

Синоптическая вихревая динамика над северо-западным материковым склоном и шельфом Японского моря (моделирование и результаты дистанционных наблюдений)

Пономарев В.И., Файман П.А., Дубина В.А., Ладыченко С.Ю., Лобанов В.Б.

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

[pvi711@yandex.ru](mailto:pvi711@yandex.ru)

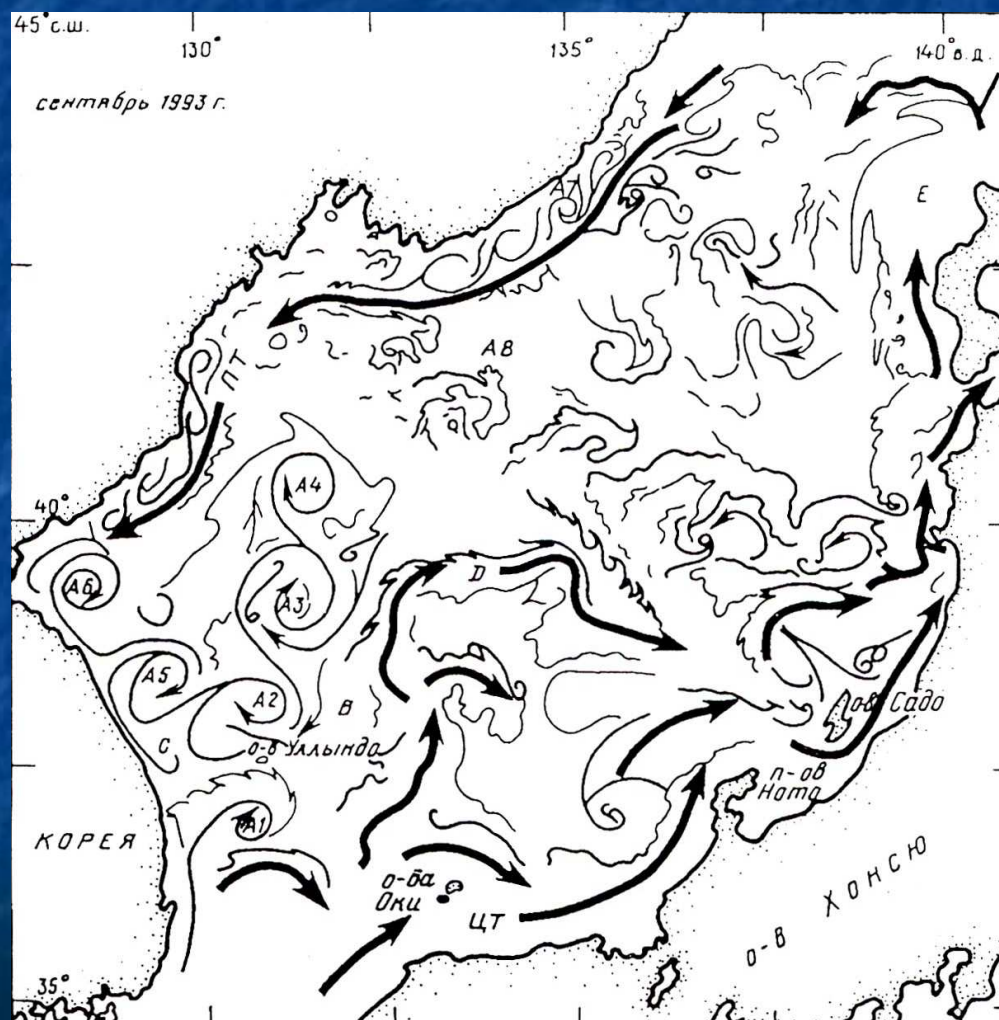


Схема поверхностной циркуляции  
Японского моря в сентябре 1993 г.  
(Гинзбург А.И. и др., 1998 г.)

# Антициклонические вихри вдоль побережья Приморского края

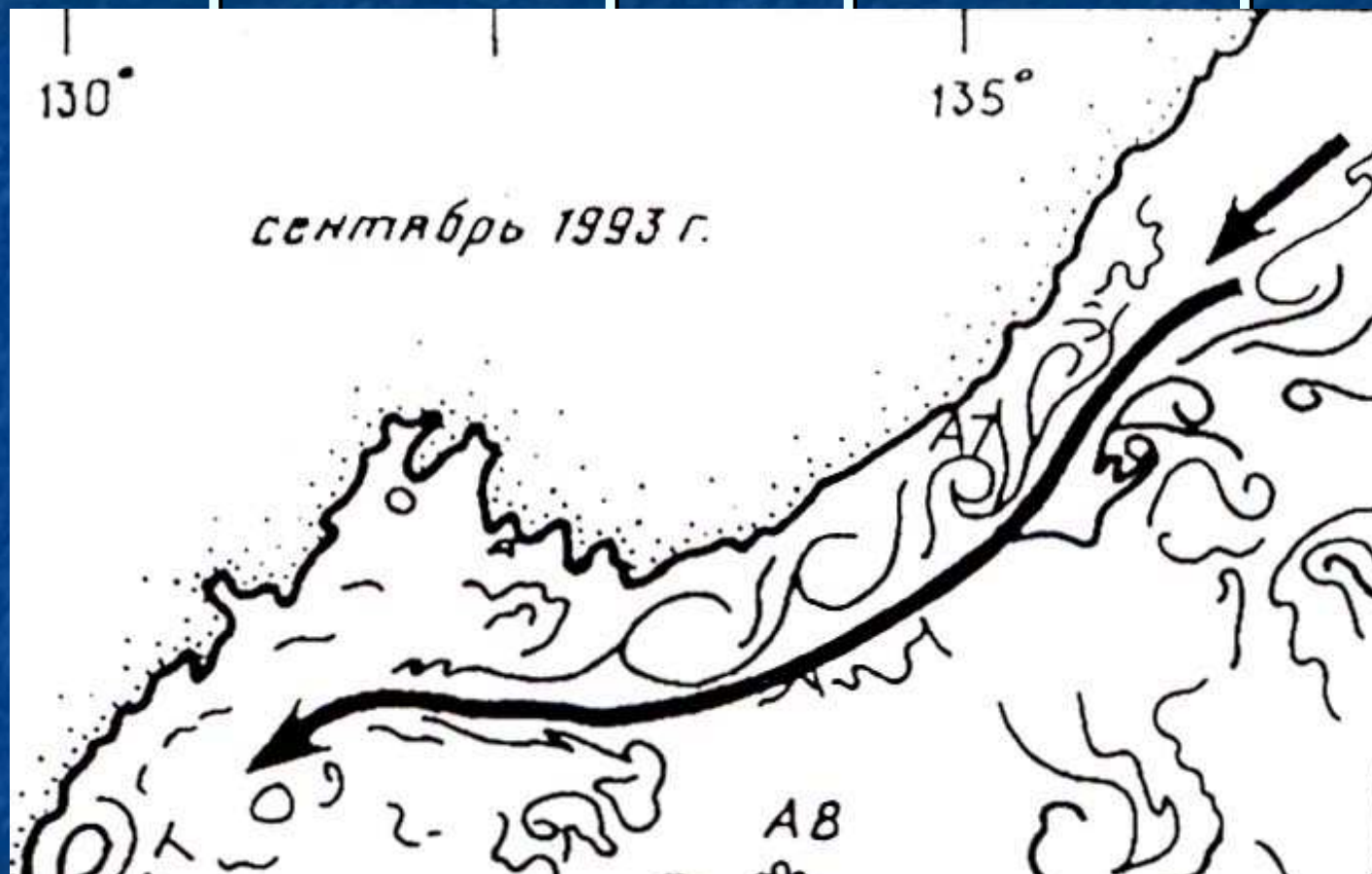


Схема поверхностной циркуляции Японского моря в сентябре 1993 г.  
(Гинзбург А.И. и др., 1998 г.)

**Основная цель работы – показать особенности вихревой динамики над континентальным склоном Японской котловины (северо-западной части Японского моря) и шельфом Приморья, используя :**

- спутниковые наблюдения (NOAA, MODIS, Landsat-5, УК диапазоны) 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).

The coefficients of quasi-isopycnal

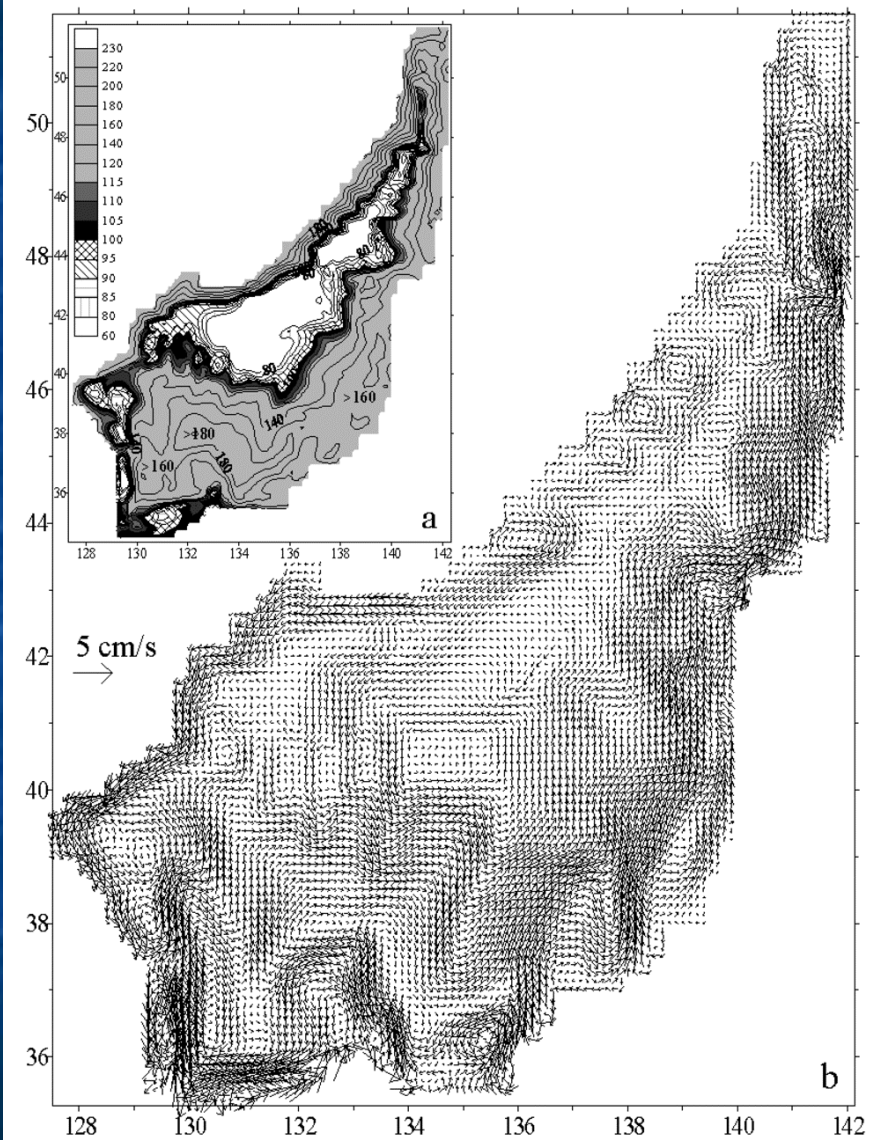
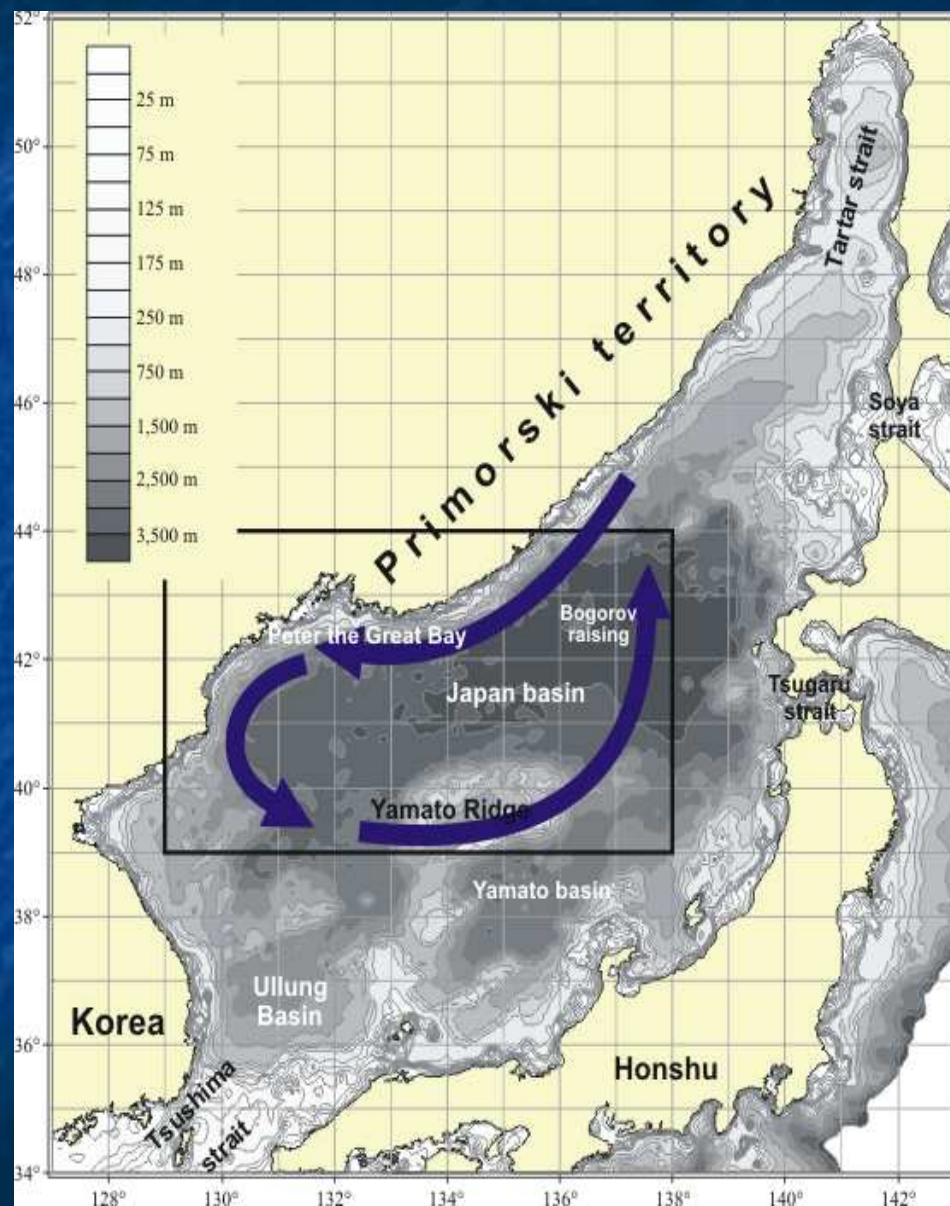
by-harmonic viscosity  $0.8 \times 10^{16} \text{ cm}^4/\text{s}$  ;

harmonic viscosity  $0.2 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{s}$ , used only near the coast;

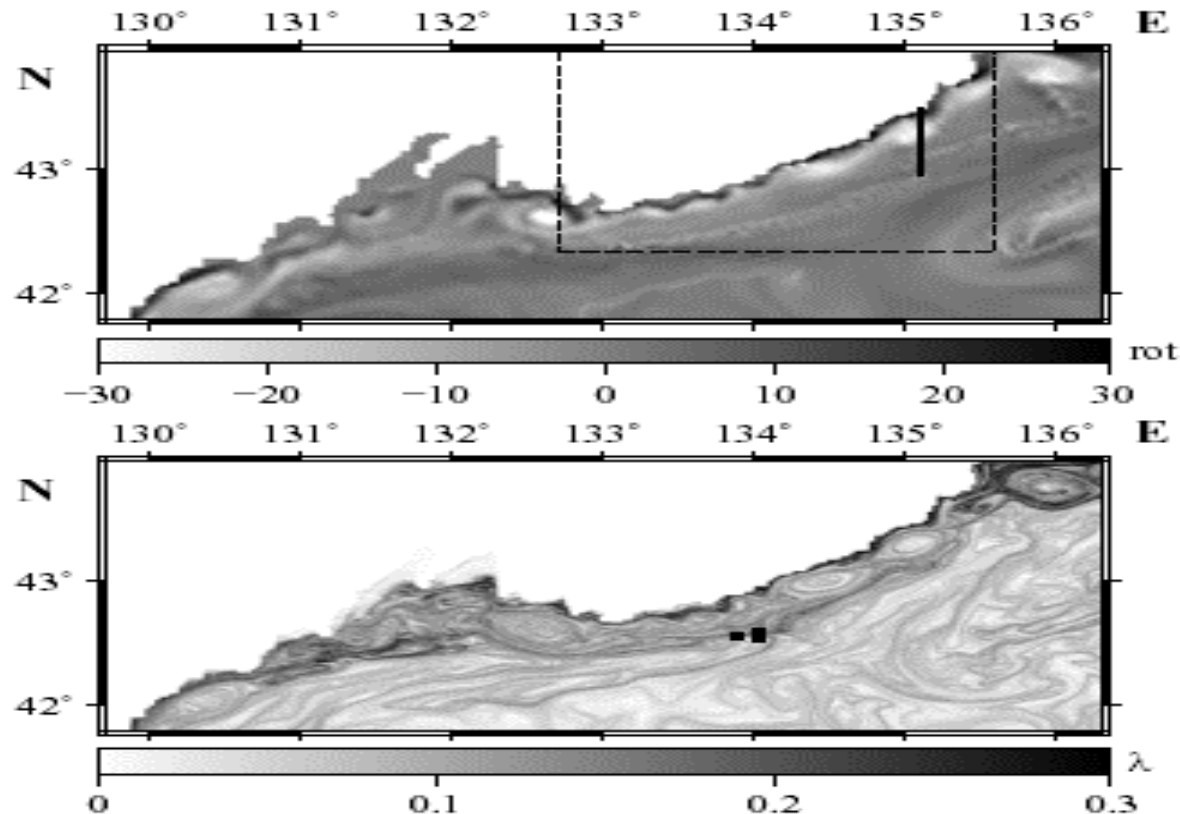
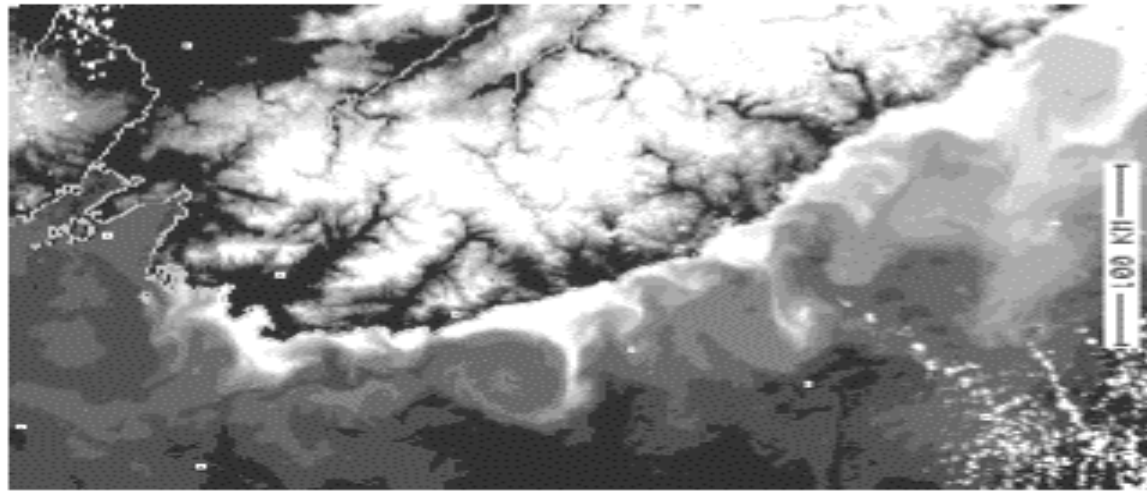
diffusion of heat/ salt are  $0.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,

bottom friction is 0.001

## Model domain



AVHRR NOAA IR image

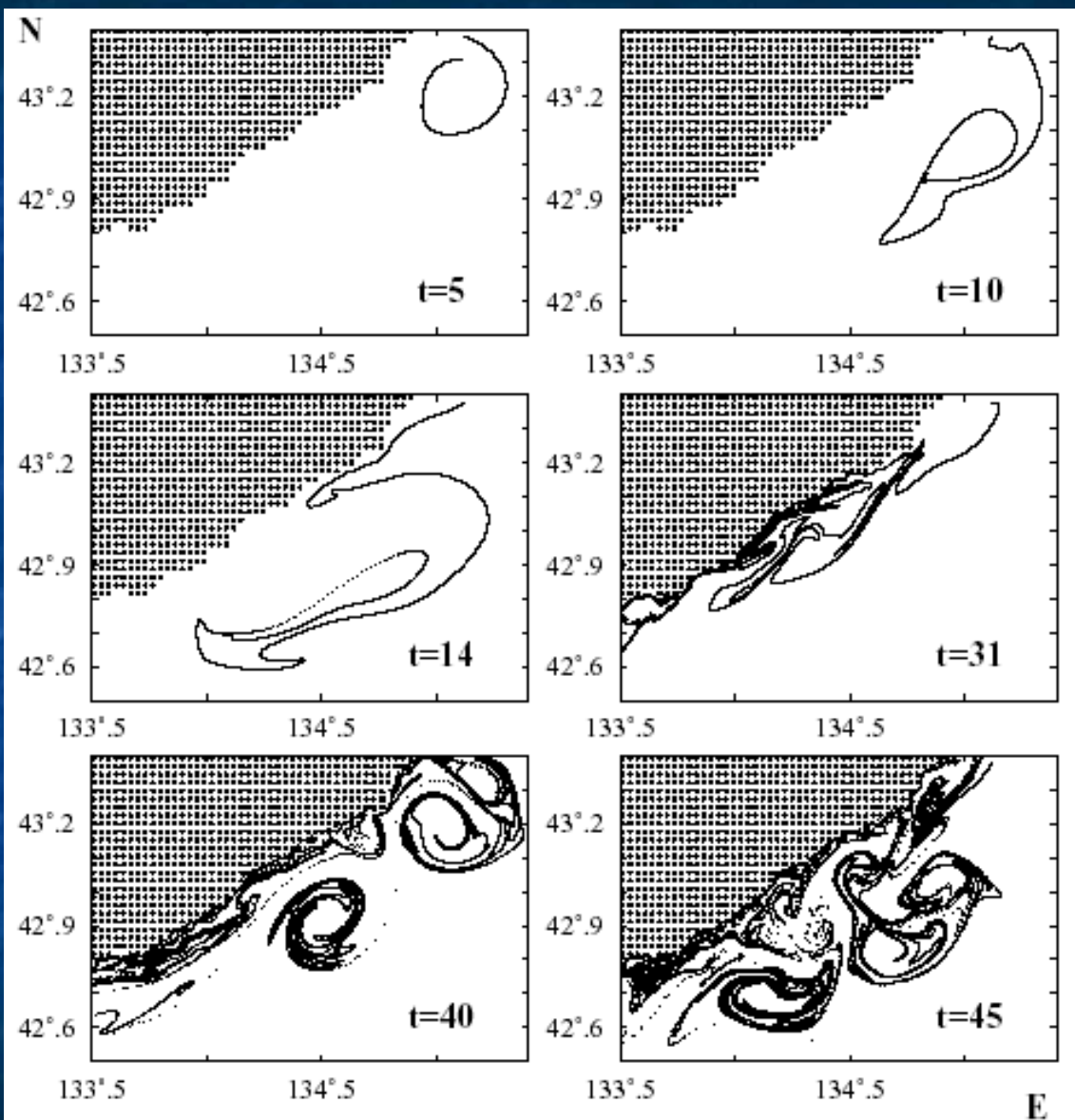


rot  $U_0$  from the model experiment

Lyapunov synoptic map

Budyansky, Ponomarev, Fyman, Uleysky, Prants. Lagrangian approach to chaotic transport and mixing in the Japan Sea. "Topics on Chaotic Systems, Selected Papers from CHAOS 2010 Int. Conf.". Singapore: World Scientific. P. 2011.

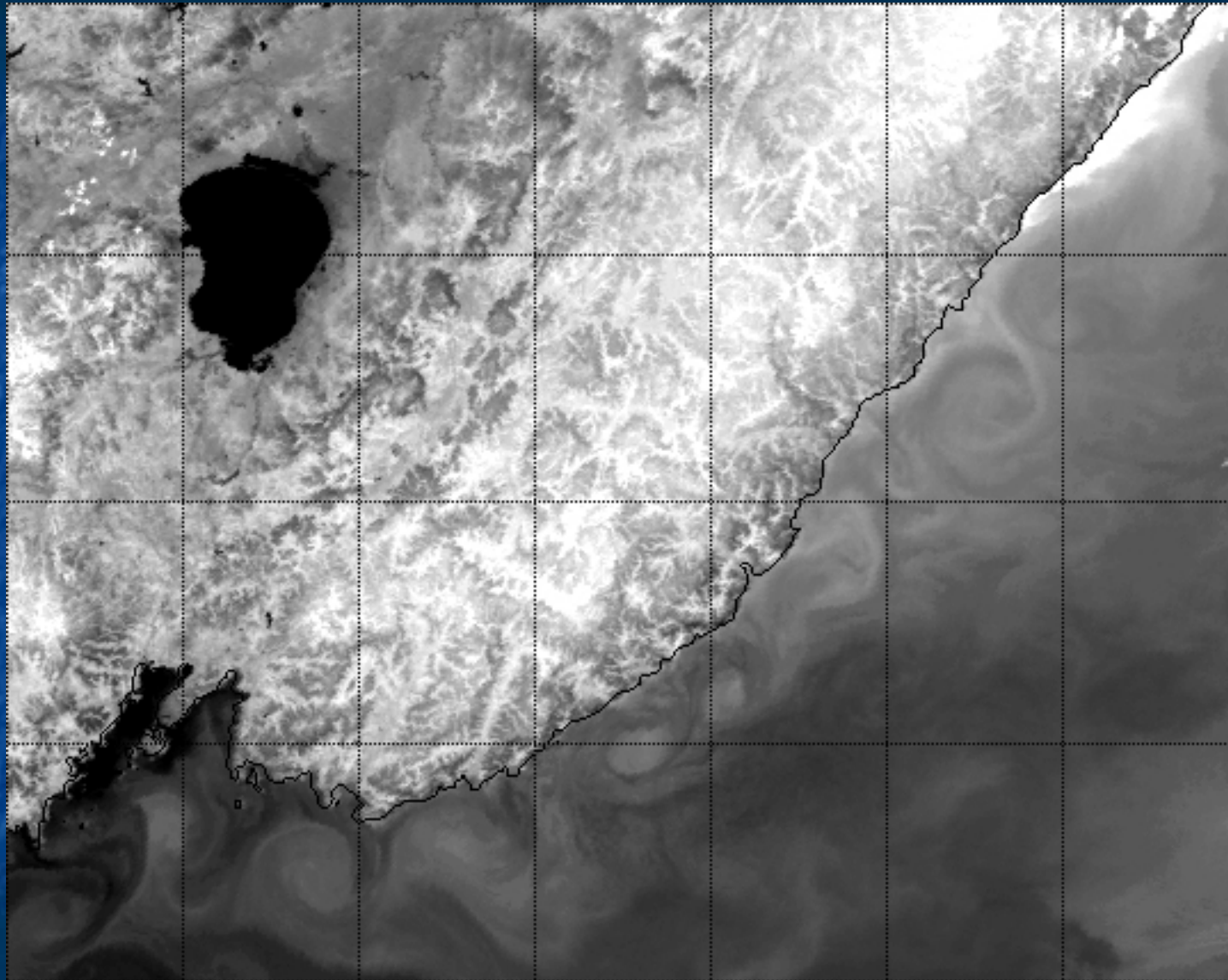
Траектории частиц, поступающих каждую минуту у северо-западной открытой границы области, после 5, 10, 14, 31, 40 и 45 суток интегрирования модели



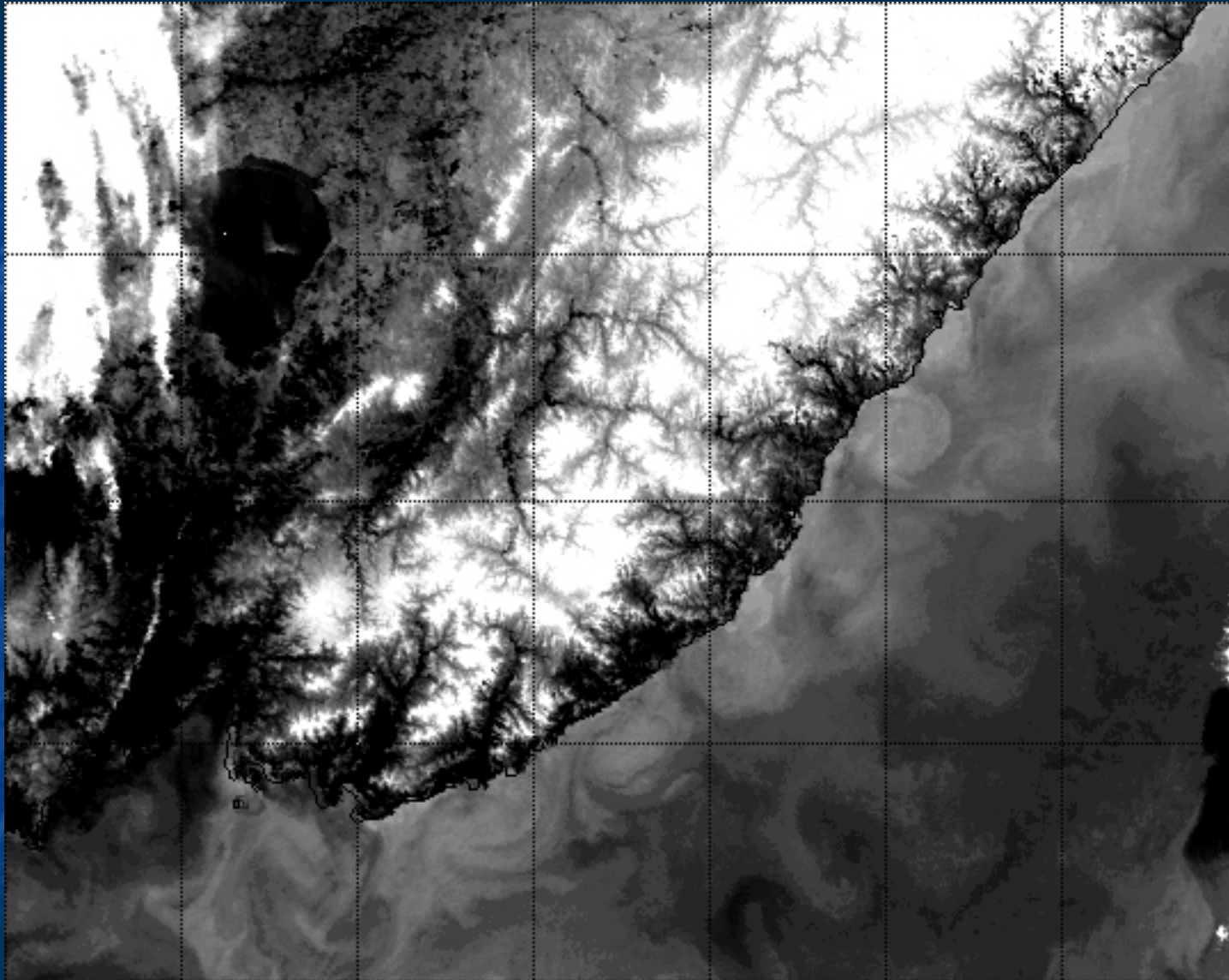
Budyansky, Ponomarev, Fyman, Uleysky, Prants. Lagrangian approach to chaotic transport and mixing in the Japan Sea. "Topics on Chaotic Systems, Selected Papers from CHAOS 2010 Int. Conf.". Singapore: World Scientific. P. 2011.

Синоптические вихри смещаются вдоль склона вниз по течению со скоростью около 2-3см/с, меньшей средней скорости Приморского течения, составляющей в среднем 8-15см/с, в струйных течениях 20 – 30 см/с

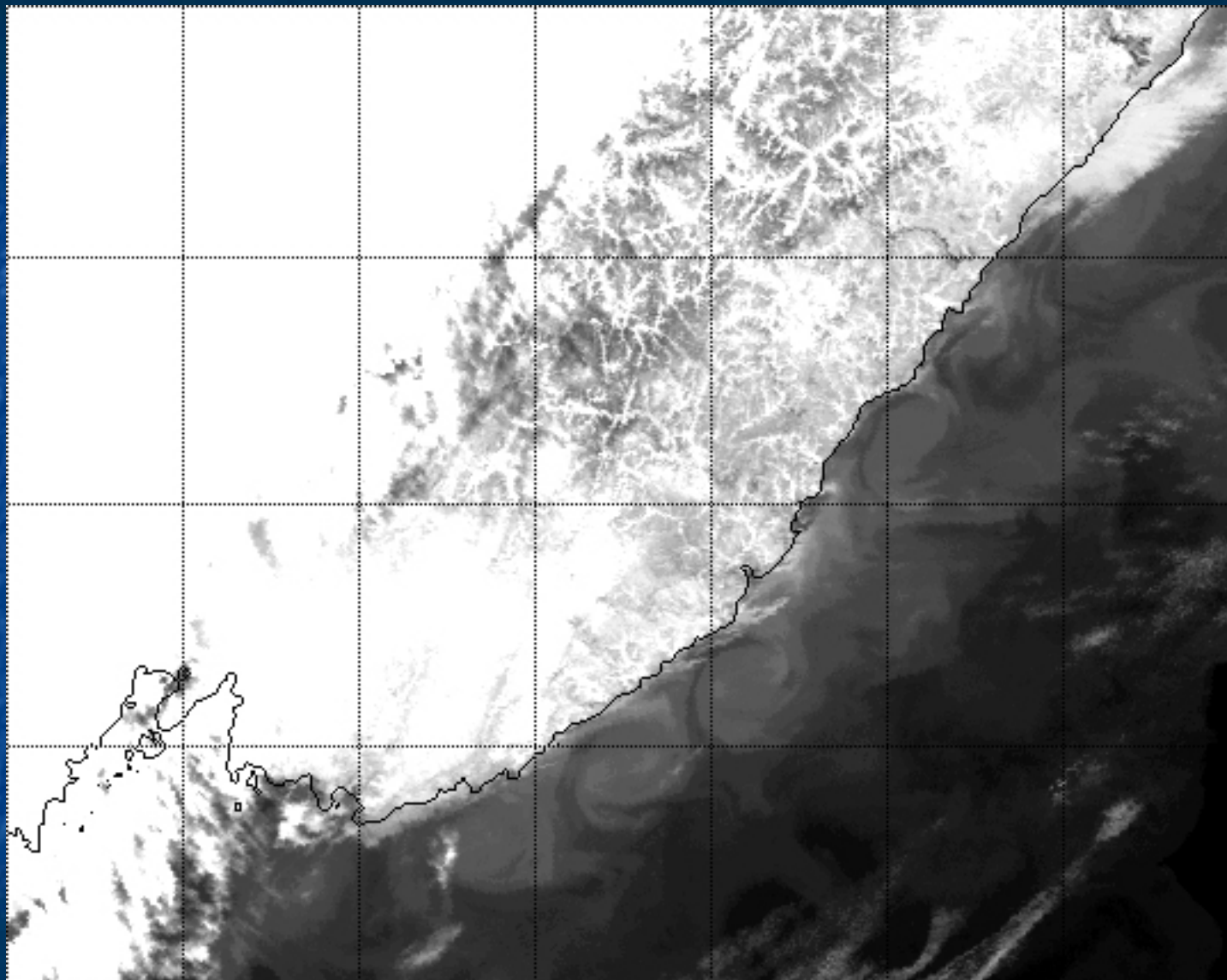
AVHRR NOAA 2008-08-03



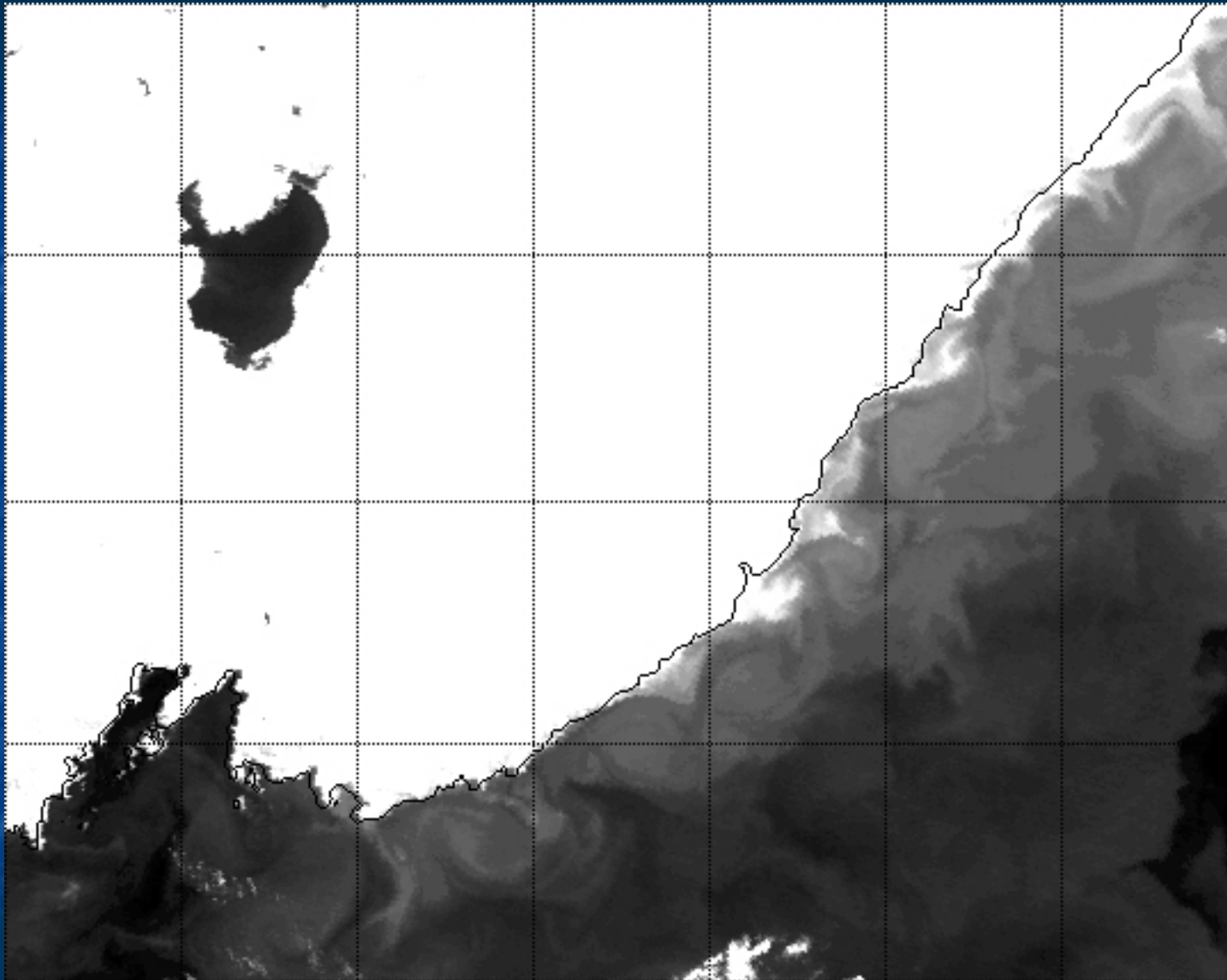
AVHRR NOAA 2008-09-08



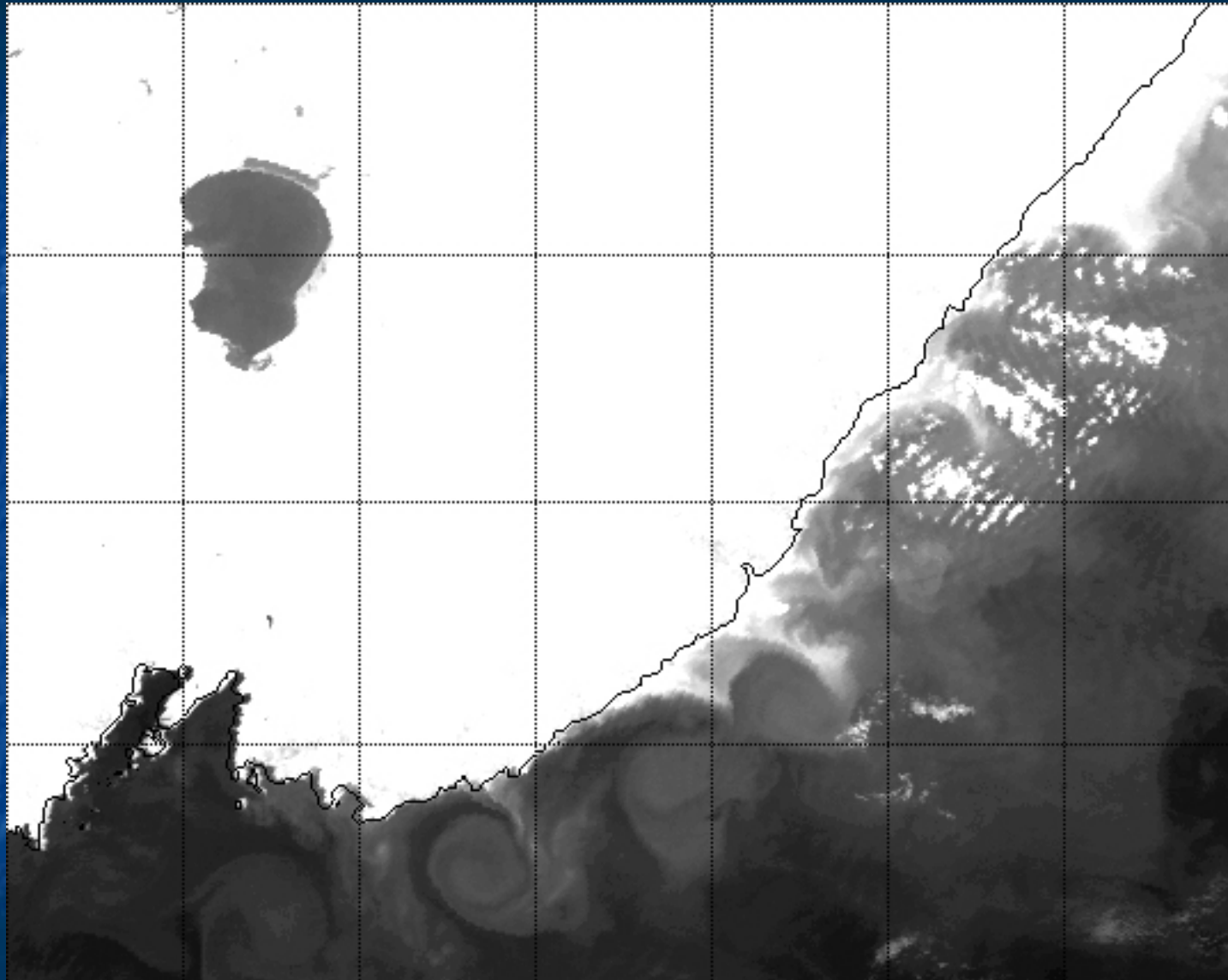
AVHRR NOAA 2008-09-10

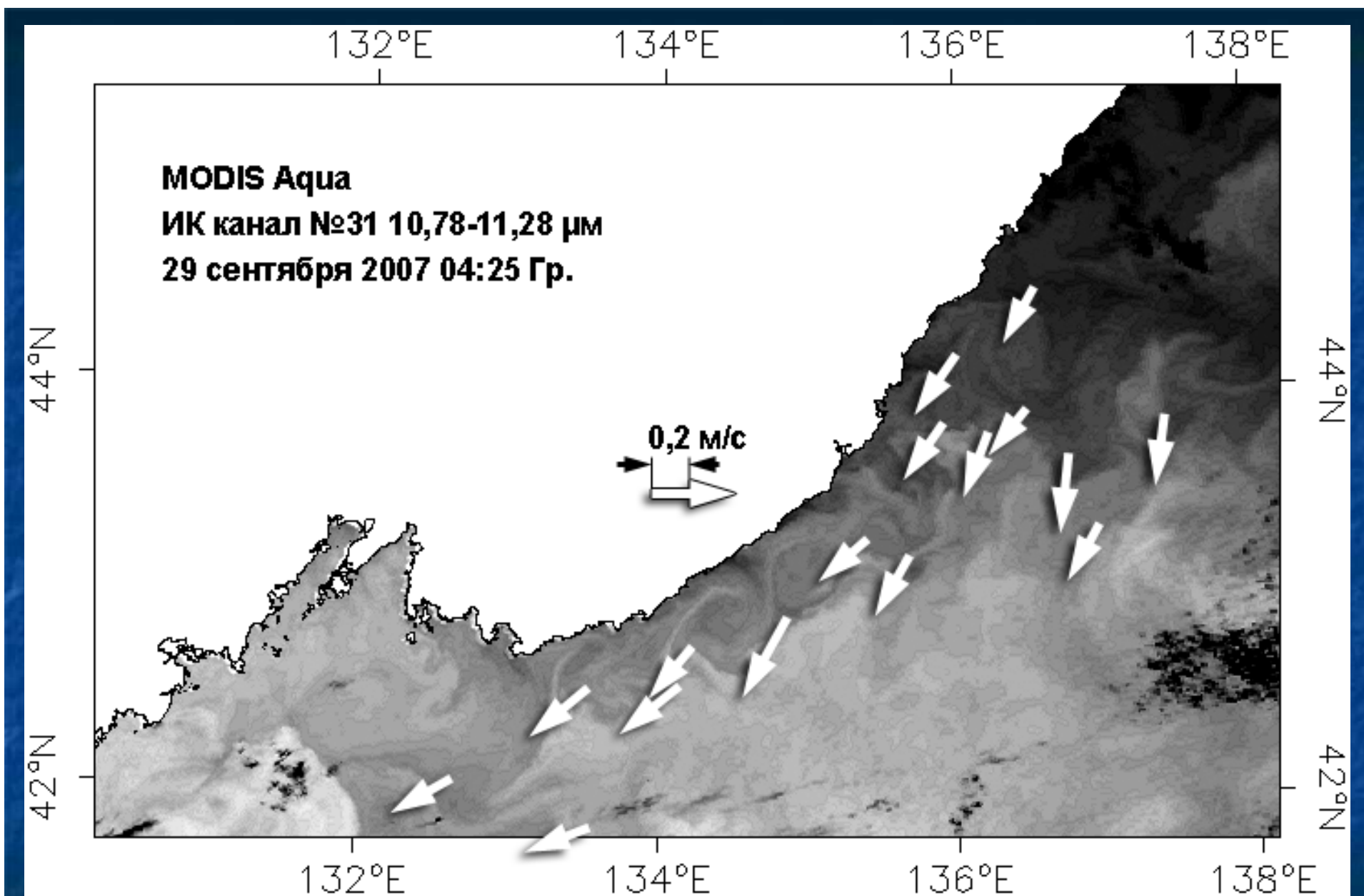


AVHRR NOAA 2008-09-13

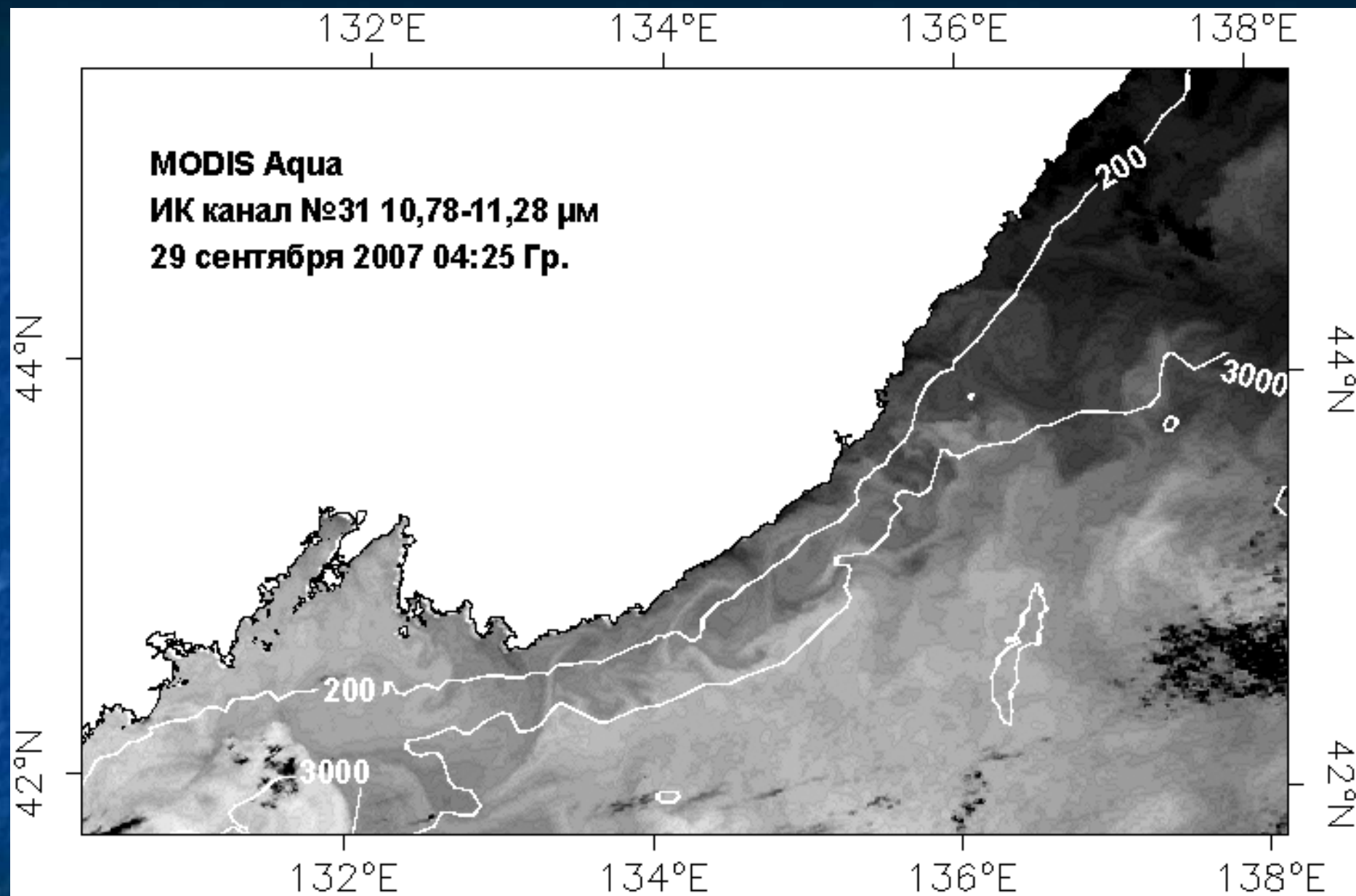


AVHRR NOAA 2008-09-18





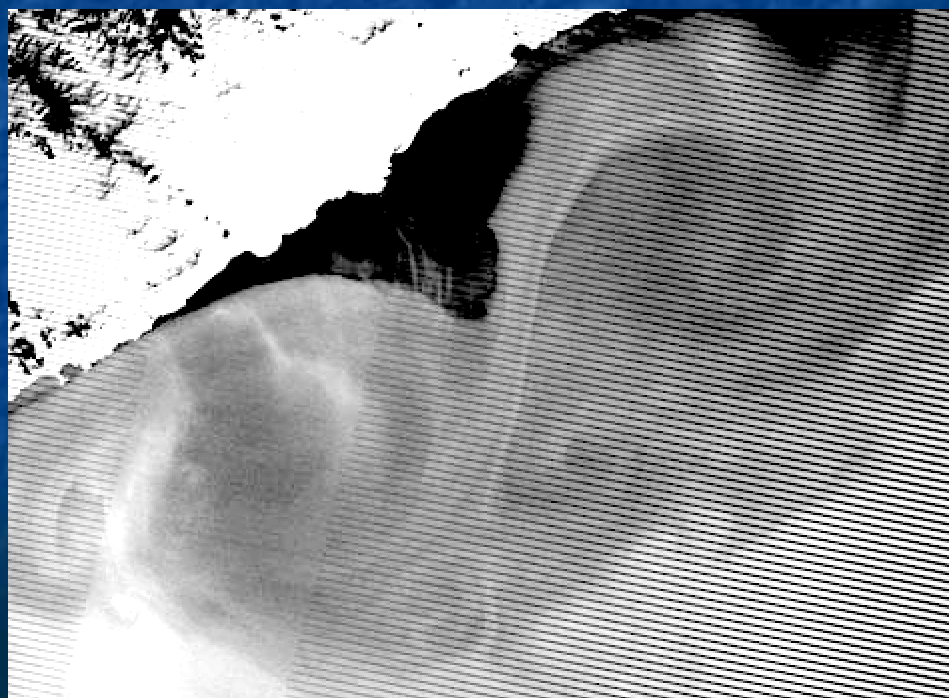
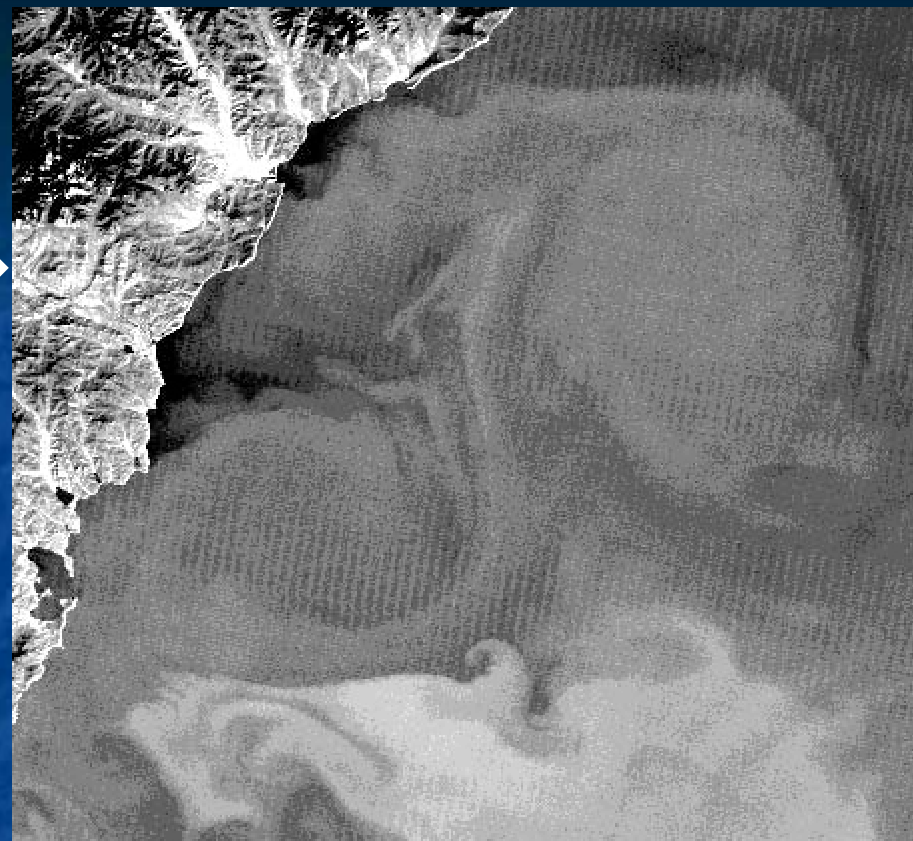
Антициклонические вихри вдоль побережья Приморского края на ИК-изображении, полученном спектрометрией MODIS со спутника Aqua 29 сентября 2007 г. в 04:25 Гр. Стрелками показаны вектора поверхностных течений, построенные по паре изображений MODIS за 28 и 29 сентября. Скорости составляют 0,1-0,2 м/с.

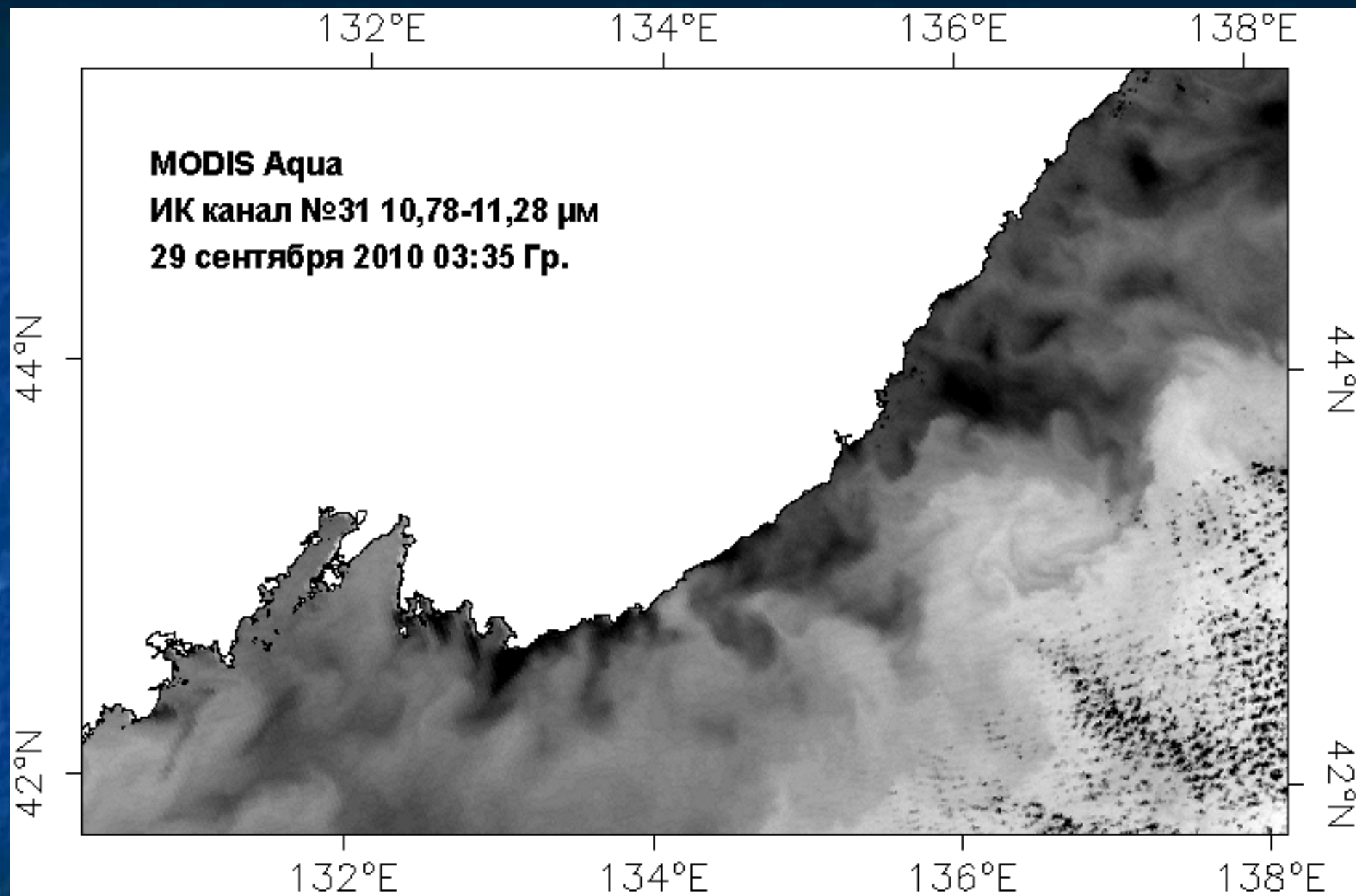


Антициклонические вихри вдоль побережья Приморского края на ИК-изображении, полученном спектрорадиометром MODIS со спутника Aqua 29 сентября 2007 г. в 04:25 Гр.

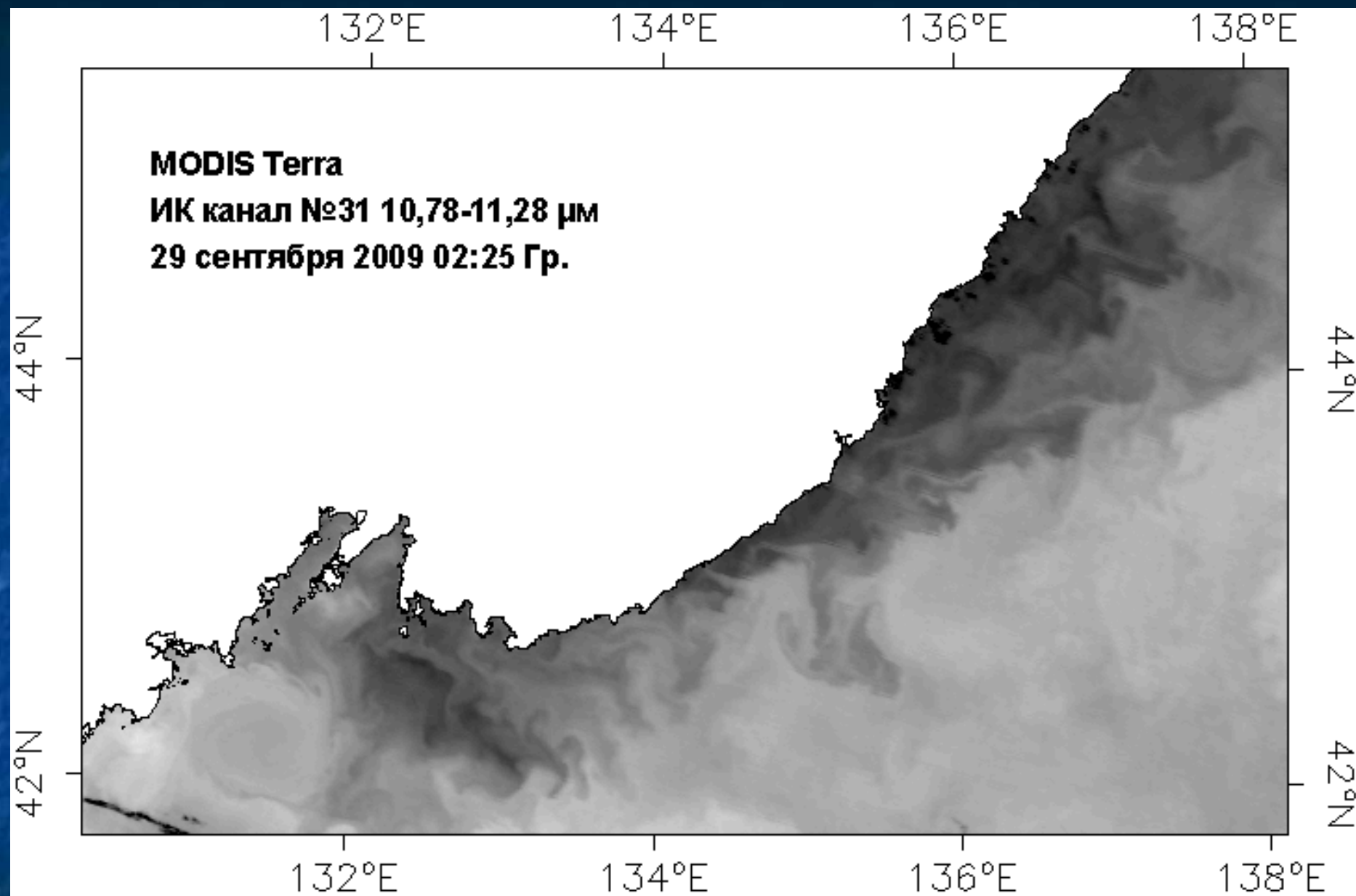
Landsat-7 14 сентября 2008 г. 01:33 Гр.

Landsat-5 29 сентября 2007 г. 01:31 Гр.

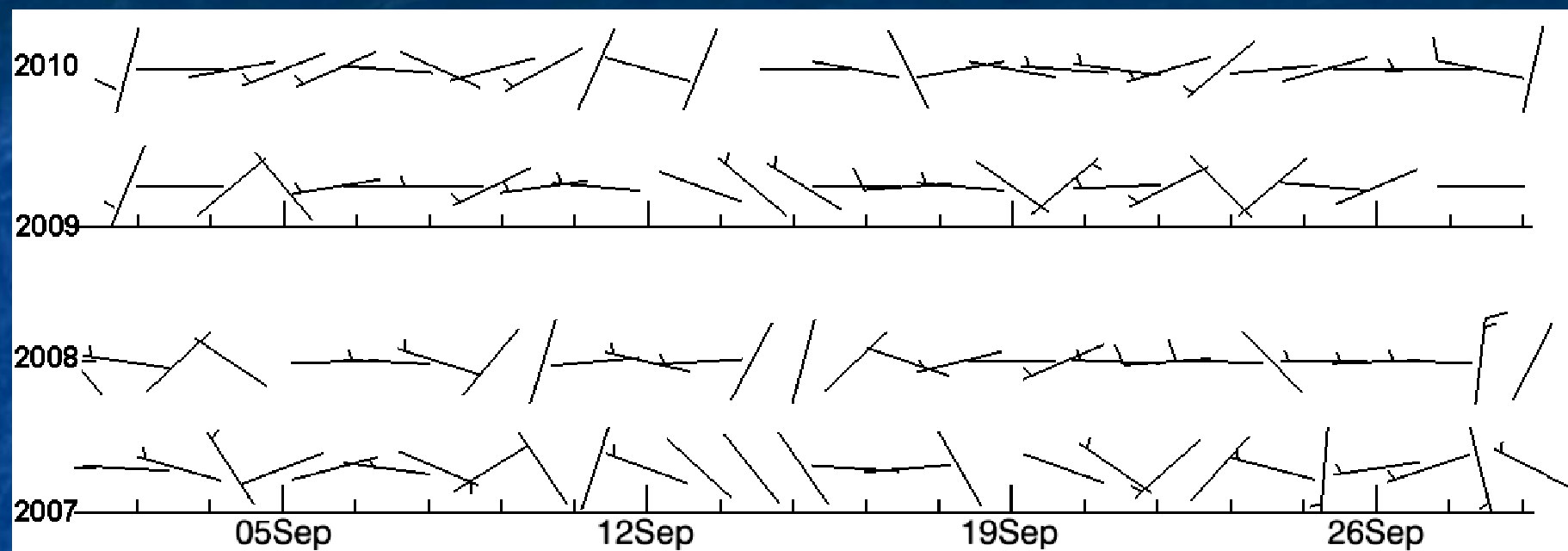




ИК-изображение, полученное спектрорадиометром MODIS со спутника Aqua  
29 сентября 2010 г. в 03:35 Гр.



ИК-изображение, полученное спектрорадиометром MODIS со спутника Terra  
29 сентября 2009 г. в 02:25 Гр.



Среднесуточный ветер на станции Рудная Пристань в сентябре 2007-2010 г.г.

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

- антициклонические синоптические вихри с характерным масштабом от 30 до 50 км формируются в районе Приморского течения над крутым континентальным склоном Японской котловины в районе, где склон граничит с узким шельфом Приморья;
- эти вихри перемещаются со скоростью около 2-3 см/с вниз по течению, средняя скорость которого заметно выше и составляет 8-10 см/с;
- центральные части вихрей расположена непосредственно над кромкой шельфа в районе изобаты 200м;
- перемещающиеся вдоль склона антициклонические вихри, как правило, являются взаимосвязанными организованными структурами с временным масштабом порядка десятков суток и месяца;
- на периферии антициклонических вихрей образуются короткоживущие циклонические вихри субсиноптического масштаба с характерным временным масштабом порядка нескольких суток;
- на периферии вихрей имеет место апвеллинг, наиболее выраженный над кромкой шельфа между вихрями и на шельфе.

## Заключение

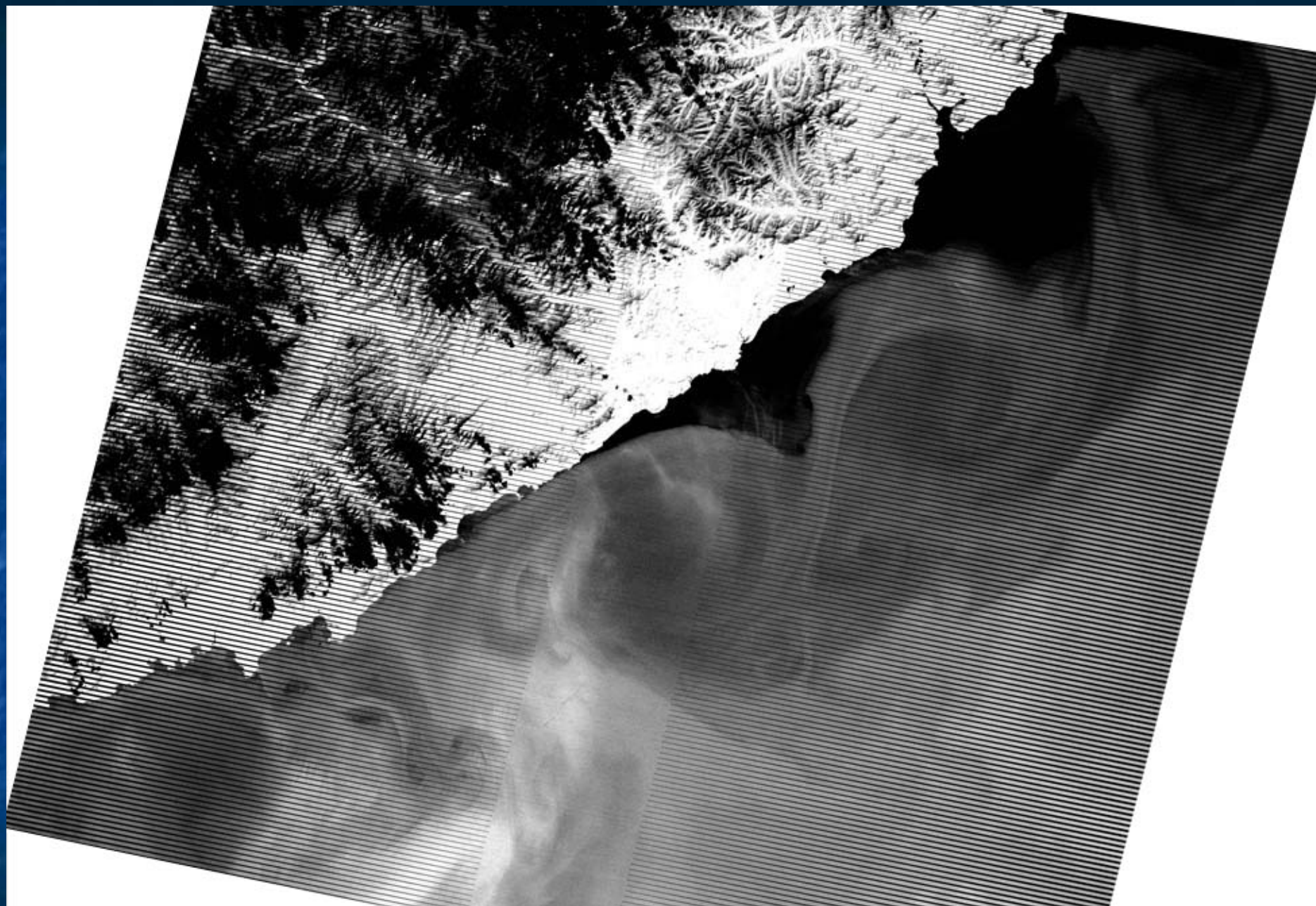
Полученные характерные особенности перемещающихся вдоль склона упорядоченных антициклонических вихрей позволяют предположить, что их природа связана с бароклинными волнами Кельвина генерируемыми внешними возмущениями при благоприятных условиях.

Отсутствие упорядоченных перемещающихся склоновых вихрей в конце летнего сезона в отдельные годы (2009, 2010) возможно обусловлено ослаблением южной и центральной ячеек субарктического циклонического круговорота.

Последнее в свою очередь может быть вызвано ослаблением бароклинных эффектов и предшествующей циклонической завихренности напряжения трения ветра в масштабе отмеченных ячеек круговорота.

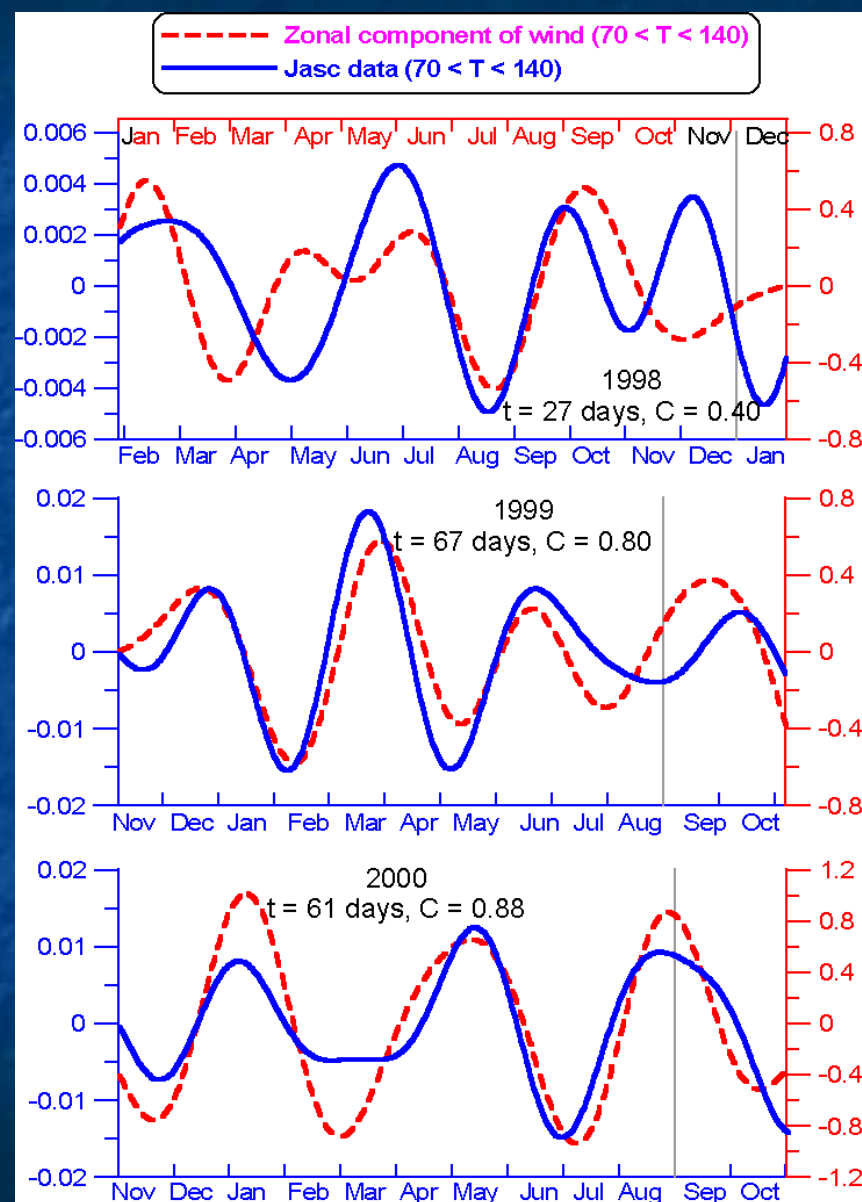
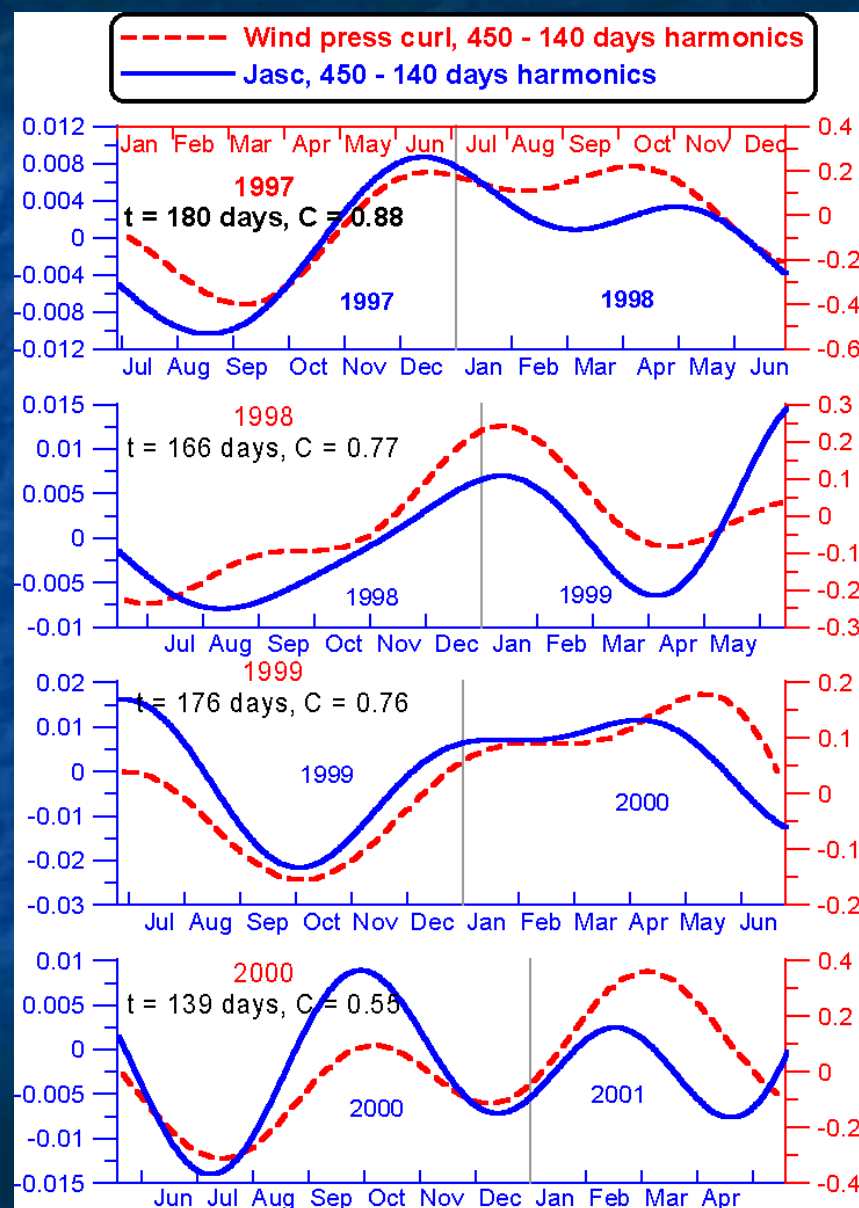
Thank you for attention





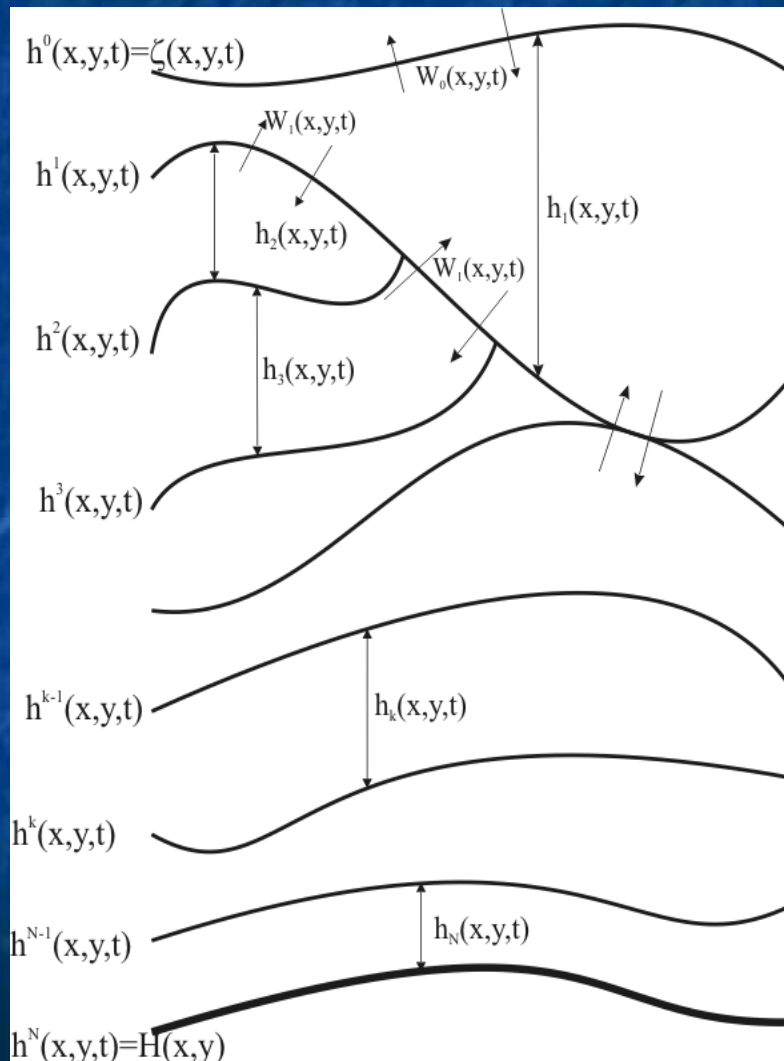
ИК-изображение, полученное со спутника Landsat-7 14 сентября 2008 г. в 01:33 Гр.

Comparison between wind stress curl in central Japan/East Sea and Nakhodka - Naoetsu cable (JASC) observation of volume transport (blue curve) trough the central Japan/East Sea.  
(Dyakova, Palshin, Ponomarev, Ostrovskii 2005).



# 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:

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

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  $h_l \left[ a \cdot (M^0 + M^{h^j}) + \varepsilon - W_1^- (b_1 - b_{j+1}) \right] = 2 \cdot m \cdot u_*^3$

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

## Boundary condition

1) For momentum equations:

$$\frac{\partial(u_k \cdot h_k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_k^2 \cdot h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k u_k \cdot h_k)}{\partial y} + Q_k^u - Q_{k-1}^u - f \cdot v_k \cdot h_k = h_k \left( g \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial(b_q \cdot h_q)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial(b_k \cdot h_k)}{\partial x} - b_k \cdot \sum_{q=1}^{k-1} \frac{\partial h_q}{\partial x} - \frac{b_k}{2} \cdot \frac{\partial h_k}{\partial x} \right) + A_1 \cdot \Delta(u_k \cdot h_k) - A \cdot \Delta \Delta(u_k \cdot h_k)$$

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 north-western part of Japan Sea adjacent to the Primorye continental coast. We set 10 quasi-isopycnal layers and horizontal grid size of 2.5 km and time step 3min.