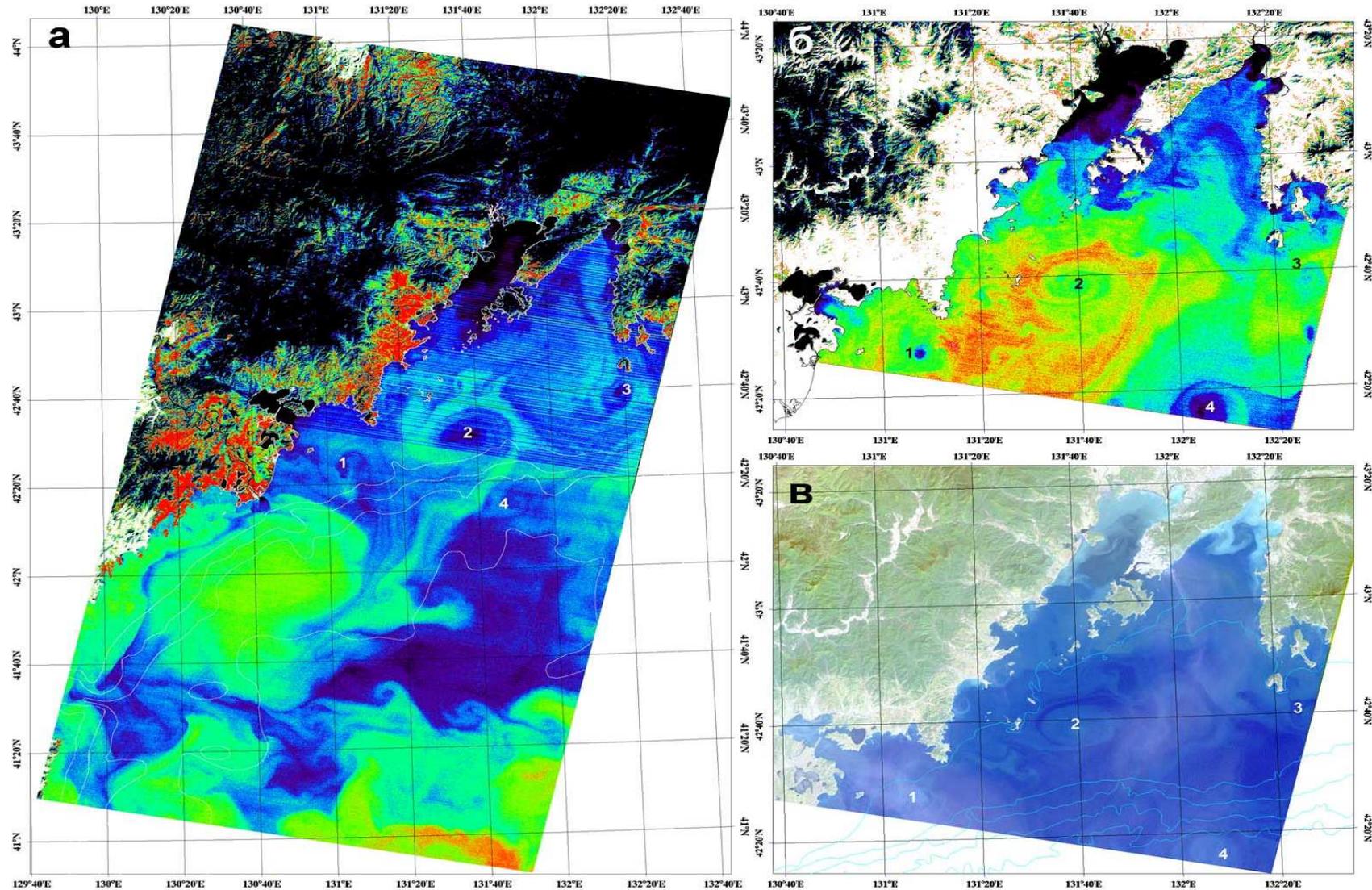


Разномасштабные вихри и струйные течения в заливе Петра Великого.

Дистанционные наблюдения и численный эксперимент

Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН



Основная цель работы –

показать особенности вихревой динамики в районе залива Петра Великого и прилегающей части Японского моря используя :

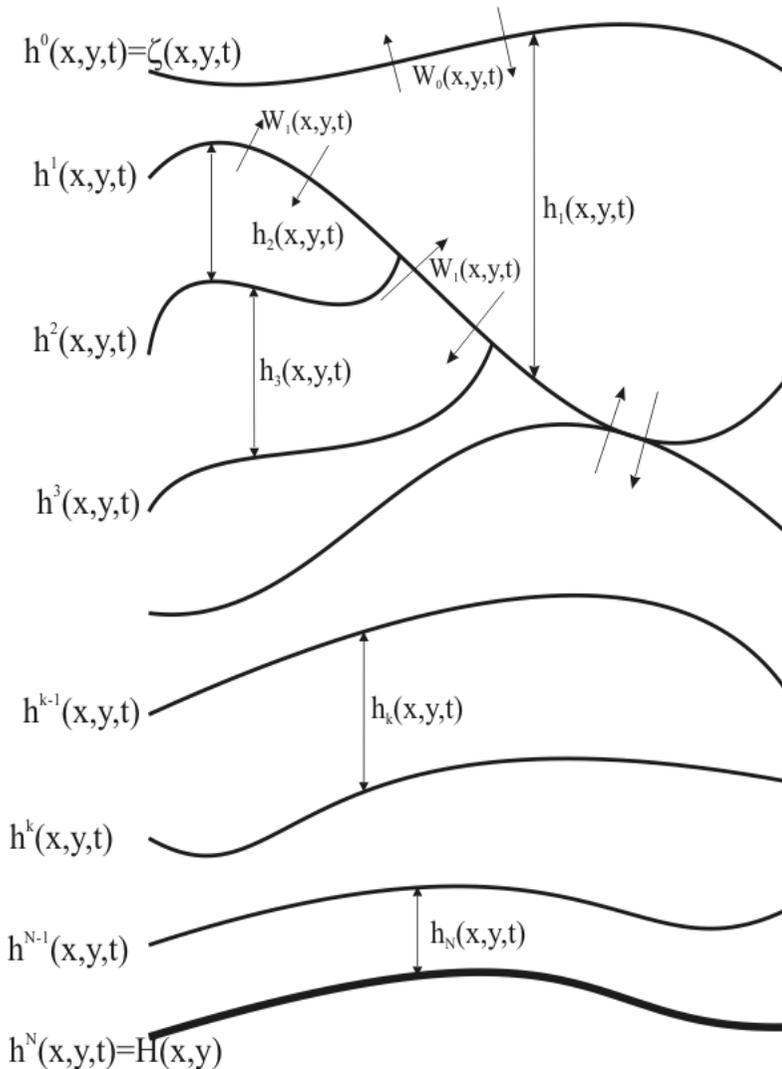
- спутниковые наблюдения (MODIS, Landsat-5, УК диапазоны, спектрорадиометр) и
- численную квази-изопикническую (слоистую) модель циркуляции моря в Z-системе координат с граничным условием свободной поверхности для уровня моря. Модель разработана Н.Б. Шапиро и Э.Н. Михайловой (2001) в Морском гидрофизическом институте (г. Севастополь).

Программа модели усовершенствована О.О. Трусенковой с целью быстрого применения для любых морских акваторий и адаптирована для условий Японского моря (2003, 2005).

Численные эксперименты выполнялись на сетке около 1.8 км с шагом по времени 4 минуты при минимальных коэффициентах придонного трения, горизонтальной бигармонической вязкости, горизонтальной диффузии теплом и солью.

MHI Ocean Circulation Model

The MHI model is the 3D primitive equation layered model with free surface boundary condition.



The assumption of a layered model is that the sea consists of N layers of variable thickness:

$$h_1, h_2, h_3, \dots, h_N$$

where:

$$h_1(x, y, t) = h^1(x, y, t) - \zeta(x, y, t)$$

.....

$$h_k(x, y, t) = h^k(x, y, t) - h^{k-1}(x, y, t)$$

.....

$$h_N(x, y, t) = H(x, y) - h^{N-1}(x, y, t)$$

with governing equations integrated vertically within layers. The specific feature of the MHI model is that not only layer thickness but also temperature, salinity and density (buoyancy) are functions of both time and horizontal coordinates:

$$u_k = u_k(x, y, t) \quad v_k = v_k(x, y, t)$$

$$T_k = T_k(x, y, t) \quad S_k = S_k(x, y, t)$$

The layers are kept stable by employing *a priori* set “base” stratification which constrains density variations:

$$b_k^b \leq b_k < b_{k-1}^b, \quad k = 2, \dots, N$$

$$b = g \cdot (\rho_\infty - \rho) / \rho_\infty$$

Equations

1) Momentum equations:

$$\frac{\partial(u_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k^2 \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k u_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^u - Q_{k-1}^u - f \cdot v_k \cdot h_k = h_k \left(g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial(b_q \cdot h_q)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial(b_k \cdot h_k)}{\partial x} - b_k \cdot \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial h_q}{\partial x} - \frac{b_k}{2} \cdot \frac{\partial h_k}{\partial x} \right) + A_l \cdot \Delta(u_k \cdot h_k) - A \cdot \Delta \Delta(u_k \cdot h_k)$$

$$\frac{\partial(v_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \cdot v_k \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k^2 \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^v - Q_{k-1}^v + f \cdot u_k \cdot h_k = h_k \left(g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial(b_q \cdot h_q)}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{\partial(b_k \cdot h_k)}{\partial y} - b_k \cdot \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial h_q}{\partial y} - \frac{b_k}{2} \cdot \frac{\partial h_k}{\partial y} \right) + A_l \cdot \Delta(v_k \cdot h_k) - A \cdot \Delta \Delta(v_k \cdot h_k)$$

2) Governing equation of temperature: $\frac{\partial(T_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \cdot T_k \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k \cdot T_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^T - Q_{k-1}^T = \kappa \cdot \nabla(h_k \cdot \nabla T_k)$

3) Governing equation of salinity: $\frac{\partial(S_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \cdot S_k \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k \cdot S_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^S - Q_{k-1}^S = \kappa \cdot \nabla(h_k \cdot \nabla S_k)$

4) Continuity equation: $\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial(h_k \cdot u_k)}{\partial x} + \frac{\partial(h_k \cdot v_k)}{\partial y} + W_k - W_{k-1} = 0$

5) Integral continuity equation: $\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial(h_k \cdot u_k)}{\partial x} + \sum_{k=1}^N \frac{\partial(h_k \cdot v_k)}{\partial y} - W_0 = 0$

6) Turbulent kinetic energy equation $h_1 \left[a \cdot (M^0 + M^{h'}) + \varepsilon - W_1^- (b_1 - b_{j+1}) \right] = 2 \cdot m \cdot u_*^3$

7) Equation of sea water state $b = (T, S)$

Boundary condition

1) For momentum equations:

$$\frac{\partial(u_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k^2 \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k u_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^u - Q_{k-1}^u - f \cdot v_k \cdot h_k = h_k \left(g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial(b_q \cdot h_q)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial(b_k \cdot h_k)}{\partial x} - b_k \cdot \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial h_q}{\partial x} - \frac{b_k}{2} \cdot \frac{\partial h_k}{\partial x} \right) + A_t \cdot \Delta(u_k \cdot h_k) - A \cdot \Delta \Delta(u_k \cdot h_k)$$

In the internal layers: $Q_k^u = \lambda_k^u (u_k - u_{k+1}) + W_k^+ \cdot u_k + W_k^- \cdot u_{k+1}$

On the surface: $Q_0^u = \tau^x$

On the bottom: $Q_N^u = r_H \cdot u_N$ Where: $r_H = r_{H1} + r_{H2} \sqrt{(u_N^2 + v_N^2)}$

2) For governing equation of temperature:

$$\frac{\partial(T_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \cdot T_k \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k \cdot T_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^T - Q_{k-1}^T = \kappa \cdot \nabla(h_k \cdot \nabla T_k)$$

In the internal layers: $Q_k^T = \lambda_k^T (T_k - T_{k+1}) + W_k^+ \cdot T_k + W_k^- \cdot T_{k+1}$

On the surface: $Q_0^T = Q_s^T + Q_b^T + Q_h^T + Q_e^T$

On the bottom: $Q_N^T = 0$

3) For governing equation of temperature:

$$\frac{\partial(S_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k \cdot S_k \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k \cdot S_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^S - Q_{k-1}^S = \kappa \cdot \nabla(h_k \cdot \nabla S_k)$$

In the internal layers: $Q_k^S = \lambda_k^S (S_k - S_{k+1}) + W_k^+ \cdot S_k + W_k^- \cdot S_{k+1}$

On the surface: $Q_0^S = P - E$

On the bottom: $Q_N^S = 0$

$$W_k = w^{h^k-0} - \frac{dh^k-0}{dt} = w^{h^k+0} - \frac{dh^k+0}{dt} \quad \text{Where: } \frac{dh^k-0}{dt} = \frac{\partial h^k}{\partial t} + u_k \frac{\partial h^k}{\partial x} + v_k \frac{\partial h^k}{\partial y} \quad \frac{dh^k+0}{dt} = \frac{\partial h^k}{\partial t} + u_{k+1} \frac{\partial h^k}{\partial x} + v_{k+1} \frac{\partial h^k}{\partial y}$$

$$W_k = 0, \quad k = 2, 3, \dots, N \quad W_k \neq 0, \quad k = 1, 2 \quad W_k^+ = (W_k + |W_k|)/2 = \max(0, W_k) \quad W_k^- = (W_k - |W_k|)/2 = \min(0, W_k)$$

The input external meteorological data includes cloudiness, surface air temperature, relative humidity, wind stress, short-wave solar radiation, and near surface wind speed from the daily NCEP NCAR reanalysis data (National Centers for Environmental Prediction, USA) from 1980 to 2005. All input data are daily averaged for the period from the 1980 to 2005.

Initial layer thickness, temperature and salinity distribution is based on data collected in frame of the International Joint JES Project during the summer cruises of R/V “Roger Revelle” and “Professor Khromov”, June-August 1999.

The model domain covers the Peter the Great Bay and adjacent sea area We set 10 quasi-isopycnal layers, horizontal grid size of 1.2 km in numerical experiment, time step of 1.5 min.

The coefficients of the quasi-isopycnal

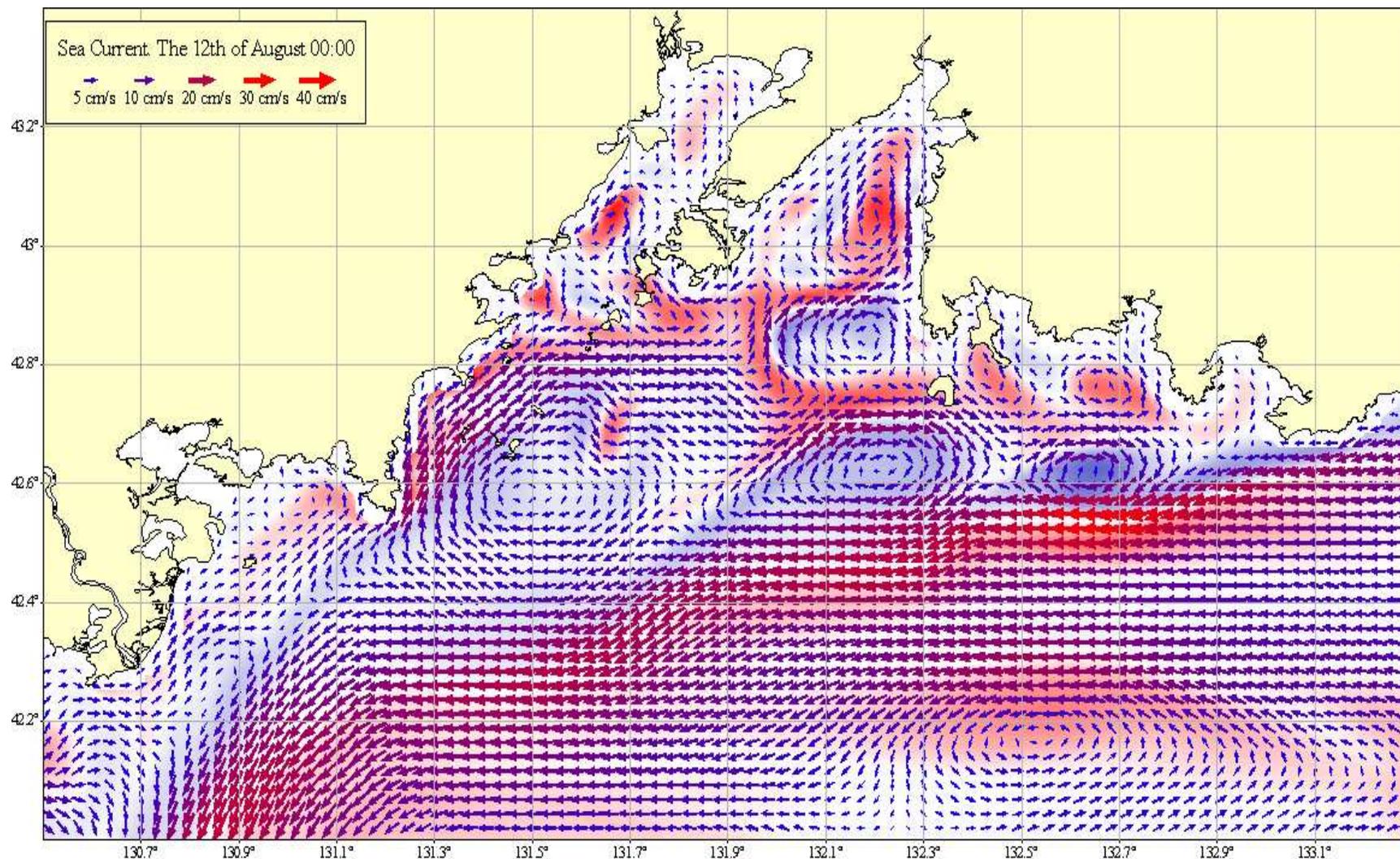
by-harmonic viscosity $0.5 \times 10^{16} \text{ sm}^4/\text{s}$;

harmonic viscosity $0.125 \times 10^{16} \text{ sm}^2/\text{s}$, used only hear the coast;

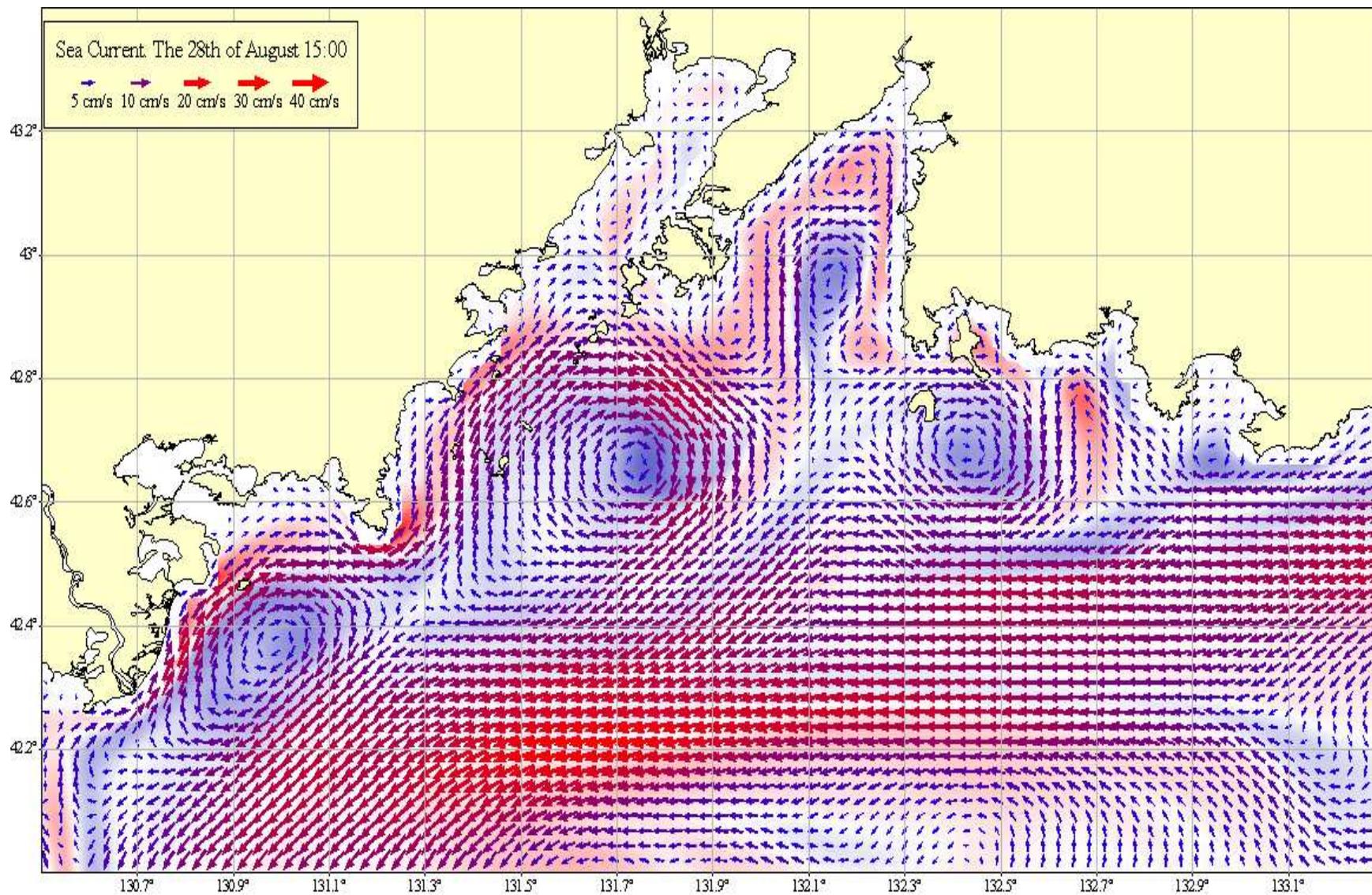
diffusion of heat/ salt are $0.5 \times 10^{15} \text{ sm}^2/\text{s}$,

bottom friction is 0.001

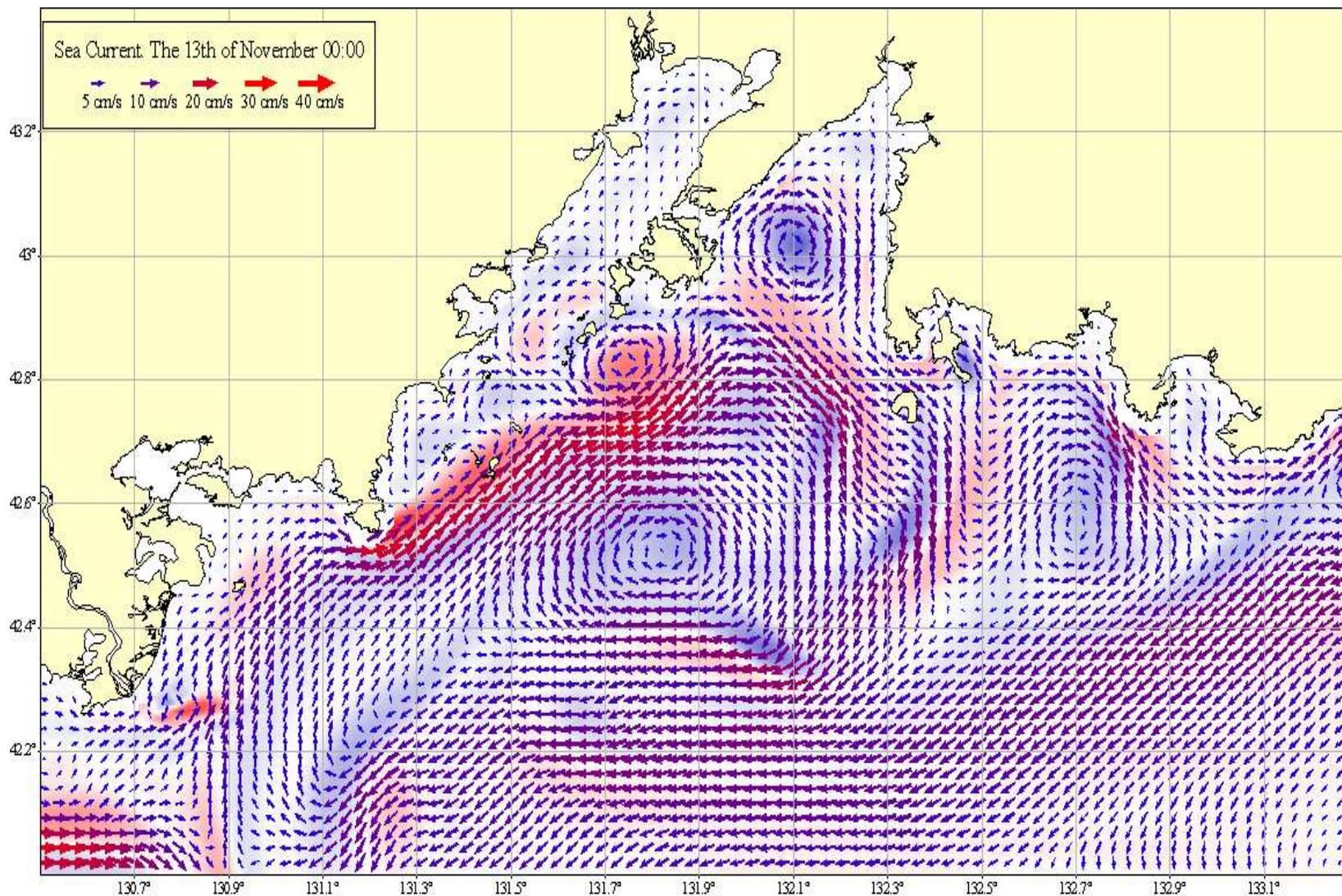
Средняя по вертикали скорость течения в верхнем перемешанном слое залива Петра Великого в середине августа при интенсивной крупномасштабной циклонической завихренности напряжений трения ветра в предшествующие десять суток.



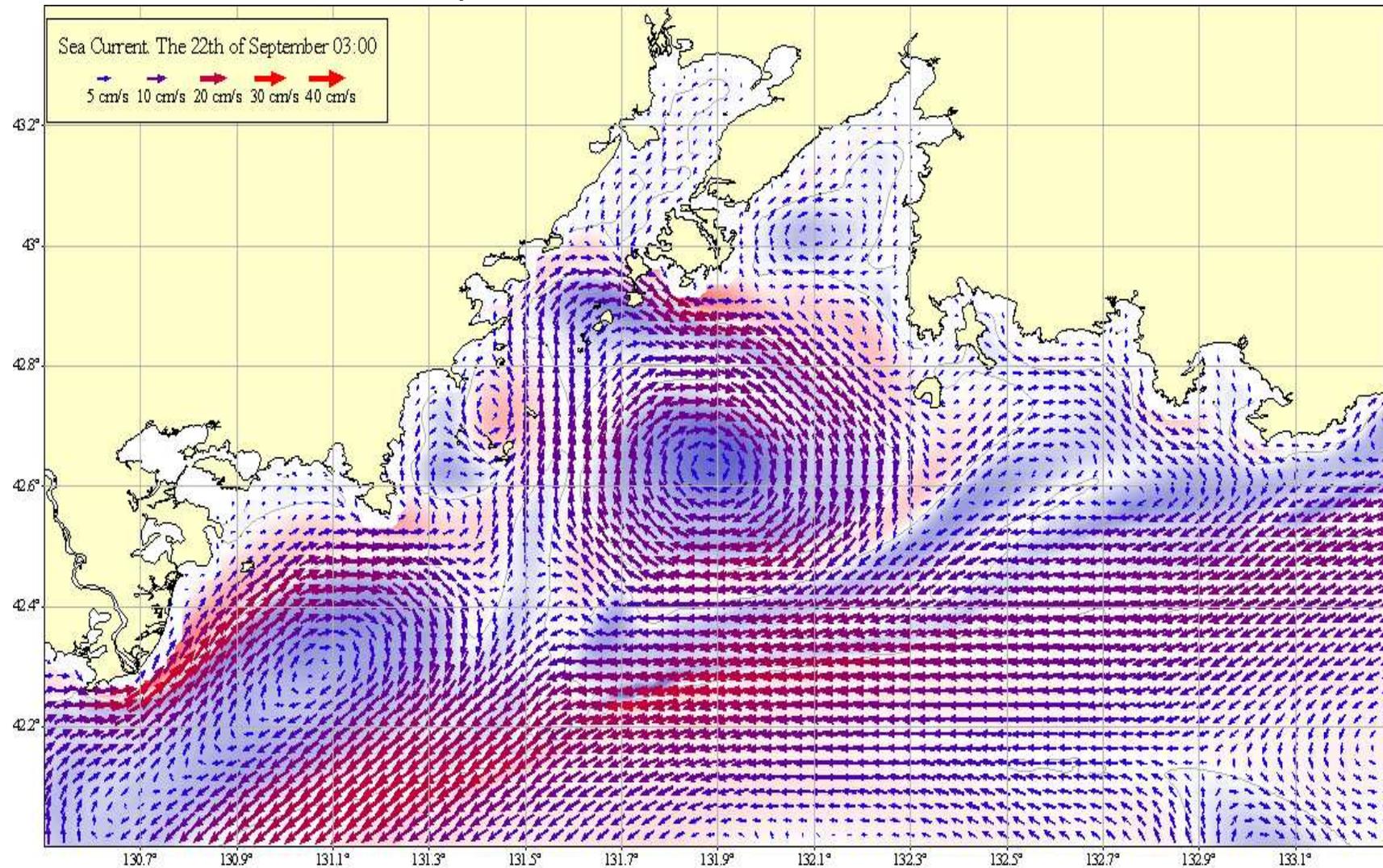
Средняя по вертикали скорость течения в верхнем перемешанном слое залива Петра Великого в конце августа при ослаблении крупномасштабной циклонической завихренности напряжений трения ветра

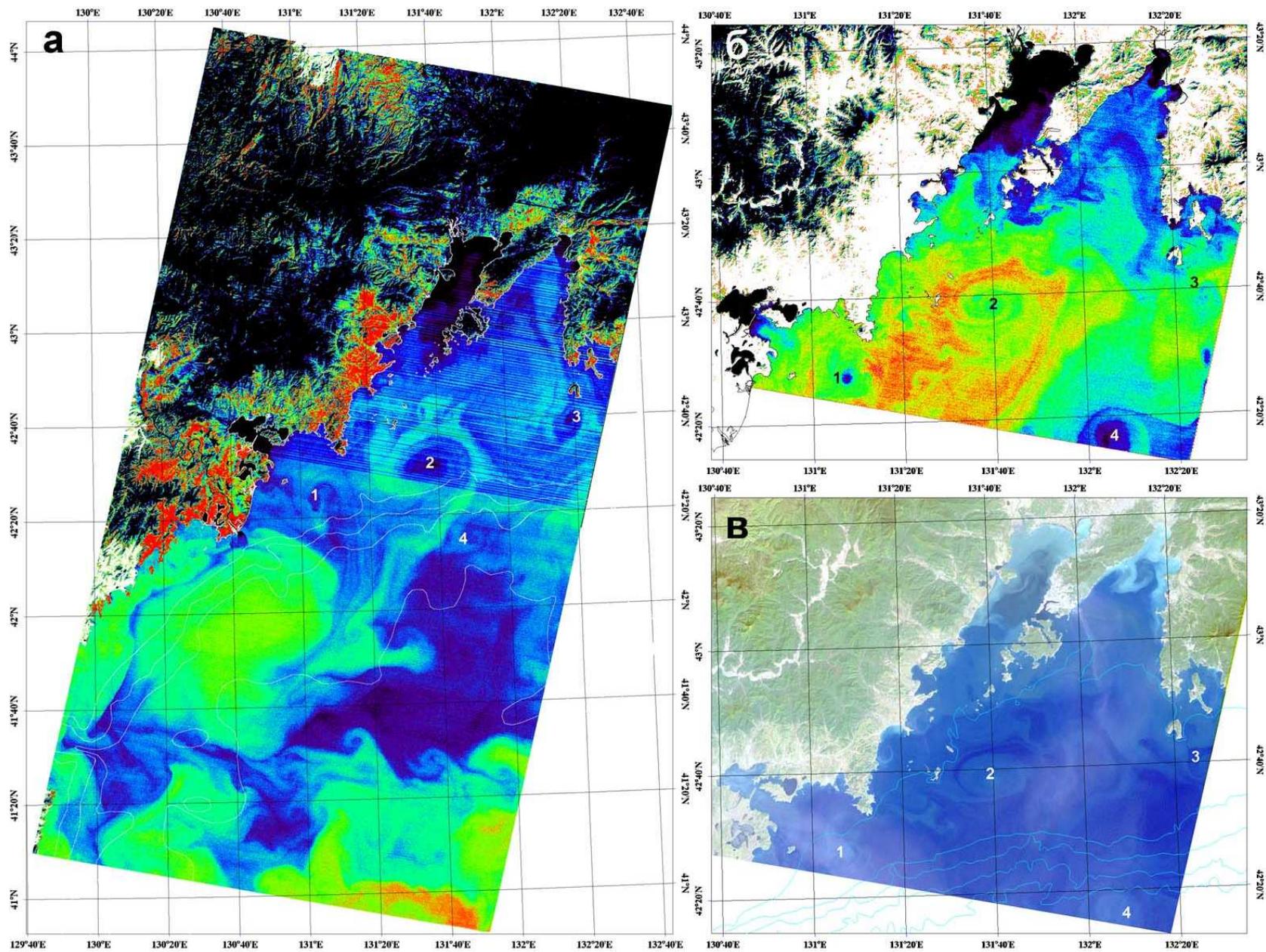


Средняя по вертикали скорость течения в верхнем перемешанном слое залива Петра Великого в середине ноября при усилении юго-западного и западного ветра



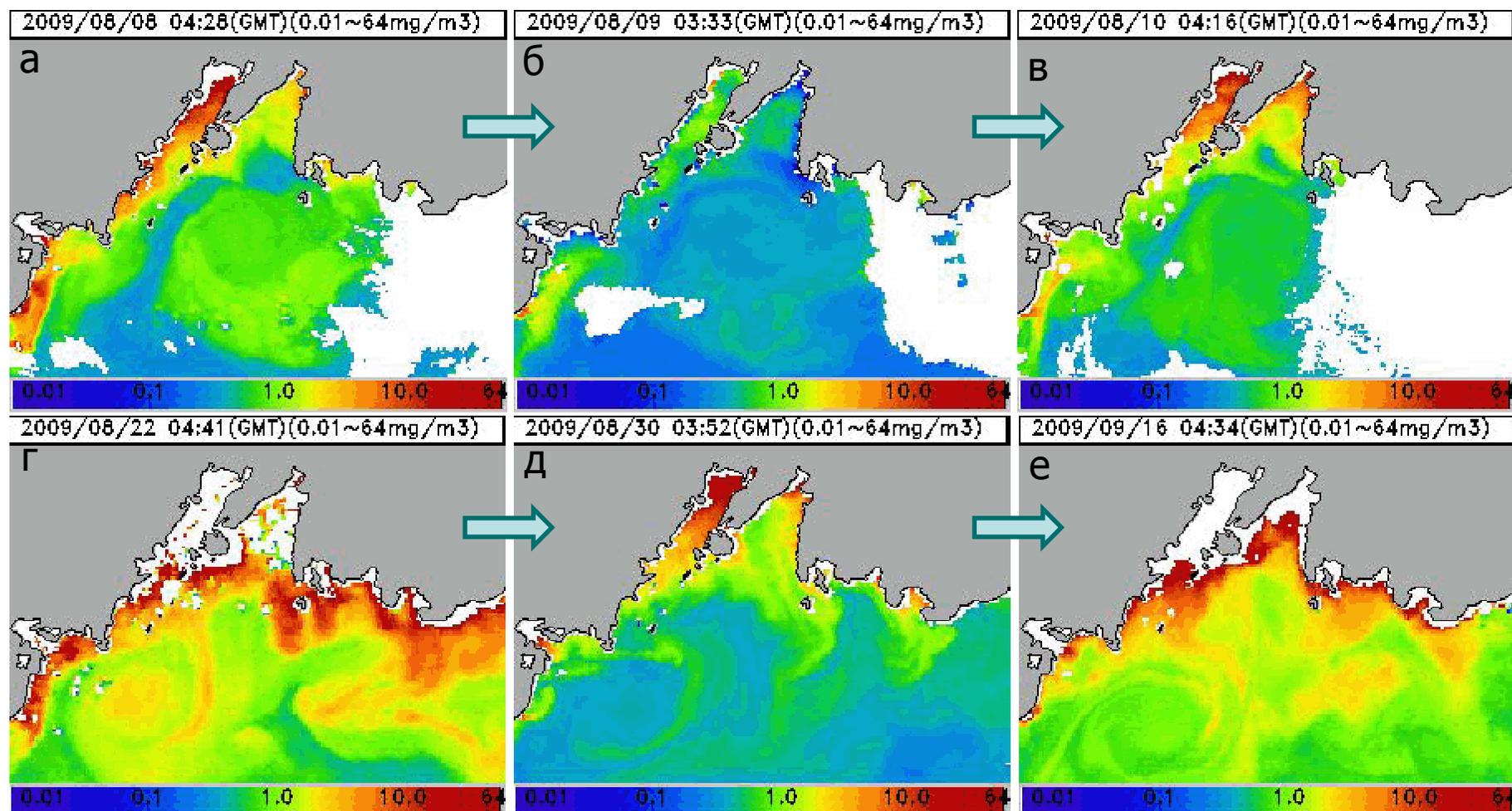
Средняя по вертикали скорость течения в верхнем перемешанном слое залива Петра Великого 22 сентября при характерной циклонической завихренности напряжений трения ветра в предшествующие десять суток и смене ветра на юго-западный, западный в районе залива





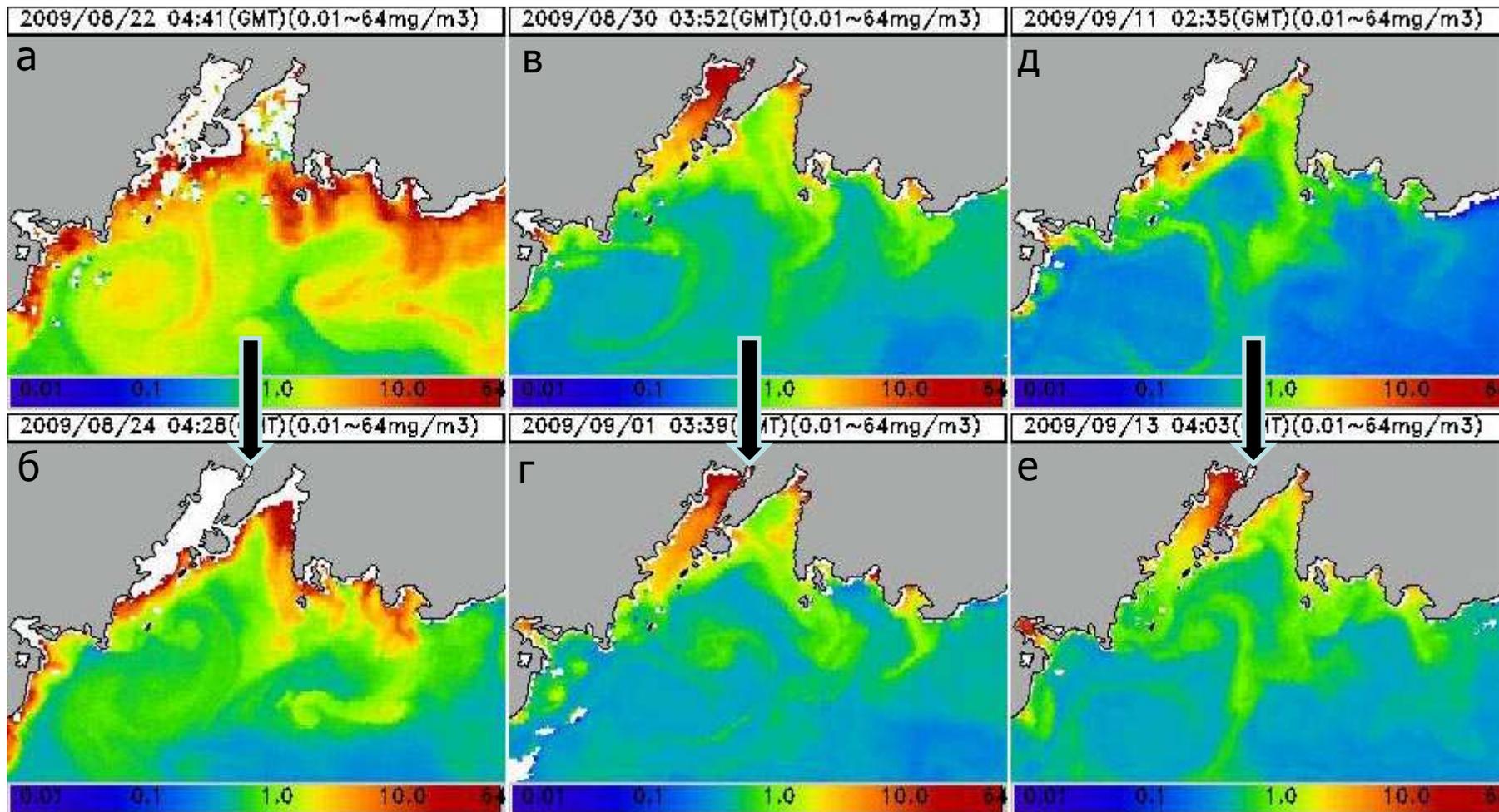
Циклонические вихри в зал. Петра Великого на изображениях, полученных тематическим картографом со спутника Landsat:(а) 8 октября 1991 г. в инфракрасном диапазоне, (б) и (в) 25 сентября 2001 г.: (б) в инфракрасном диапазоне, (в) в видимом диапазоне; **1-4** – циклонические вихри.

Эволюция синоптического антициклонического вихря в заливе Ветра Великого в августе-сентябре 2009 г. по данным спектрорадиометра MODIS о содержании хлорофилла в августе-сентябре 2009 г.

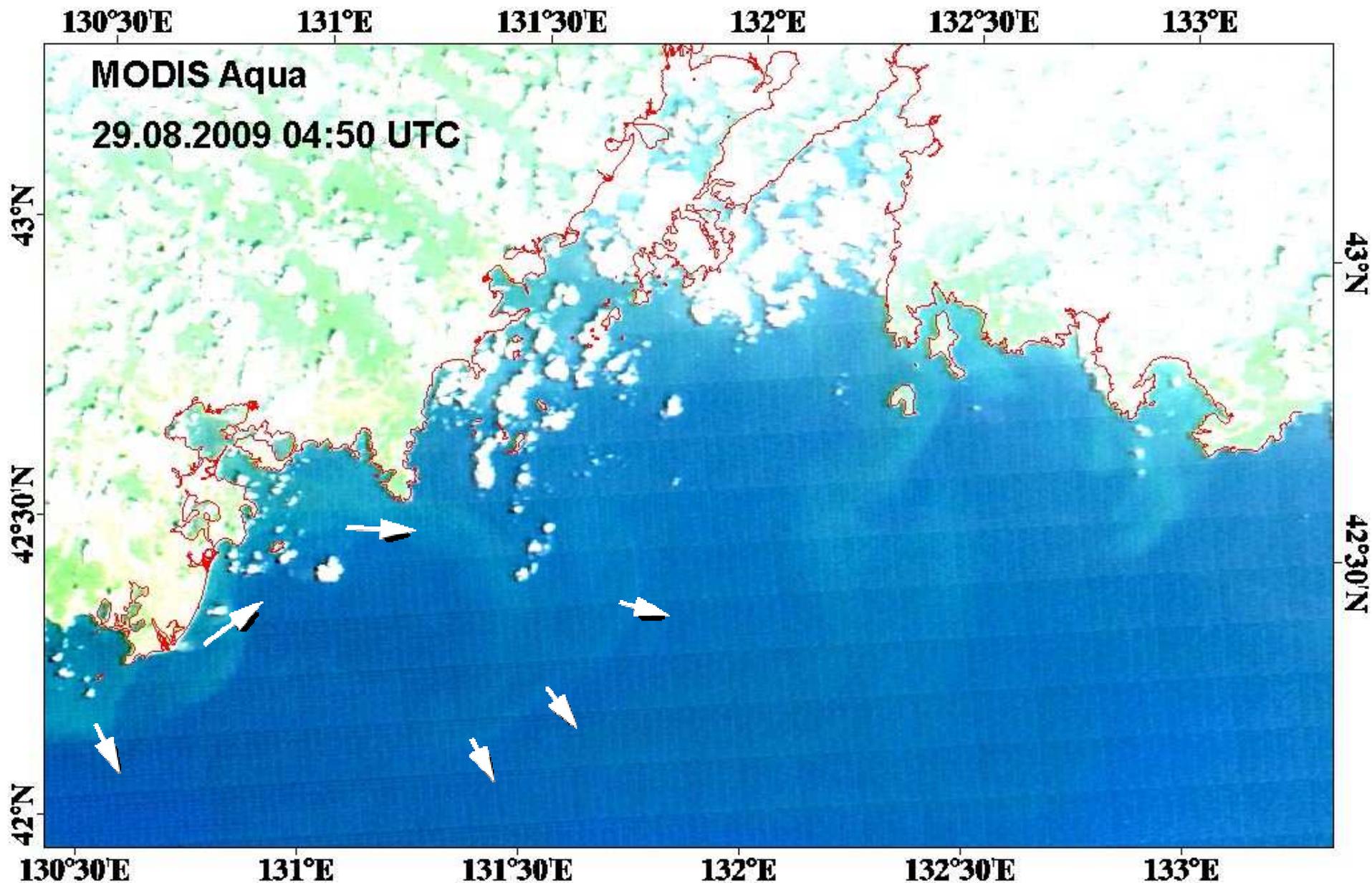


Содержание хлорофилла **а** в зал. Петра Великого в августе-сентябре 2009 г., полученное по измерениям спектрорадиометра MODIS (<http://www.nowrap3.go.jp/eng/callender/chl-r.php>)

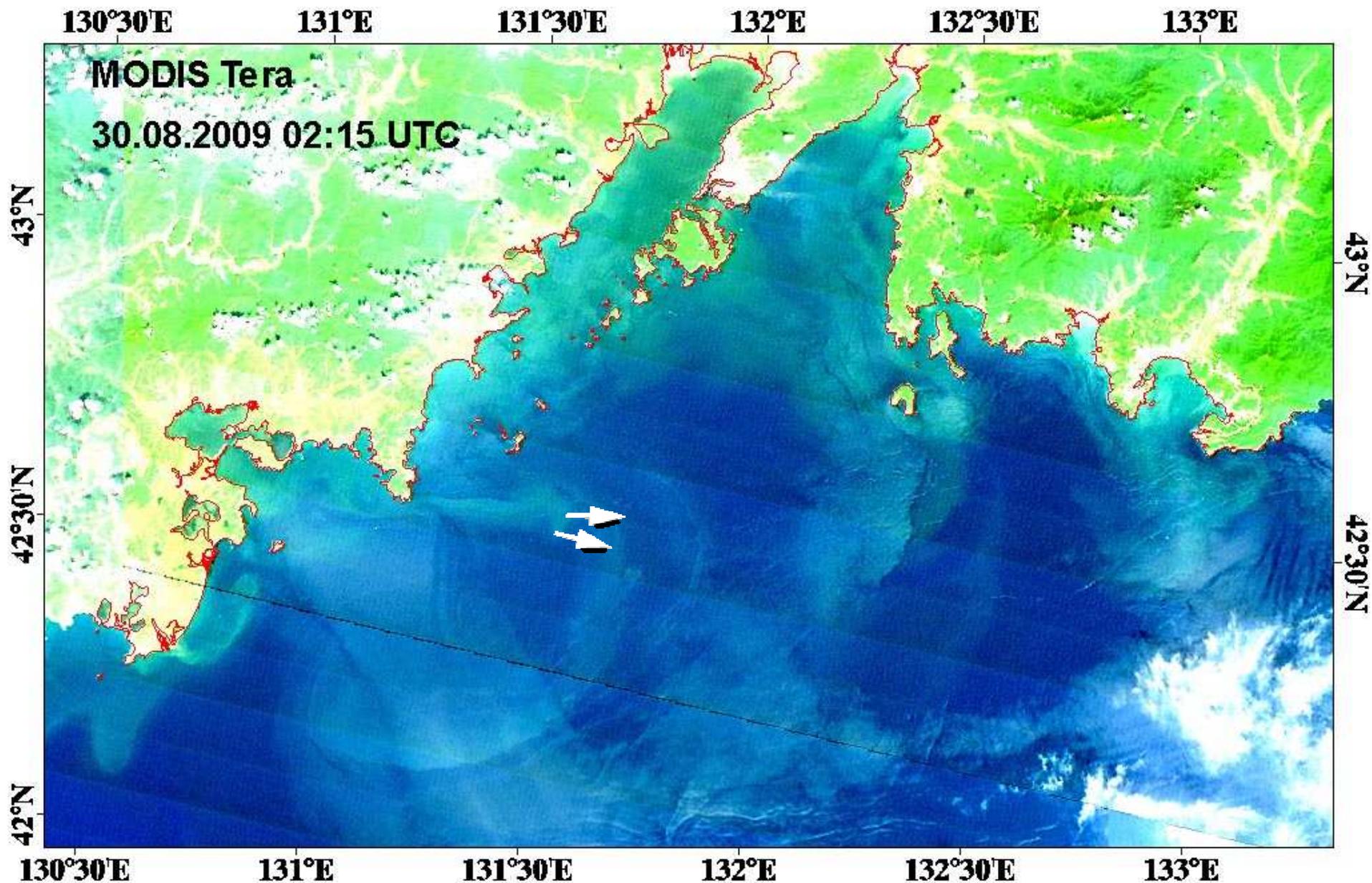
Циклогенез в зал. Ветра Великого в августе-сентябре 2009 г.



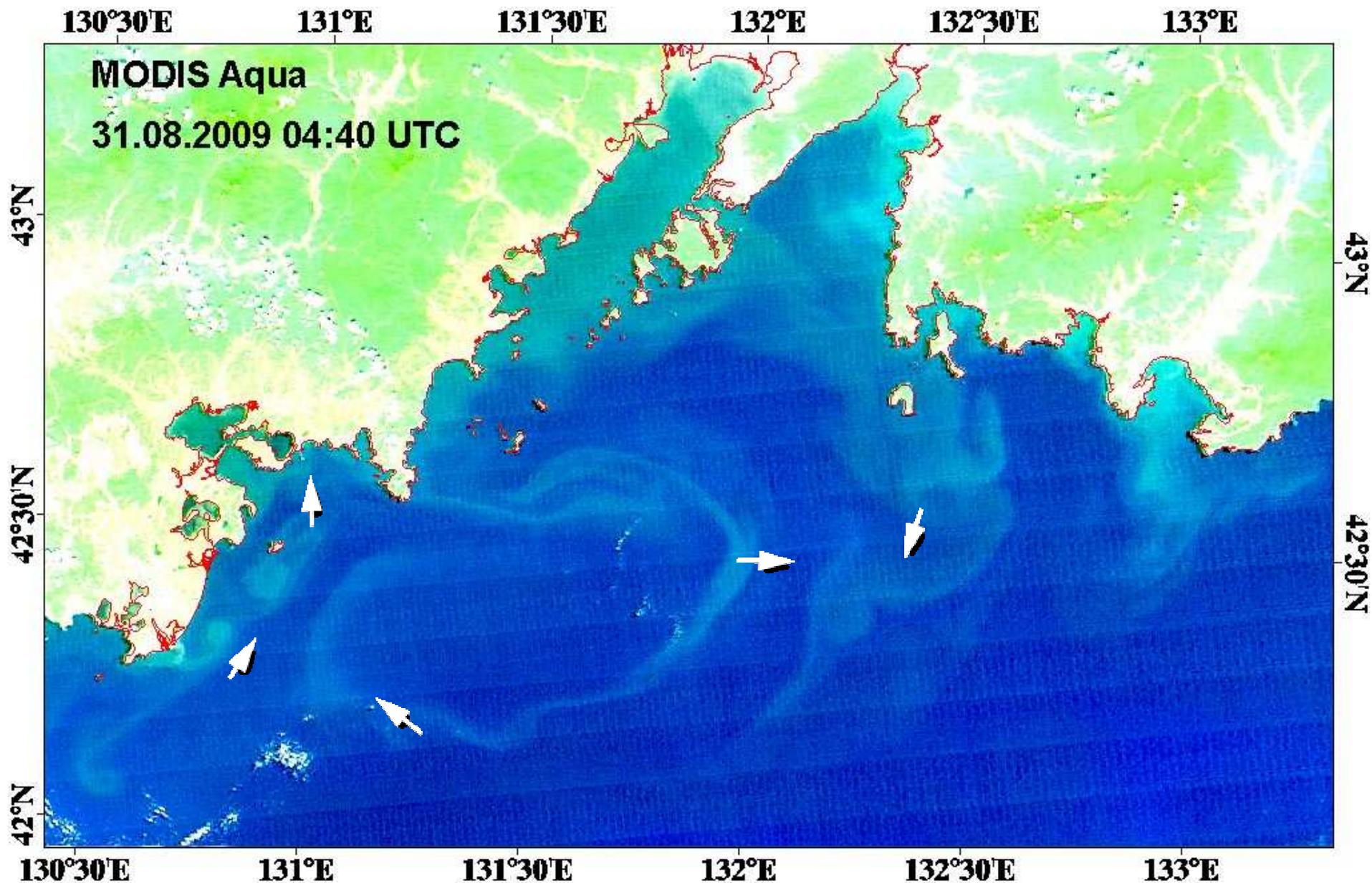
Содержание хлорофилла **a** в зал. Петра Великого в августе-сентябре 2009 г., полученное по измерениям спектрорадиометра MODIS (<http://www.nowrap3.go.jp/eng/callender/chl-r.php>)



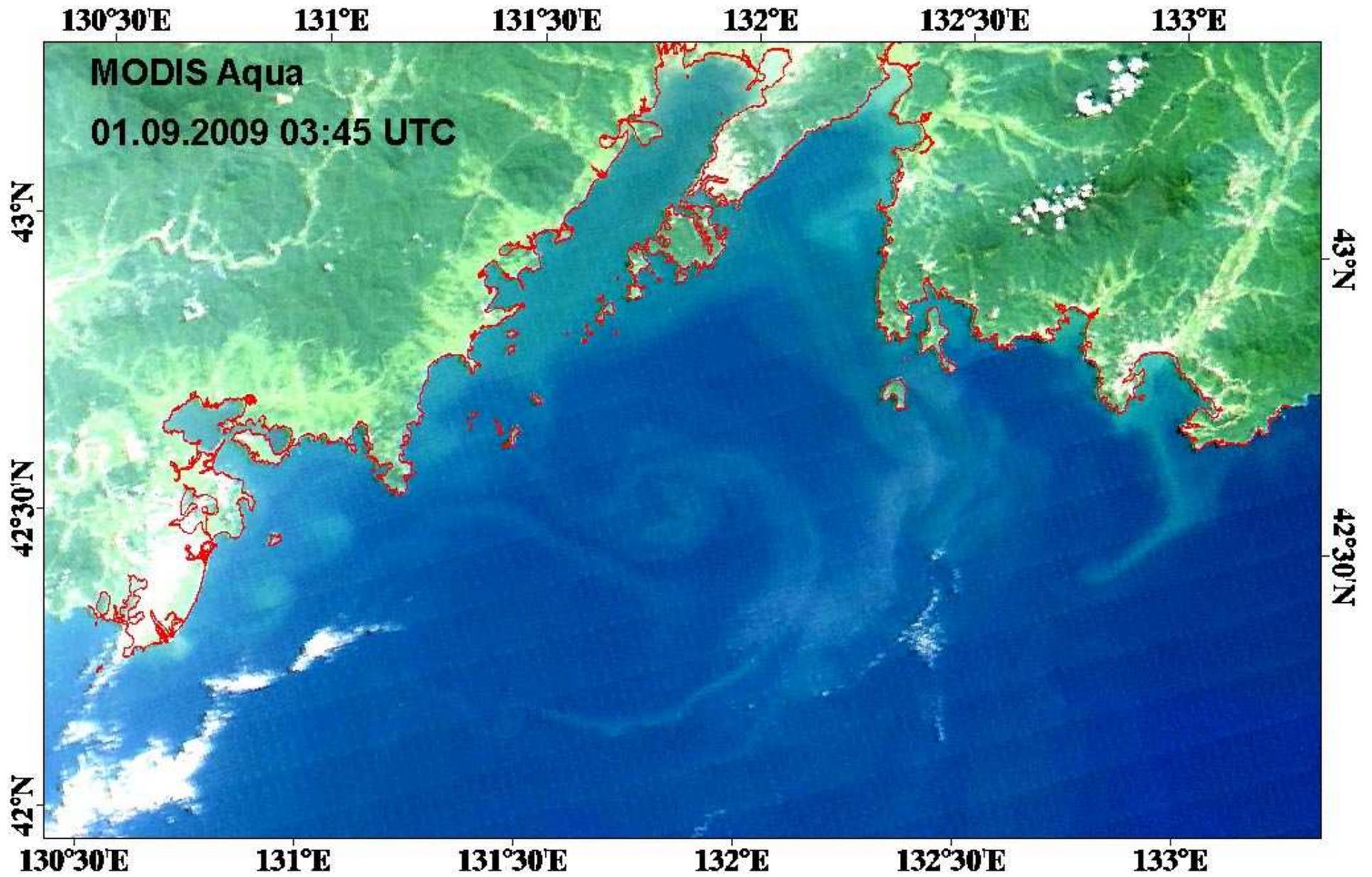
Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS с двух спутников.

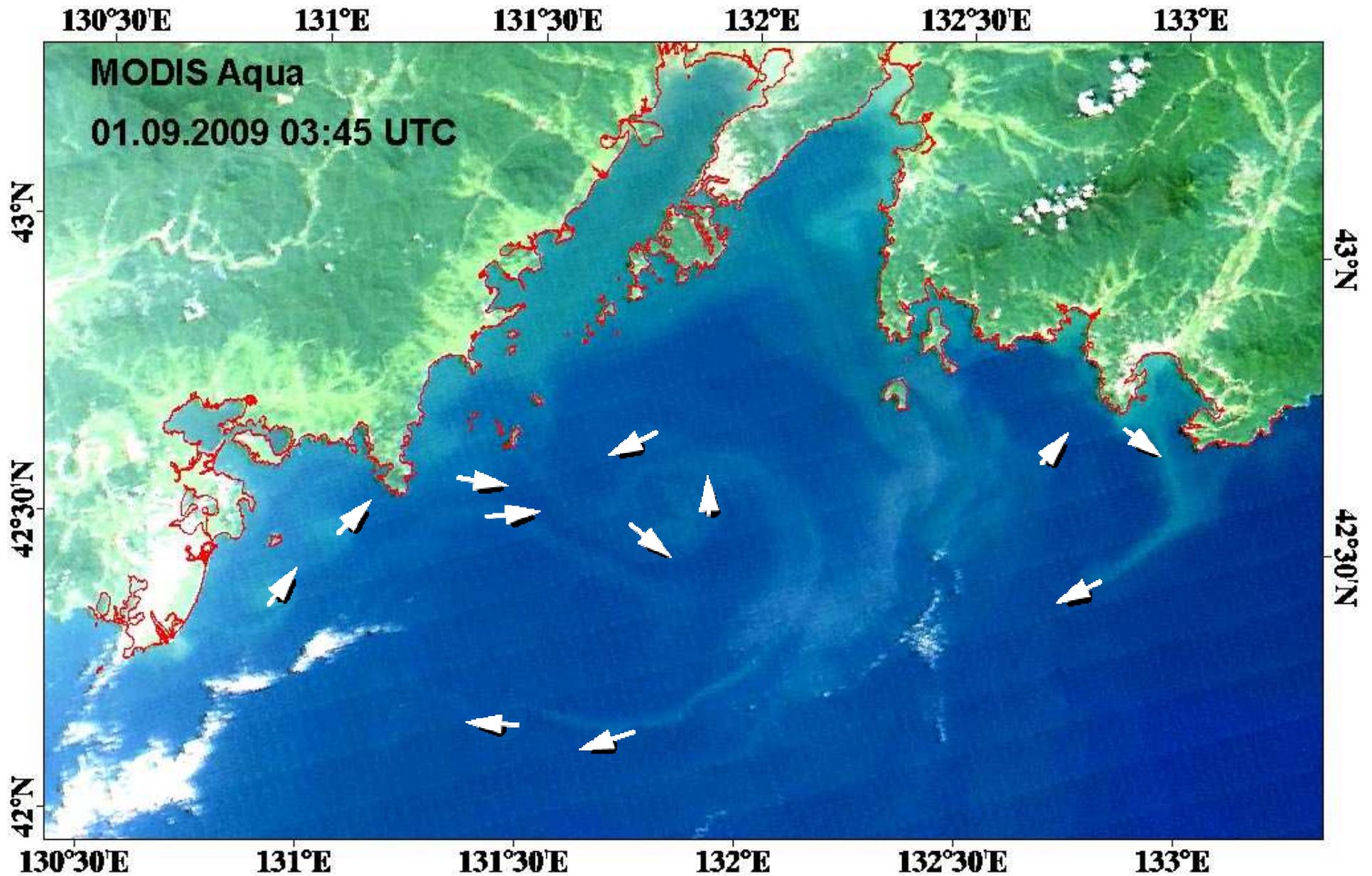


Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS с двух спутников.

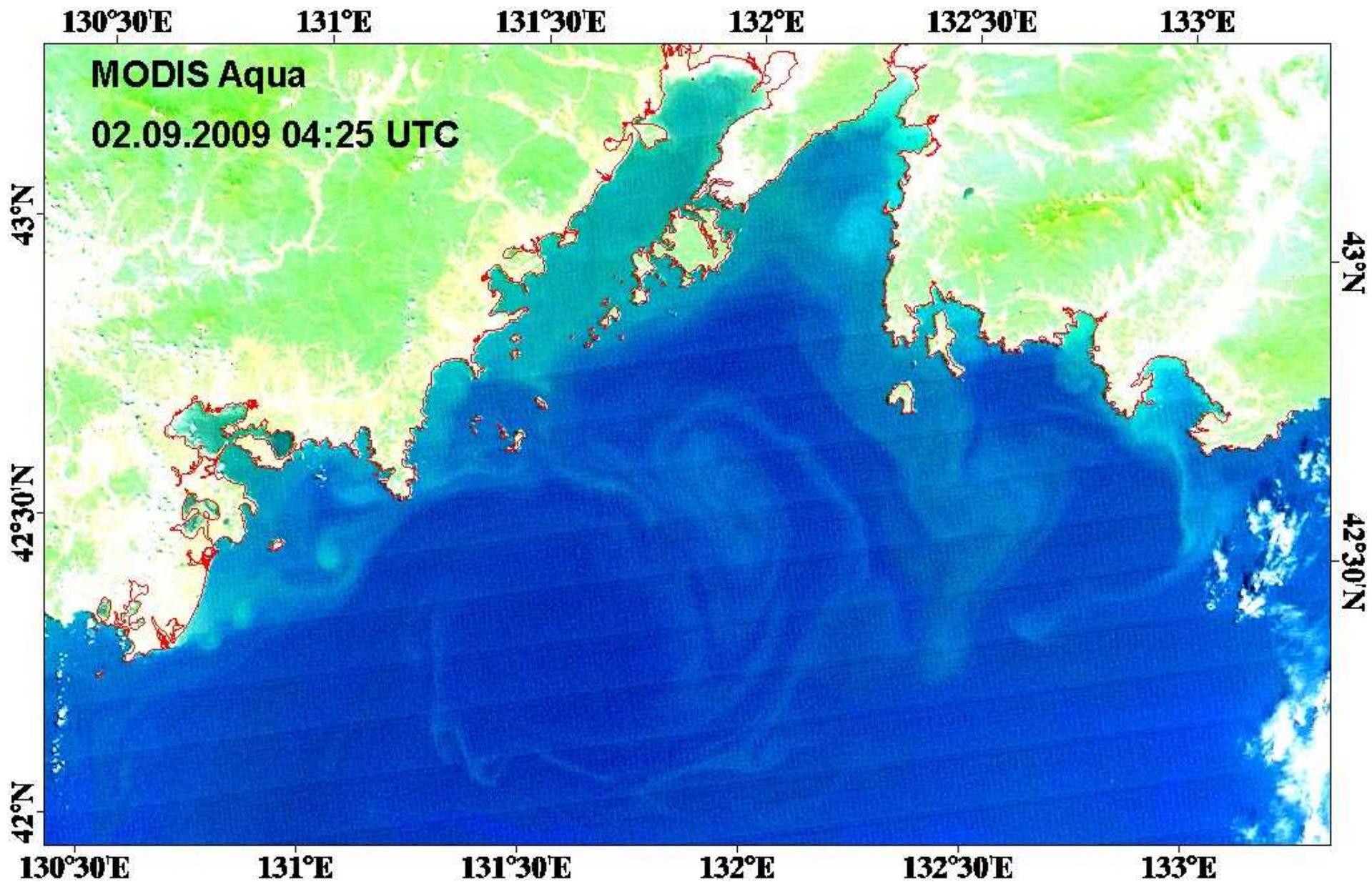


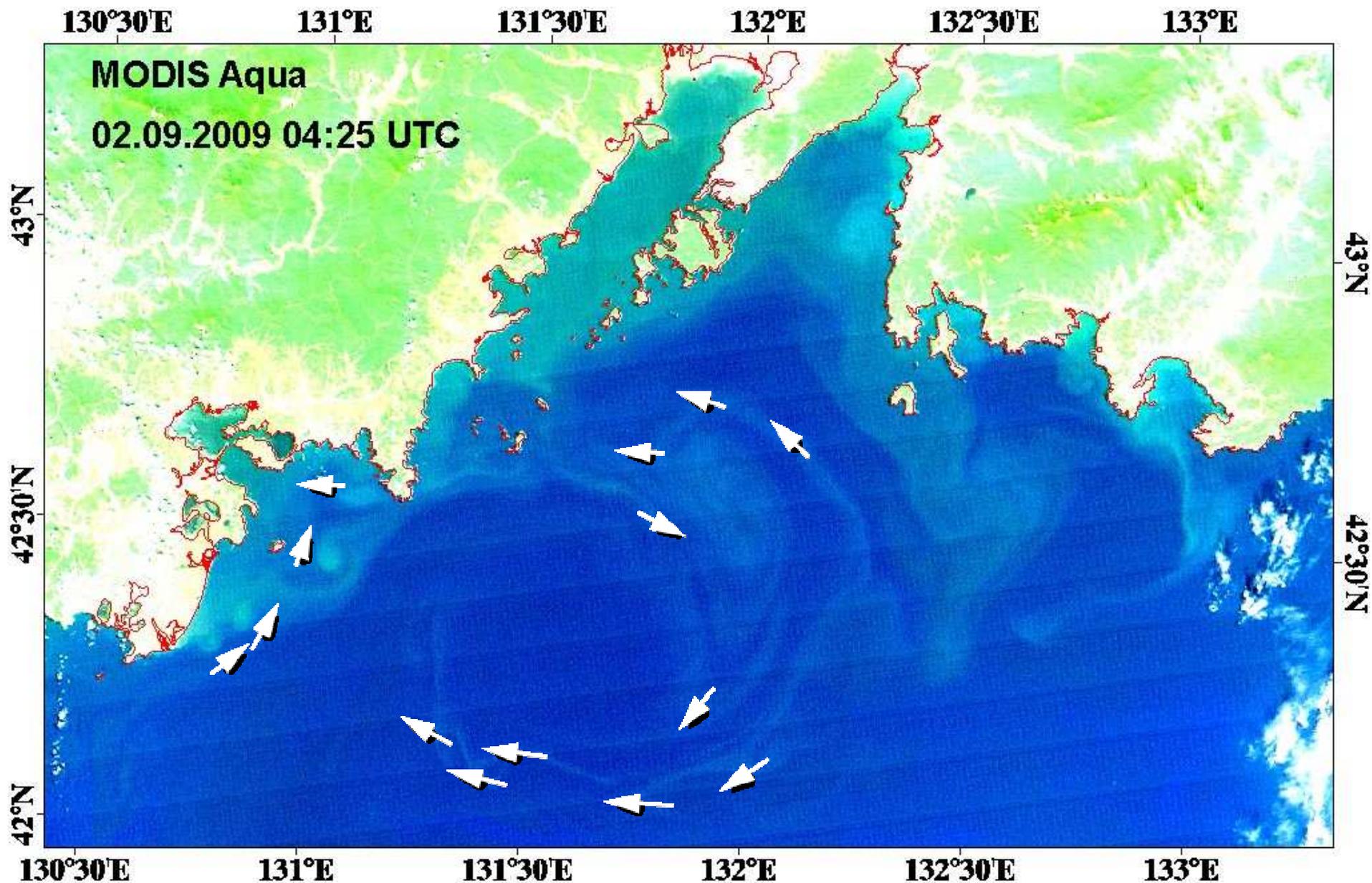
Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS с двух спутников.





Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS с двух спутников.





Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS с двух спутников.

Основные выводы, полученные по спутниковым данным и в численных экспериментах с моделью циркуляции:

Антициклонические синоптические вихри с характерным масштабом до 50 км, перемещаясь на юго-запад вдоль крутого материкового склона и узкого шельфа Приморья, захватываются широким шельфом залива Петра Великого, где оказывают значительное влияние на циркуляцию и водообмен с глубокой частью моря.

Время жизни захваченных антициклонических вихрей в этом районе изменяется от недели до месяца, а их пространственный масштаб может увеличиваться до 60-70 км.

На северо-западной и северной периферии антициклонических вихрей образуются интенсивные струйные течения и короткоживущие циклонические вихри субсиноптического масштаба с временным масштабом порядка суток.

Субсиноптические циклонические вихри перемещаются вдоль периферии антициклонического вихря, поддерживая в нем градиент температуры, давления и уровня.