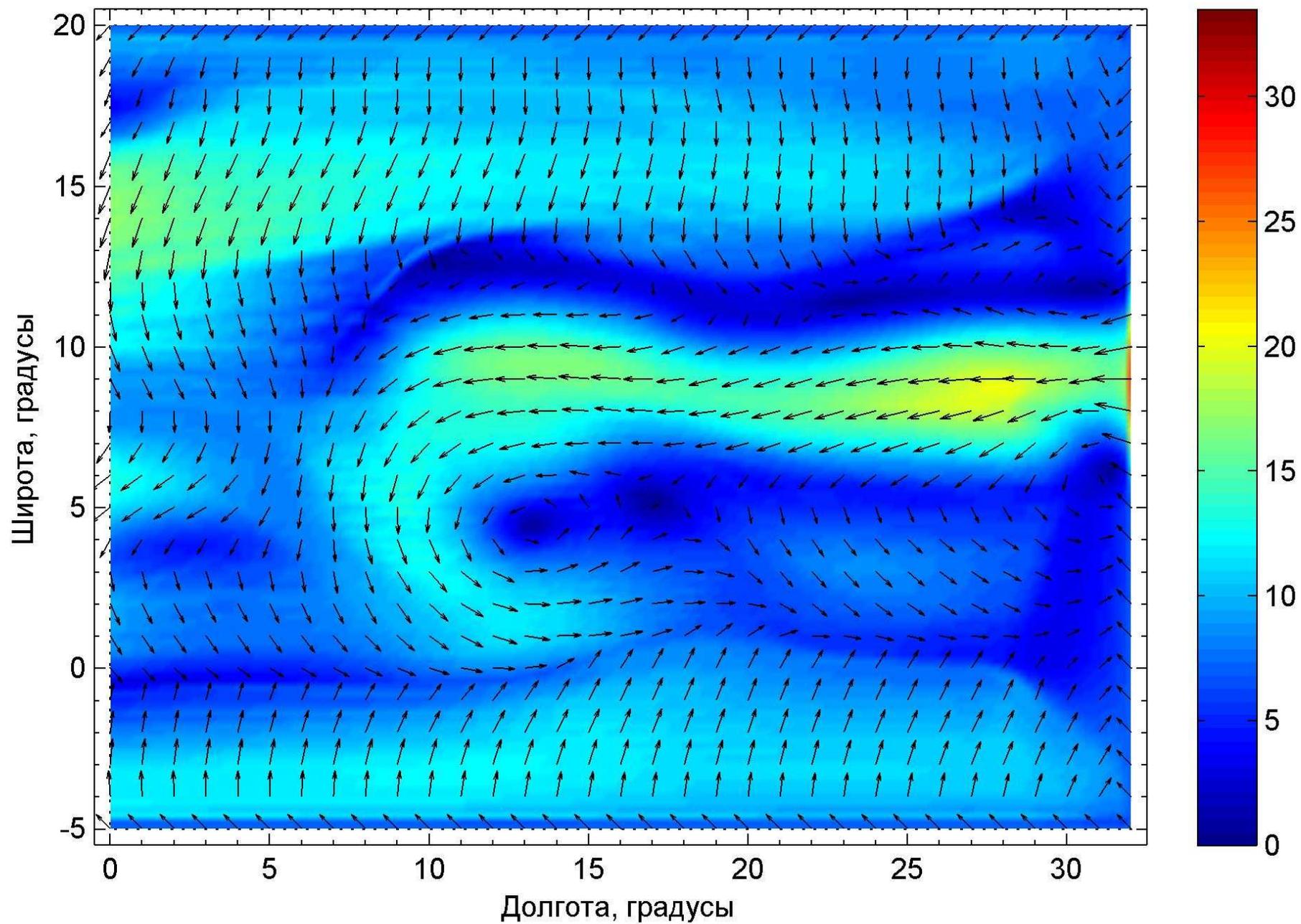
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 12 часов



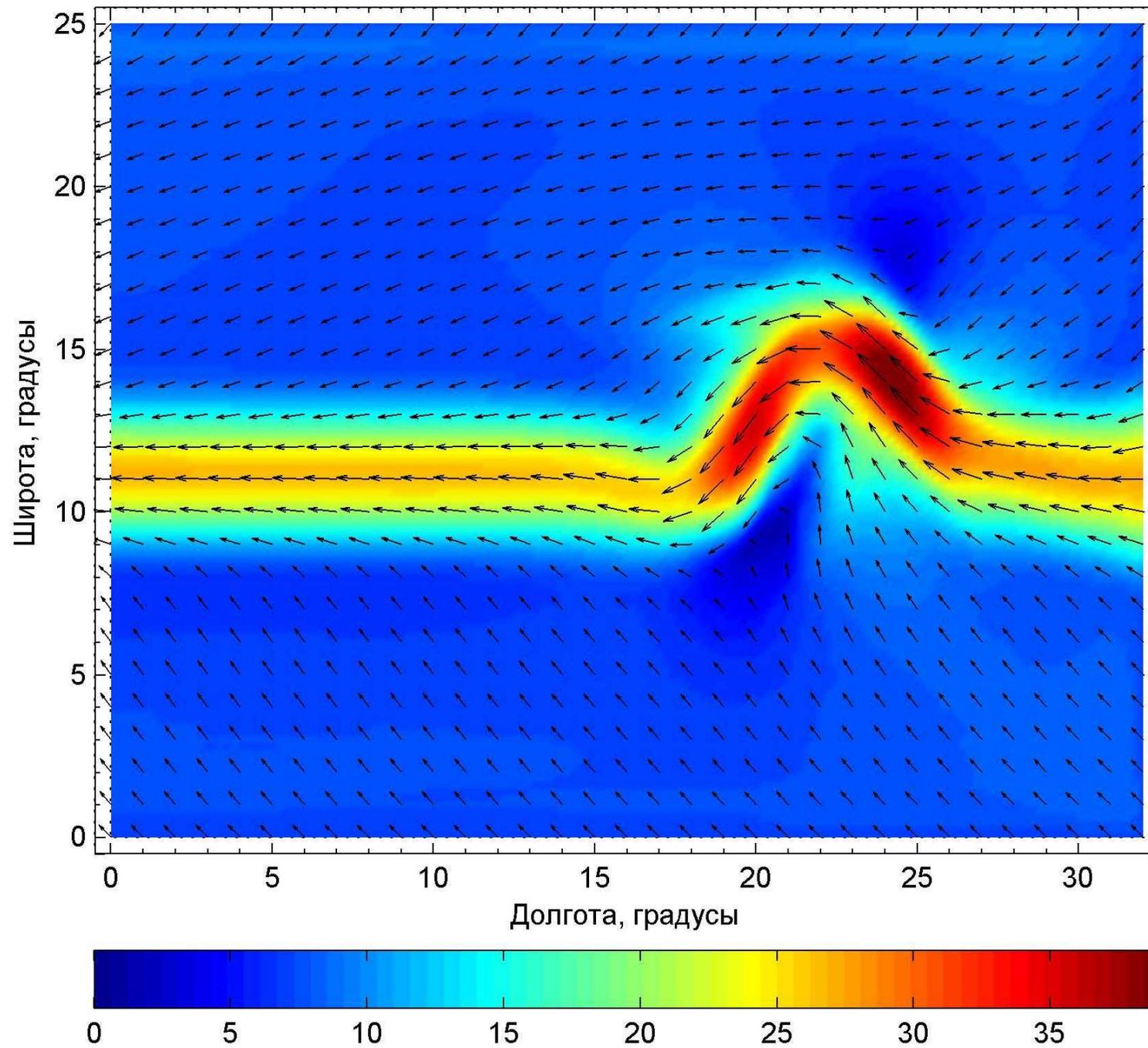
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 18 часов



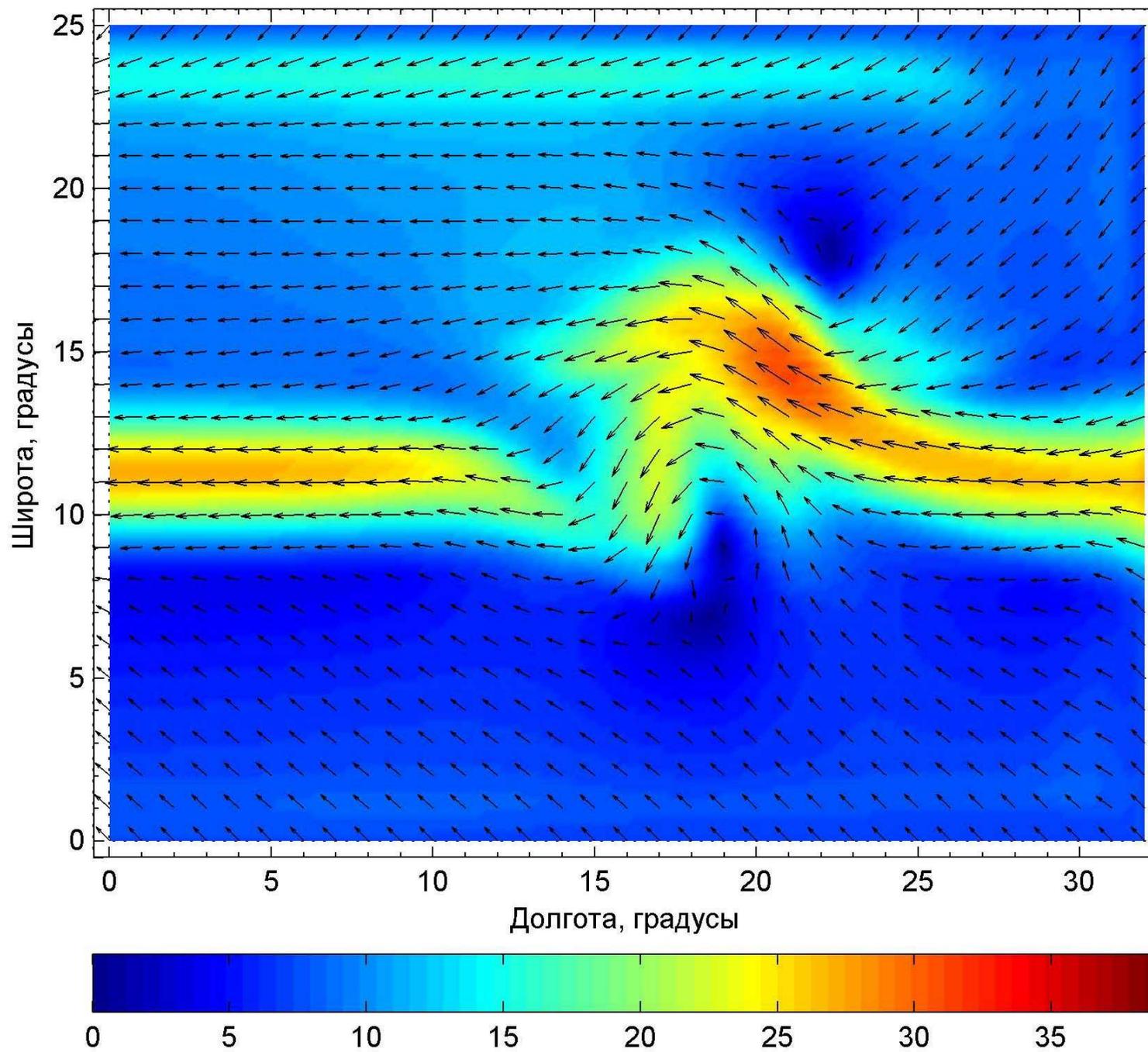
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 27 часов



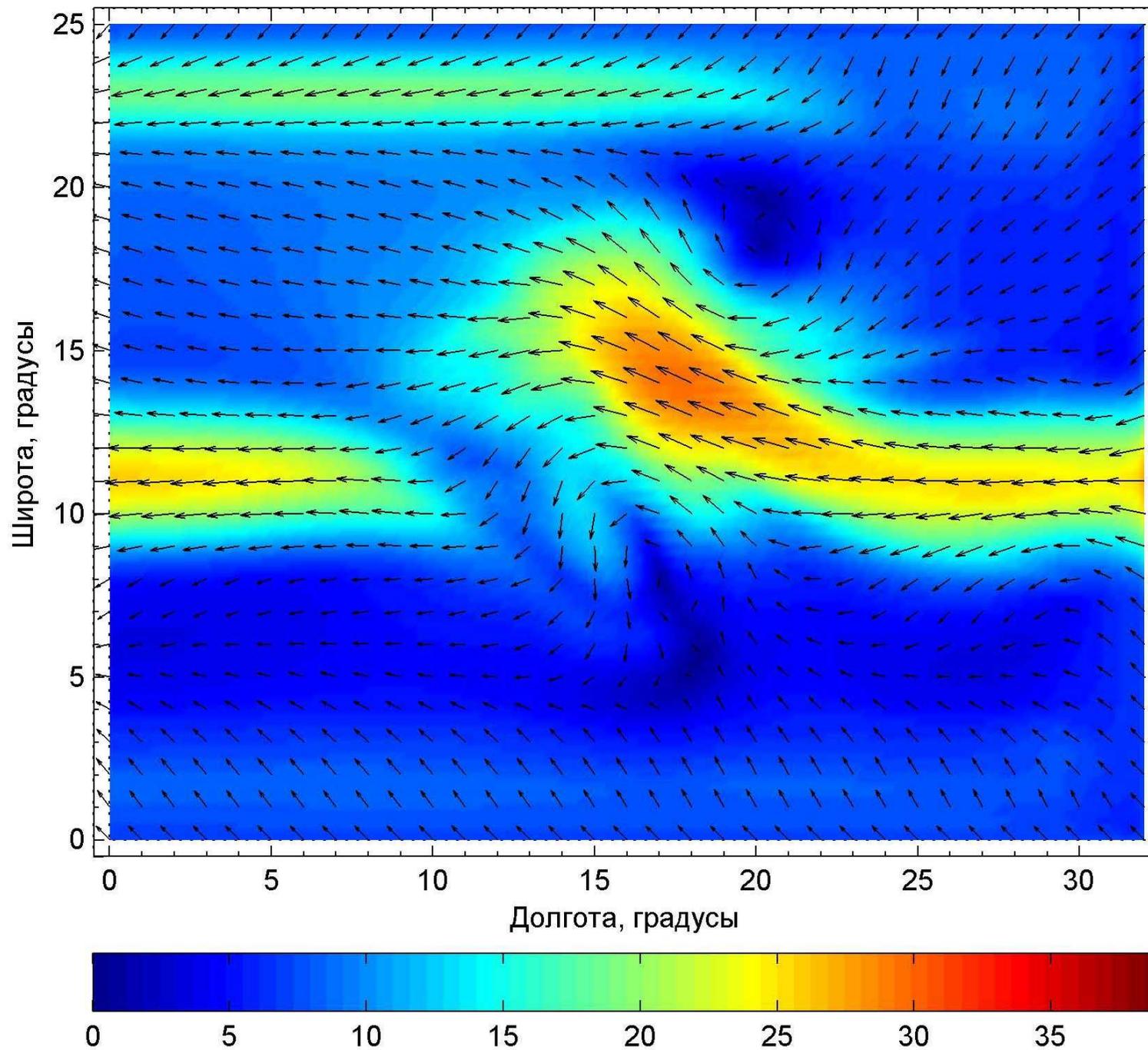
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 3 часа



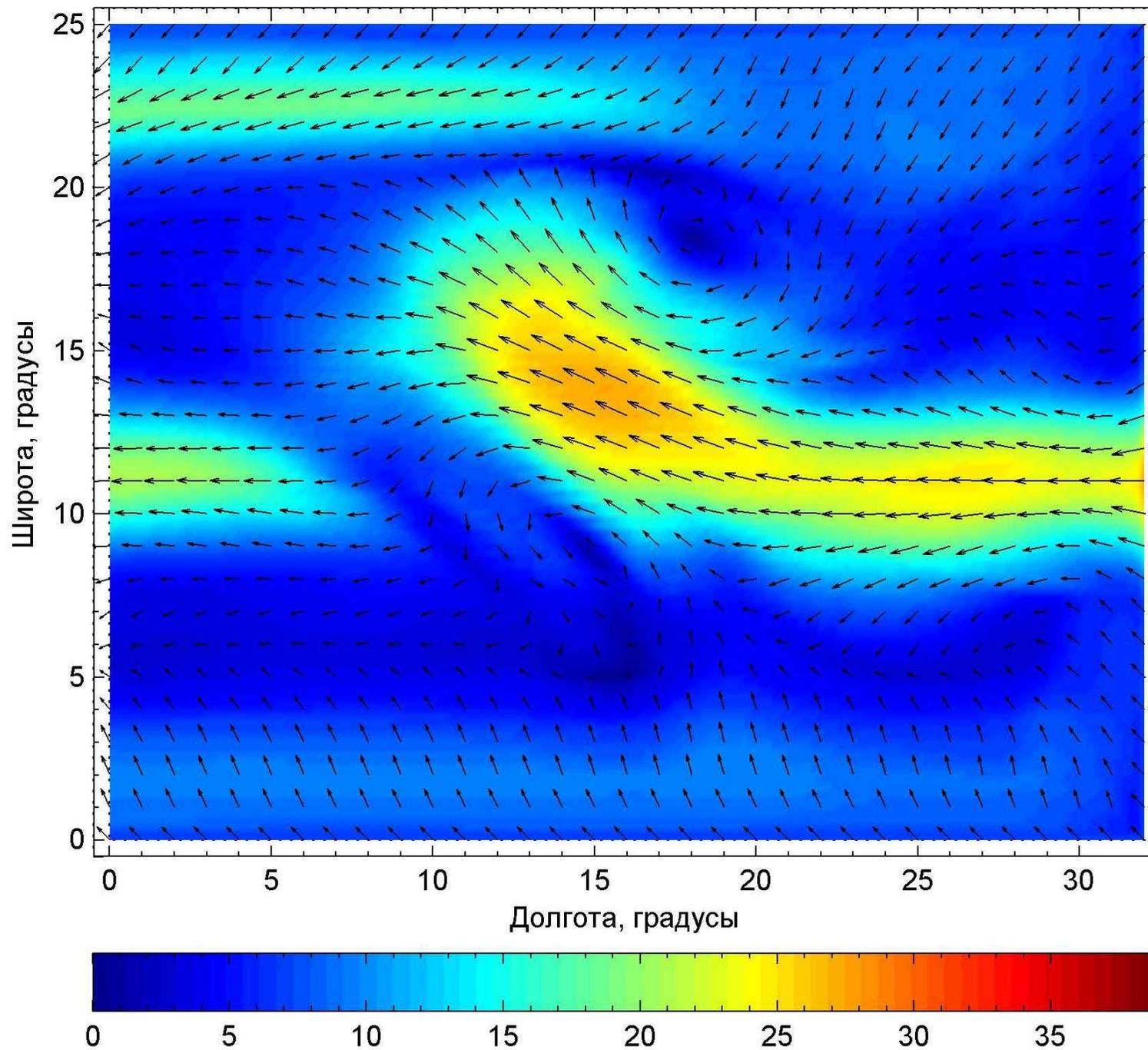
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 9 часов



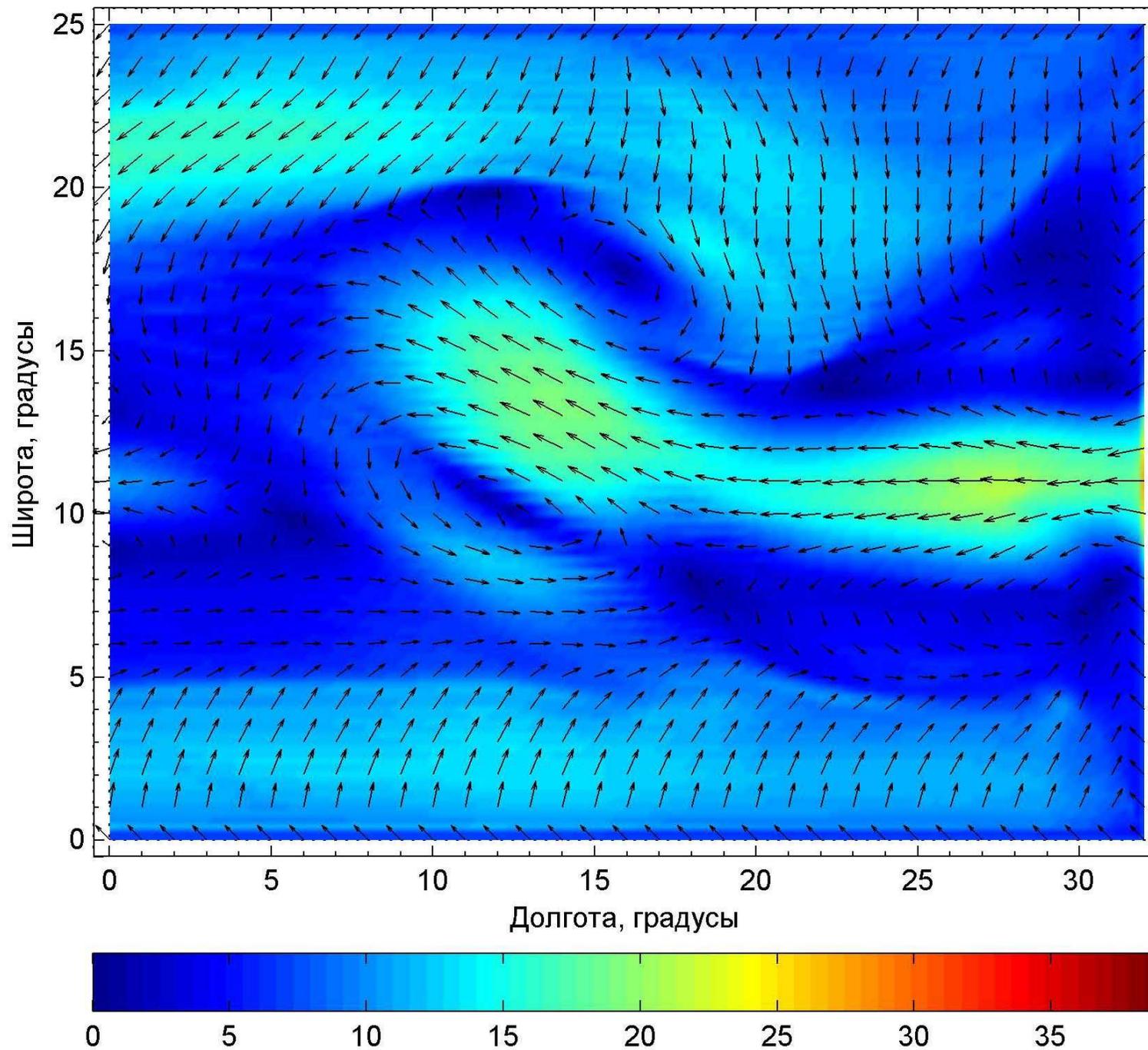
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 15 часов



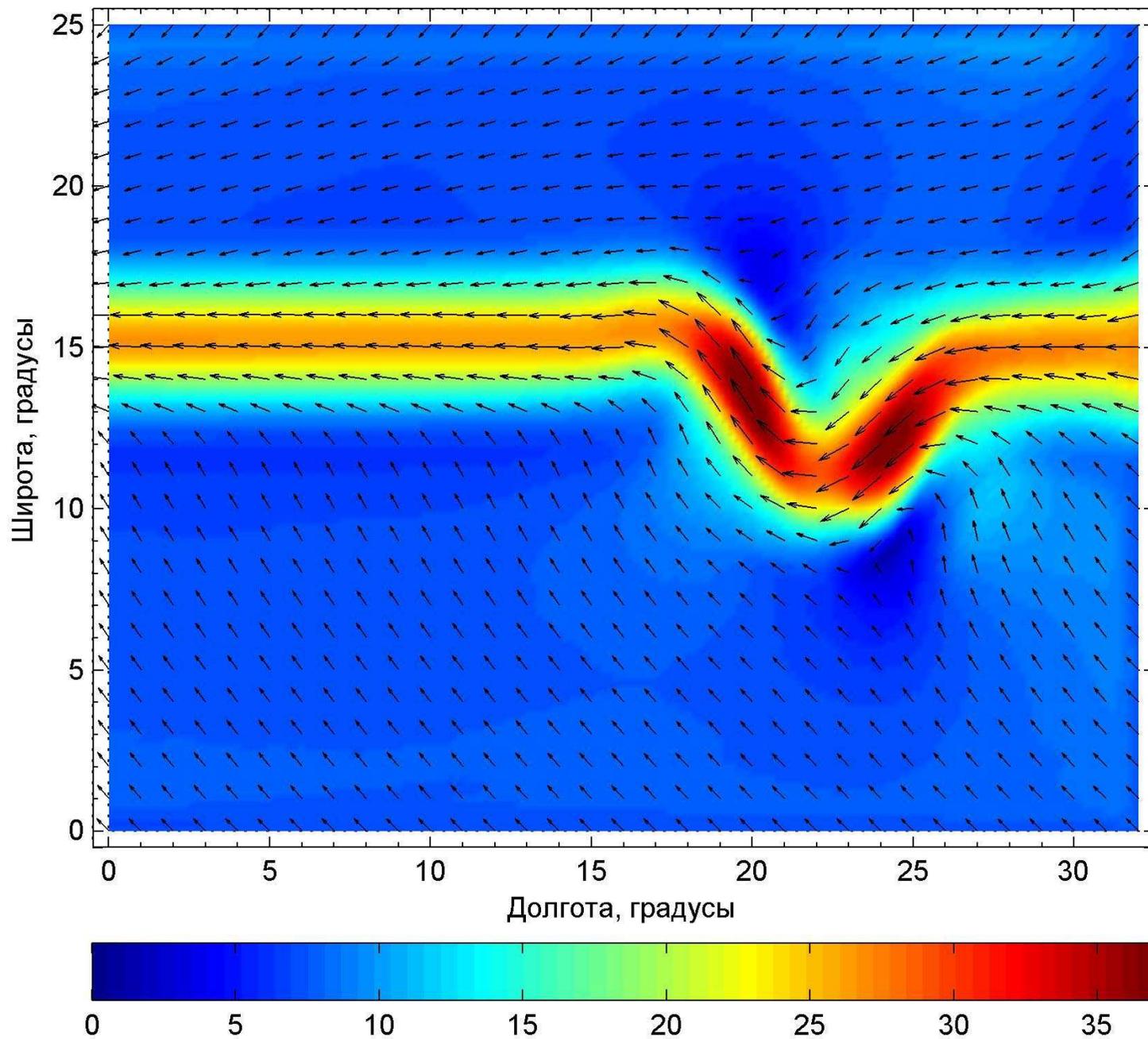
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 21 час



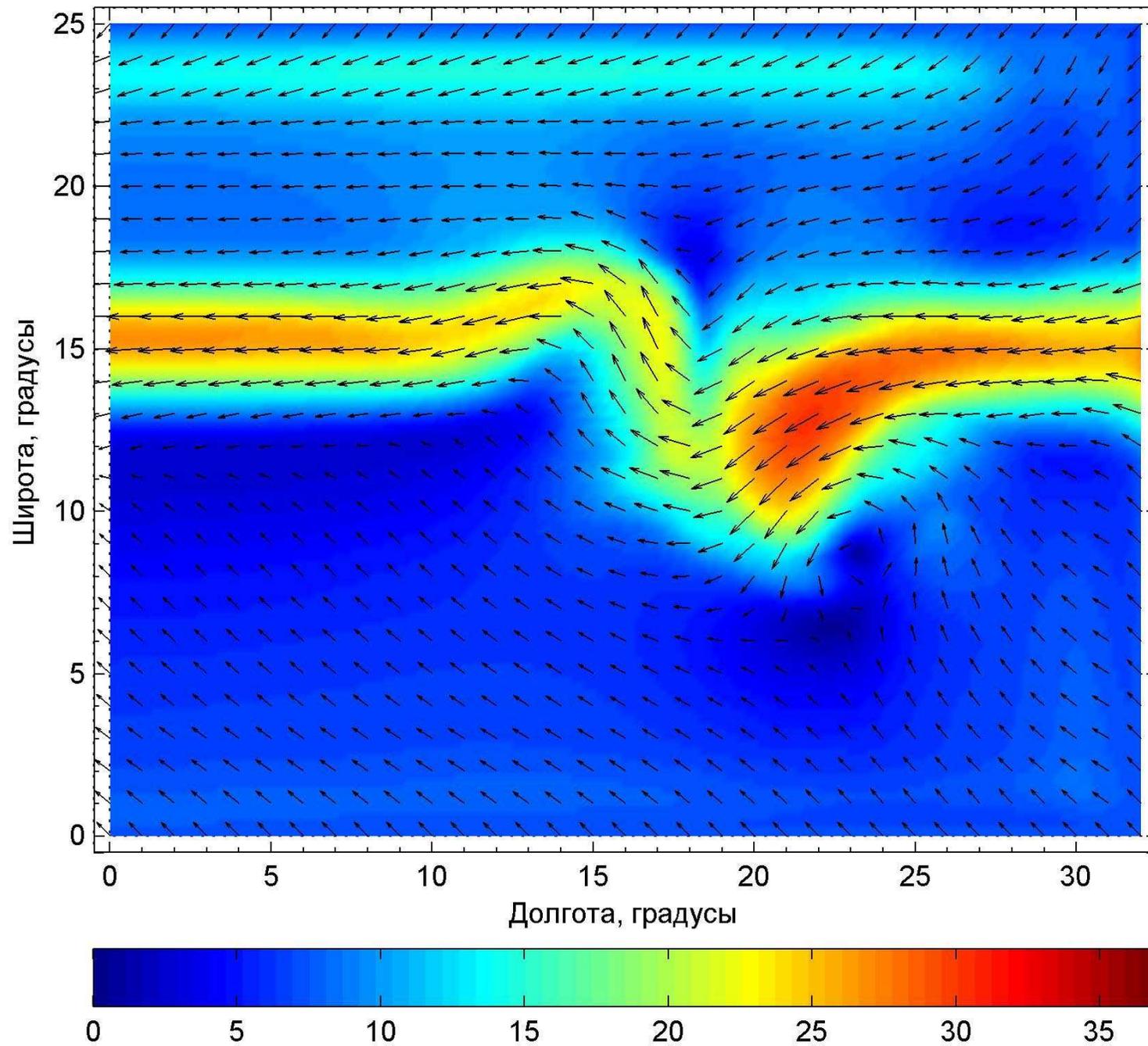
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 27 часов



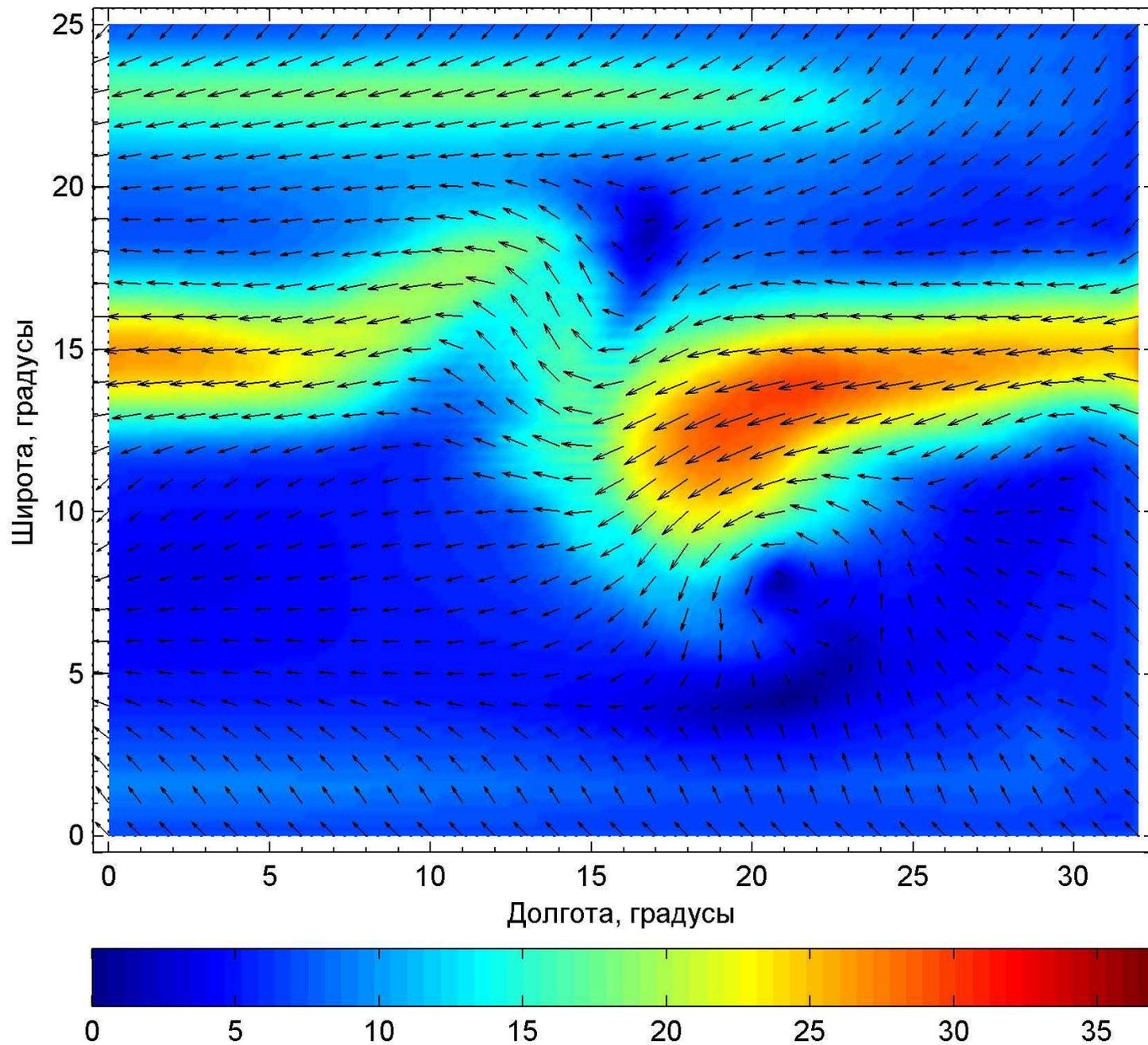
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 3 часа



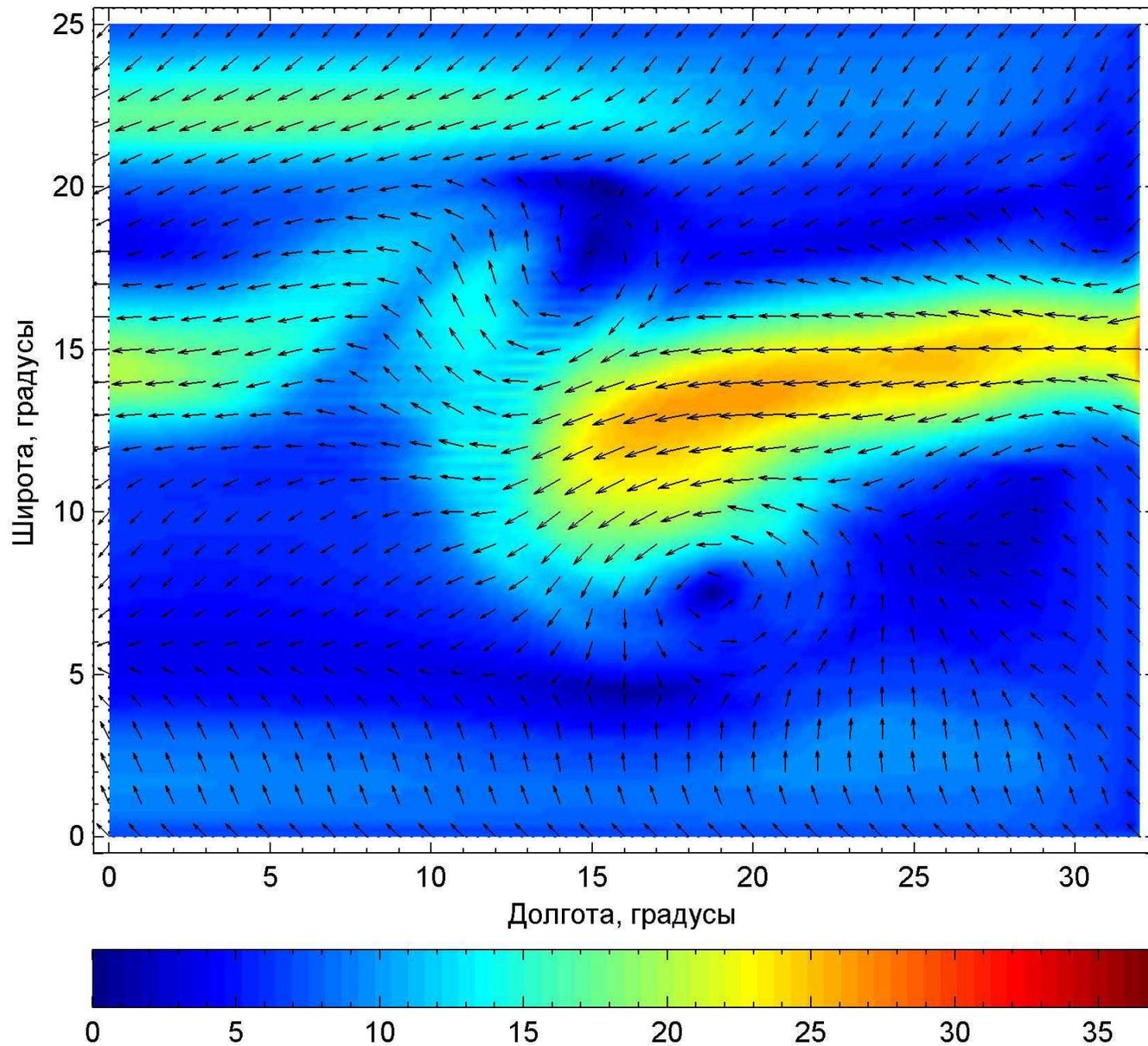
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 9 часов



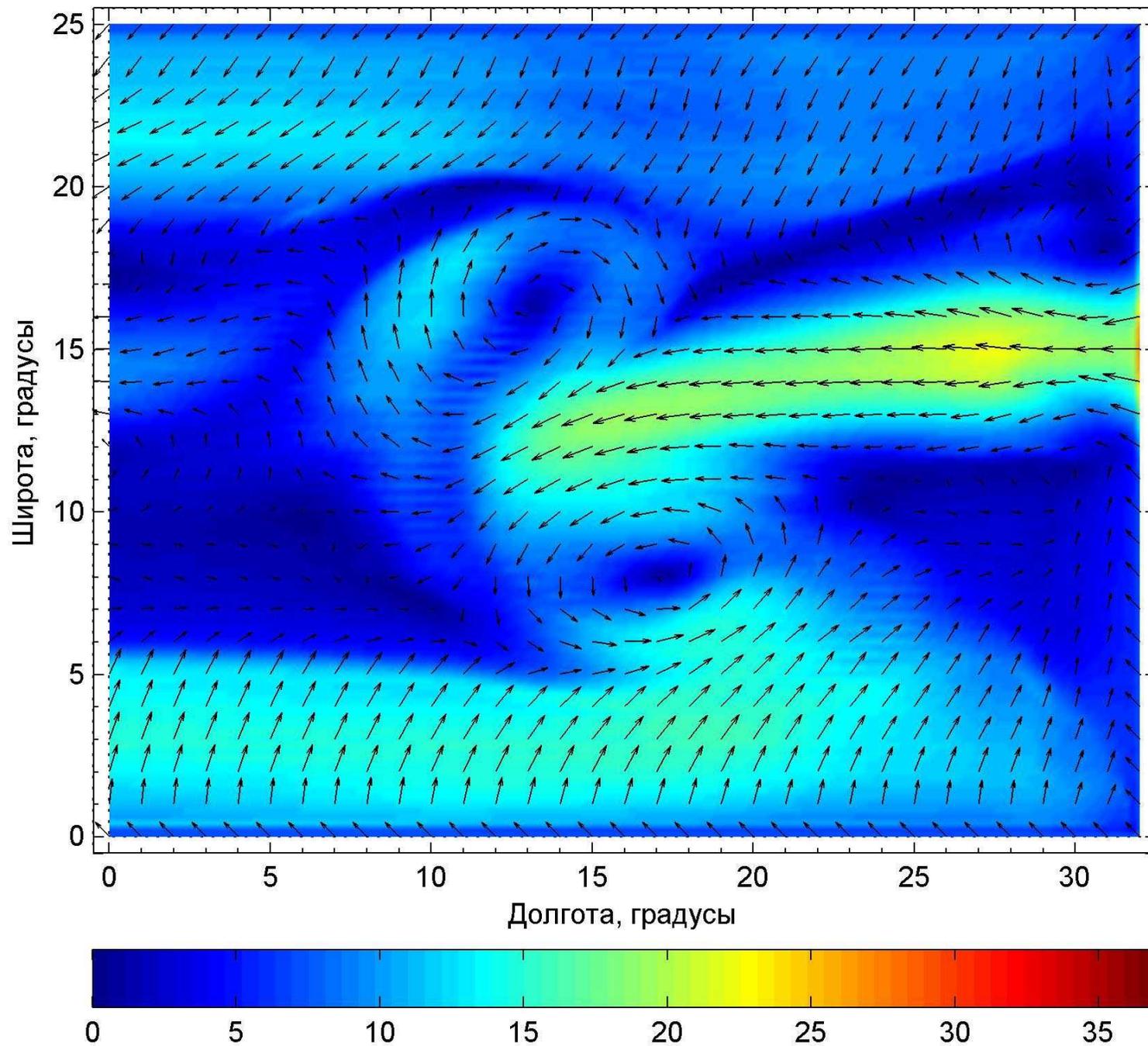
Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 15 часов



Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 21 час



Горизонтальный ветер на высоте 0.6 км через 27 часов



- главной физической причиной формирования крупномасштабных вихрей является возникновение изгиба ВЗК в период активного тропического циклогенеза и связанной с этим перестройкой некоторых элементов общей циркуляции атмосферы. Дальнейший разгон вихревых течений происходит за счет энергии, выделяющейся при конденсации водяного пара в восходящих потоках воздуха;
- достаточно сильные изгибы ВЗК являются предвестниками образования крупномасштабных циклонических вихрей, которые могут со временем либо затухнуть, либо развиться в тропический циклон, если первичный вихрь возник над океаном внутри теплой и влажной воздушной массы с достаточно большими горизонтальными размерами. Обнаружение таких изгибов ВЗК при помощи спутниковых наблюдений внутри теплой и влажной воздушной массы или на ее западной границе является сигналом, что высока вероятность образования тропического циклона или урагана.