



АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДИНАМИКИ РЕЧНЫХ ПЛЮМОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ



**«ВОЗДУХ, ВОДА
И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ»**

29-31 октября 2024 года,
г. Санкт-Петербург







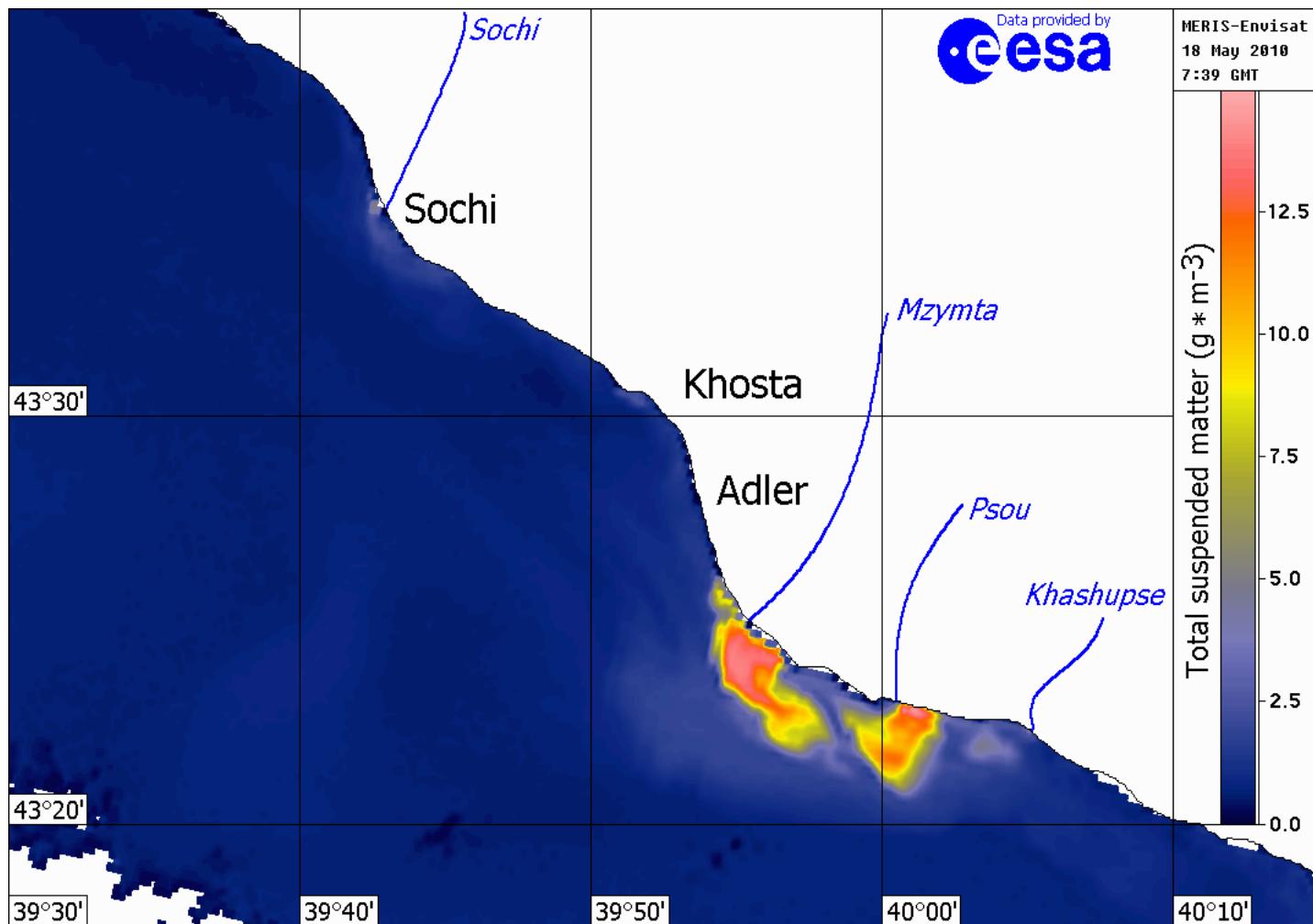


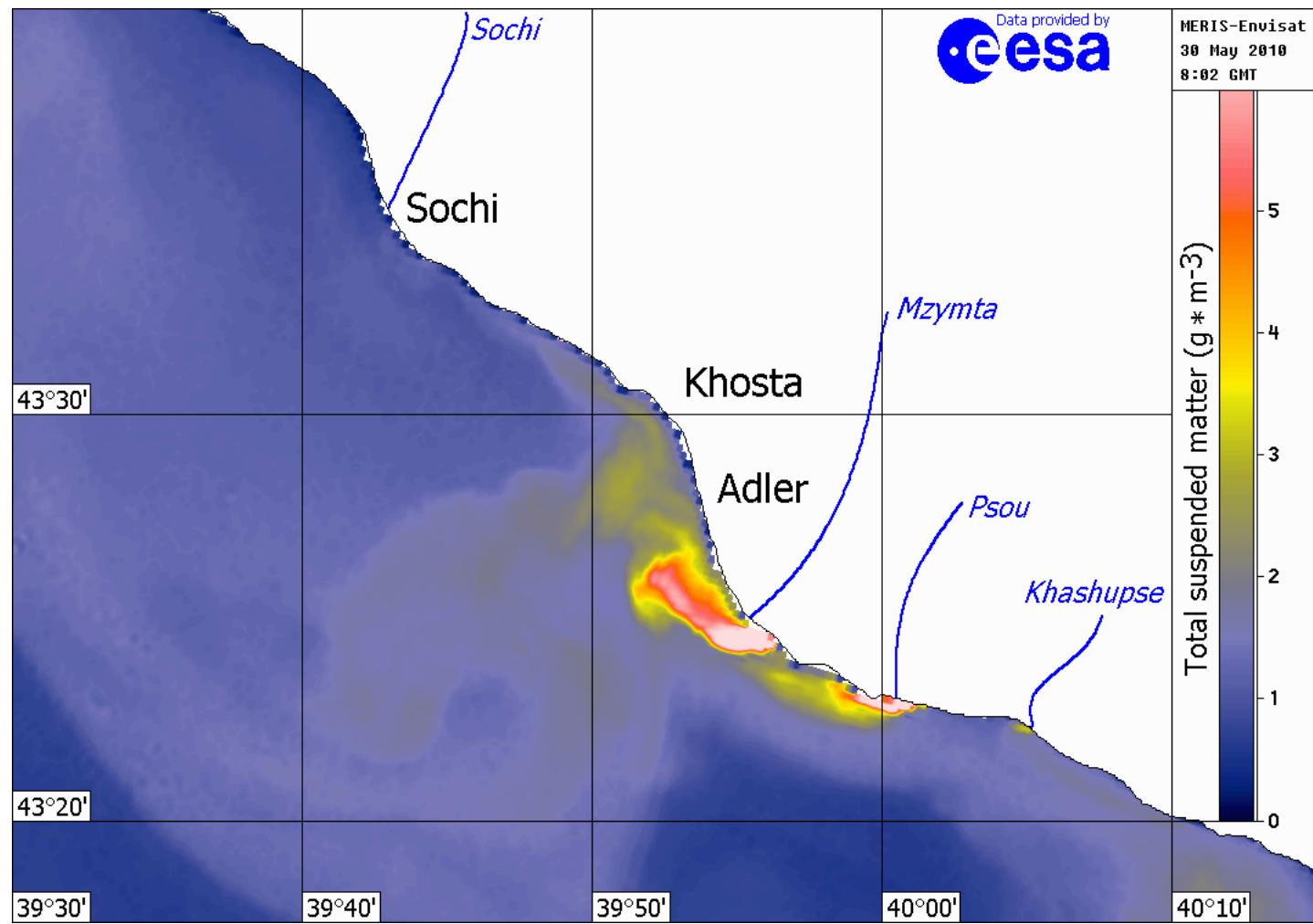


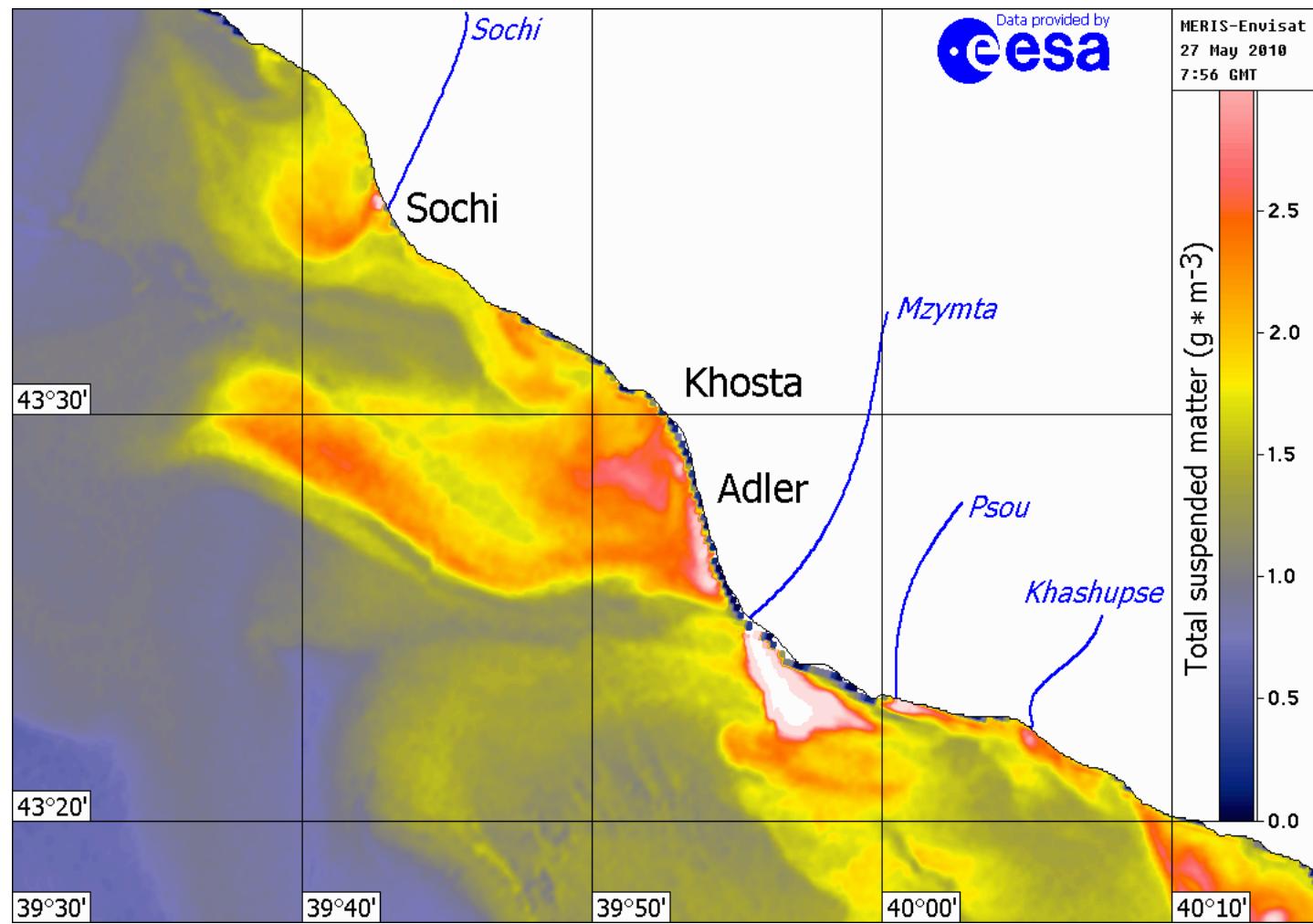


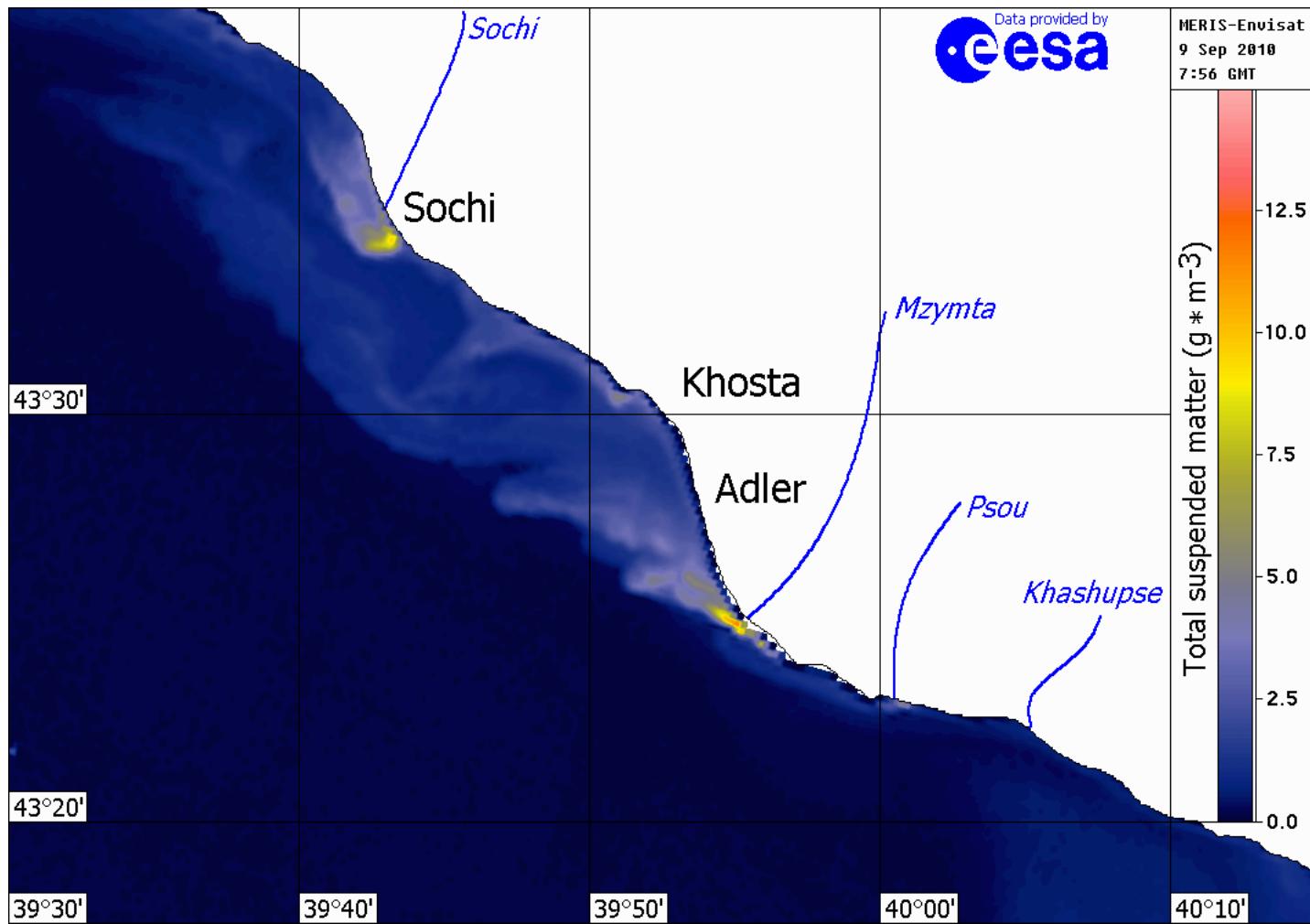


Спутниковые измерения взвеси





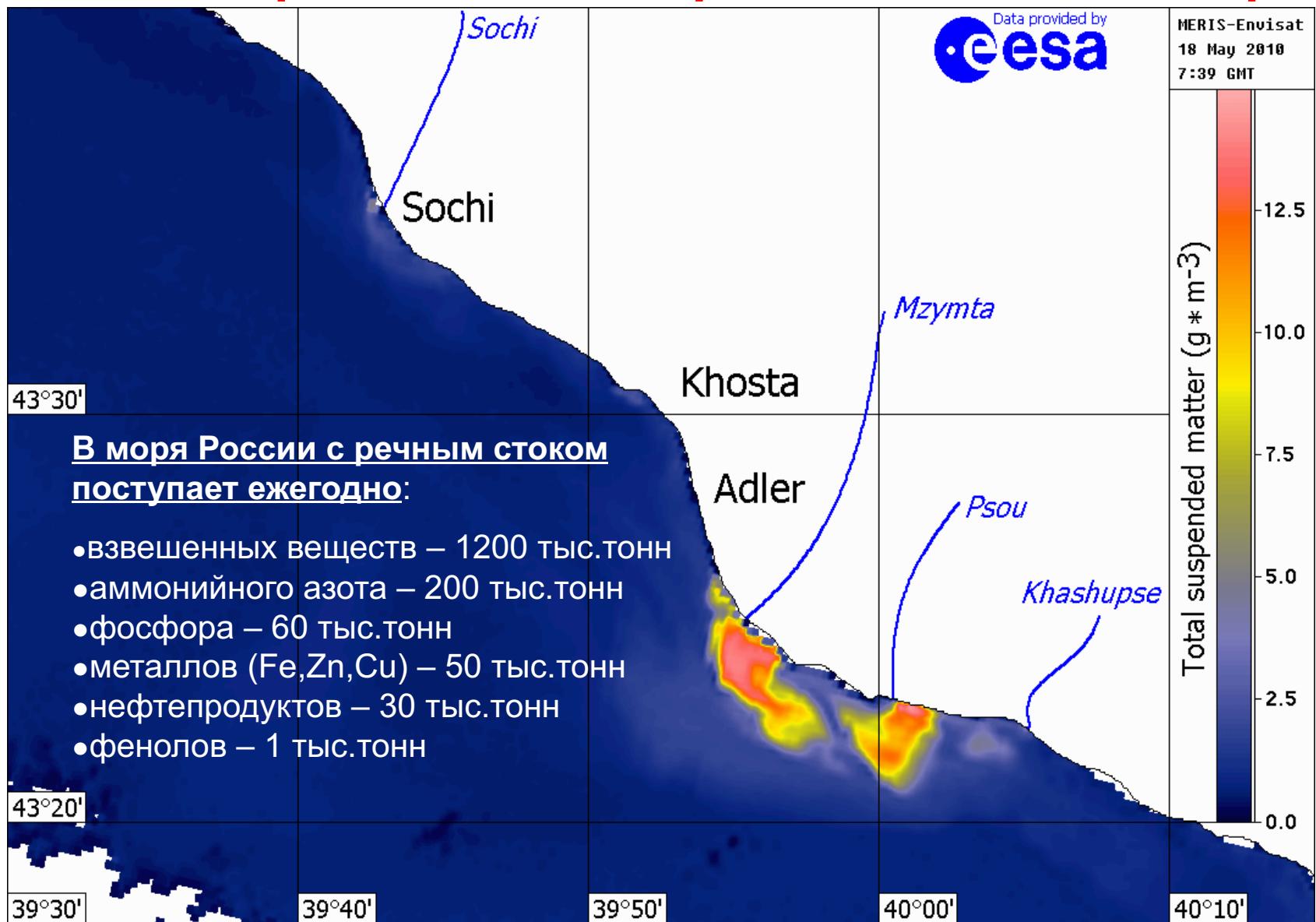




Перенос плюмами загрязнений в растворенной и взвешенной формах

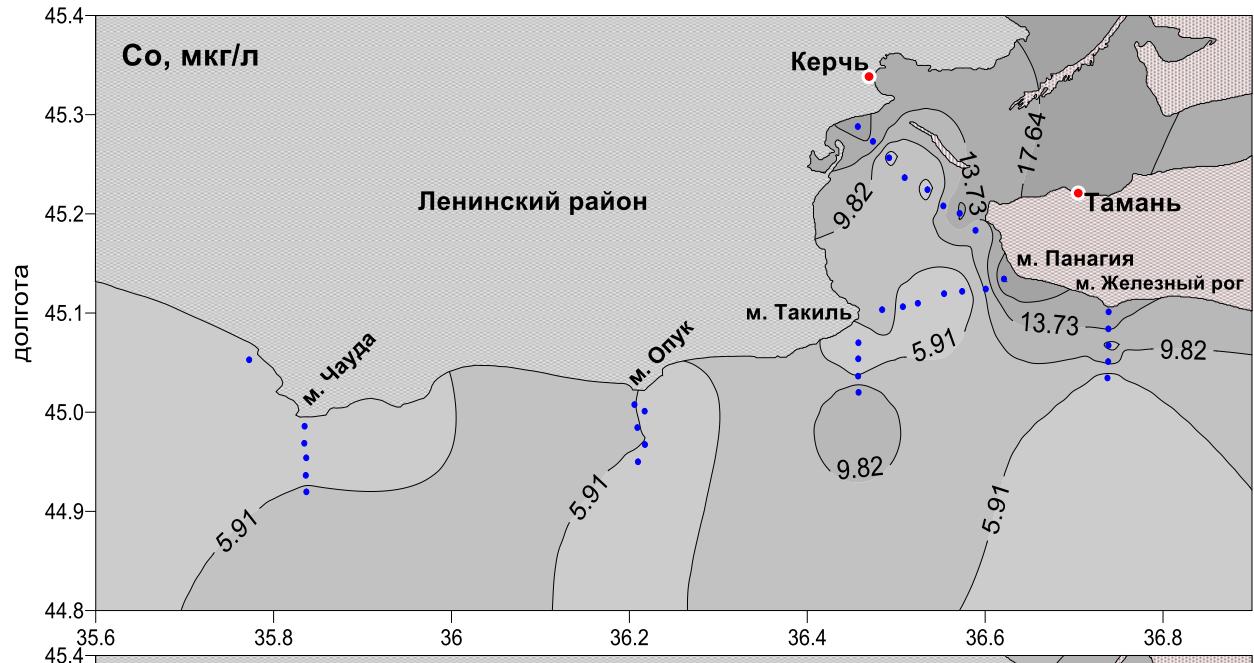
Завьялов П.О., Завьялов И.Б., Ижицкий А.С., Ижицкая Е.С., Коновалов Б.В., Кременецкий В.В., Немировская И.А., Часовников В.К., 2022. Оценка загрязнения Керченского пролива и прилегающей акватории Черного моря по данным натурных измерений 2019–2020 гг. // Океанология, т. 62, 2, с. 194-203, DOI: 10.31857/S0030157422020174

Вынос реками загрязнений в море

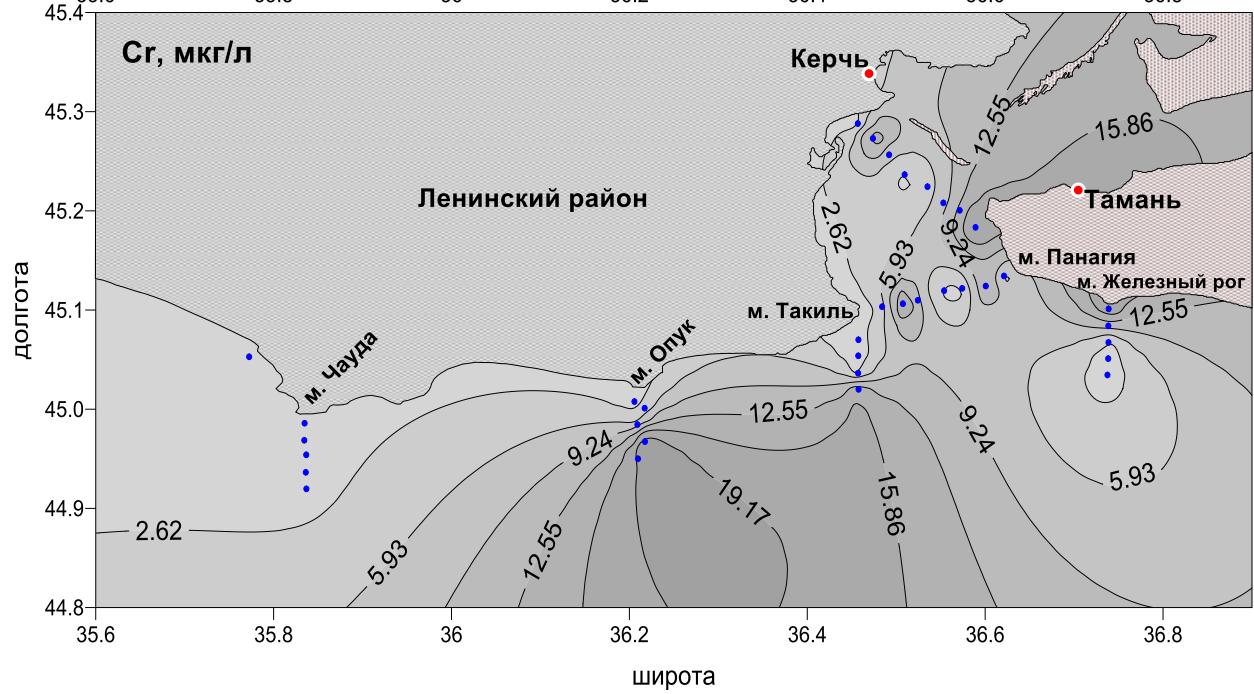


Черное море. 18 мая 2010 г.

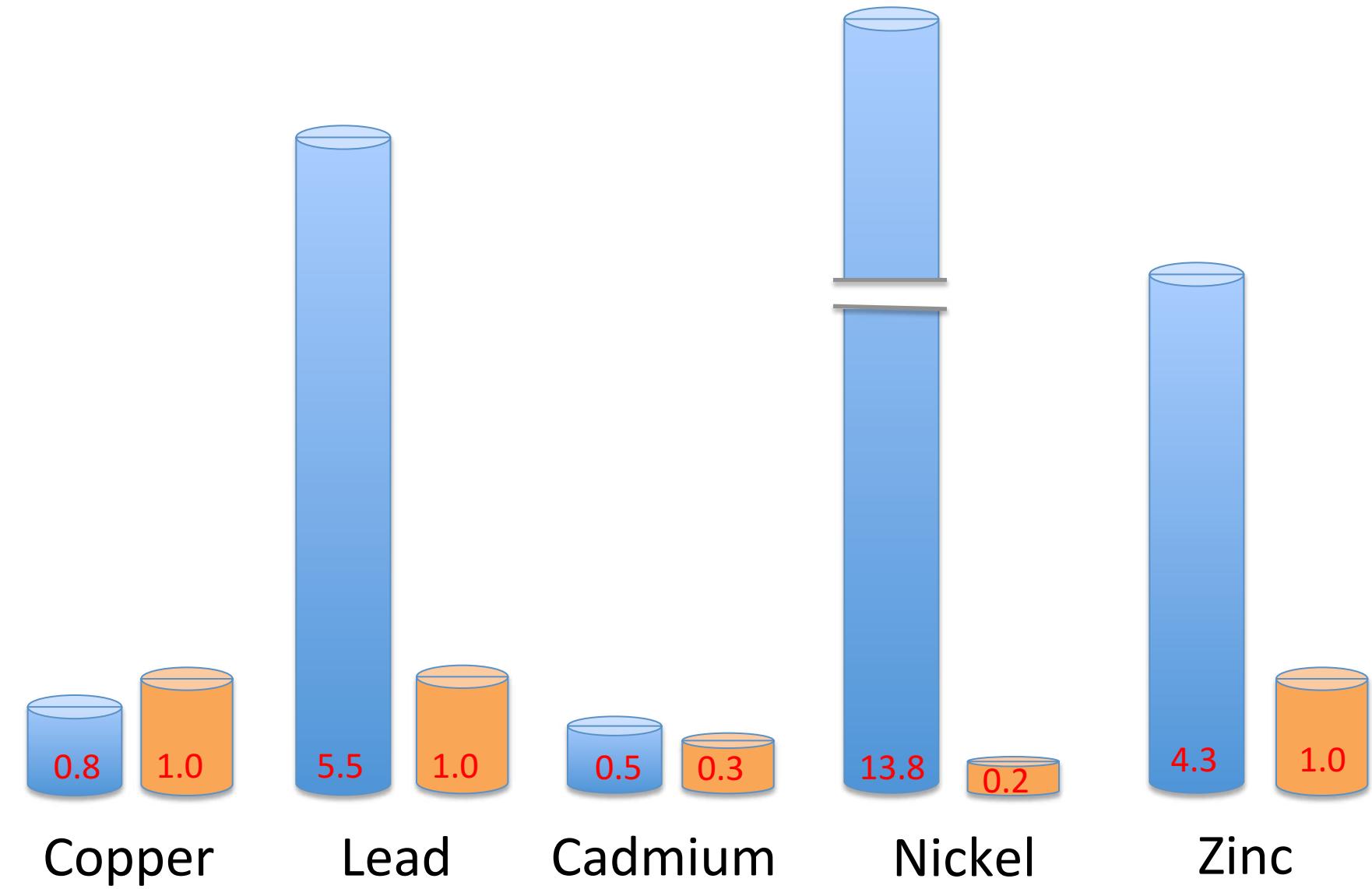
$\text{Co} - 4.47 \text{ ПДК}$



$\text{Cr} - 1.19 \text{ ПДК}$



Металлы в растворенной и сорбированной формах, μg/l

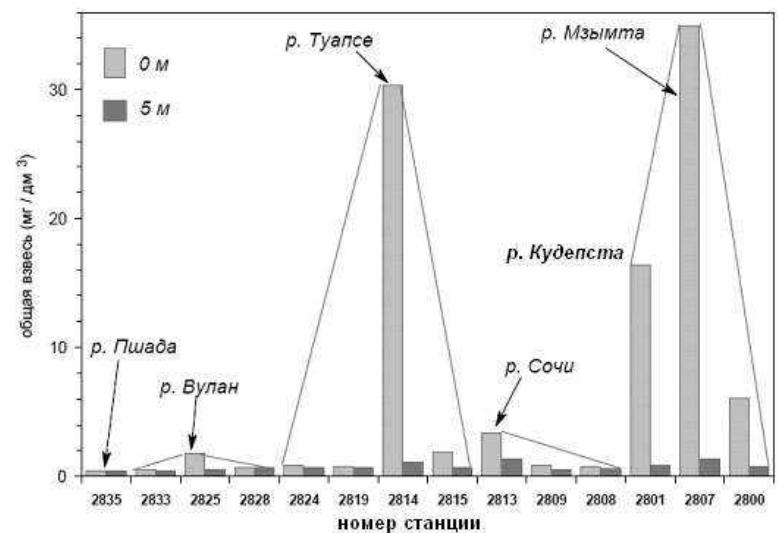
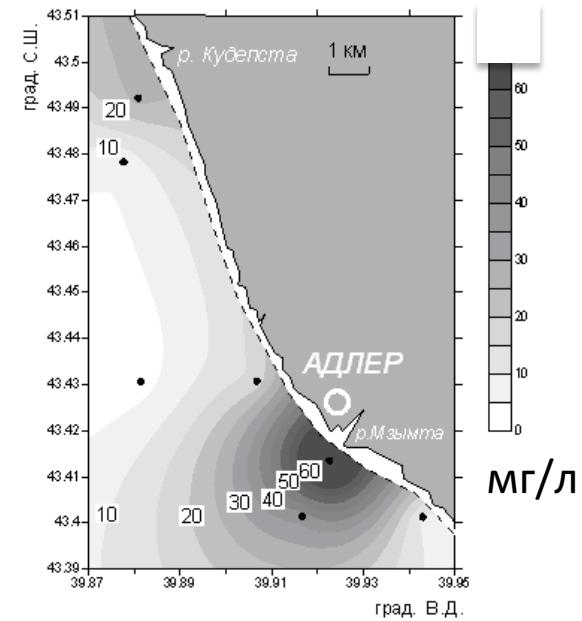


Parameter	Min	Max	Mean	MPC
Параметр	Минимум	Максимум	Среднее	ПДК** Мг/л
Detergents АПАВ*, мг/л	<0.01	0.046	0.016	0.1 мг/л
Медь(Cu) мкг\л	<0,5	2.72	0.78	5 мкг/л
Цинк (Zn) мкг\л	<1	11.80	4.33	50 мкг/л
Кадмий (Cd) мкг\л	0.20	2.20	0.55	10 мкг/л
Свинец (Pb) мкг\л	2.00	24.31	5.50	10 мкг/л
Никель (Ni) мкг\л	3.00	31.16	13.80	10 мкг/л
Хром (Cr) мкг\л	1.50	23.84	6.52	20 мкг/л
Кобальт (Co) мкг\л	3.00	22.34	8.14	5 мкг/л
ГХБ, нг/дм ³	< 0.10	4.00	0.85	Отсутствие
α-ГХЦГ (α-HCH), нг/дм ³	< 0.10	8.30	1.91	Отсутствие
γ-ГХЦГ (γ-HCH), нг/дм ³	< 0.10	34.10	1.72	Отсутствие
β-ГХЦГ (β-HCH), нг/дм ³	< 0.10	1.40	0.17	Отсутствие
4,4'-DDE, нг/дм ³	< 0.10	4.00	0.40	Отсутствие
4,4'-DDD, нг/дм ³	< 0.10	4.40	0.24	Отсутствие
4,4'-DDT, нг/дм ³	< 0.10	12.30	0.72	Отсутствие
Σ (DDE, DDD, DDT), нг/дм ³	< 0.10	12.80	1.17	Отсутствие
ΣХОП (Σ Pesticides), нг/дм ³	< 0.10	34.30	5.58	10 нг/дм ³

Перенос взвеси и внутренняя структура плюмов

Zavialov, P.O., Pelevin, V.V., Belyaev, N.A., Izhitskiy, A.S., Konovalov, B.V., Krementskiy, V.V., Goncharenko, I.V., Osadchiev, A.A., Soloviev, D.M., Garcia, C.A.E., Pereira, E.S., Sartorato, L., Moller Jr., O.O., 2018. High resolution LiDAR measurements reveal fine internal structure and variability of sediment-carrying coastal plume, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 205, 40-45, doi:10.1016/j.ecss.2018.01.008.

Распределения взвеси в прибрежной зоне Черного моря



Main parameters of the lidar UFL-9:

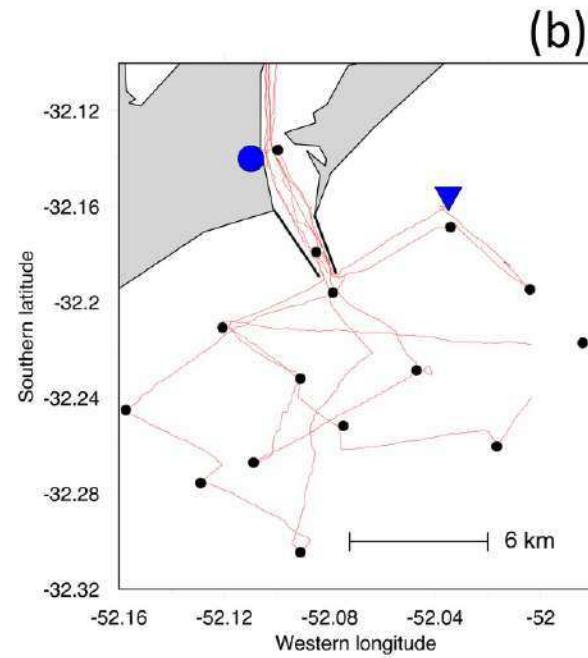


- **Laser wavelengths** – 354 and 532 nm.
- **Frequency of sounding** – 2 Hz.
- **Energy in a pulse** – 2+2 mJ.
- **Duration of sounding pulse** – 6 ns.
- **Entrance aperture of the receiver** – 140 mm.
- **Working distance range** - 2 – 50 m.
- **Number of spectral receiver channels** – 11.
- **Weight of the device** – 35 kg.
- **Power supply** – 220 AC / 12 DC.
- **PC-controlled.**
- **GPS geo tagged.**
- **Water-proof housing, working at any weather or sunlight conditions.**

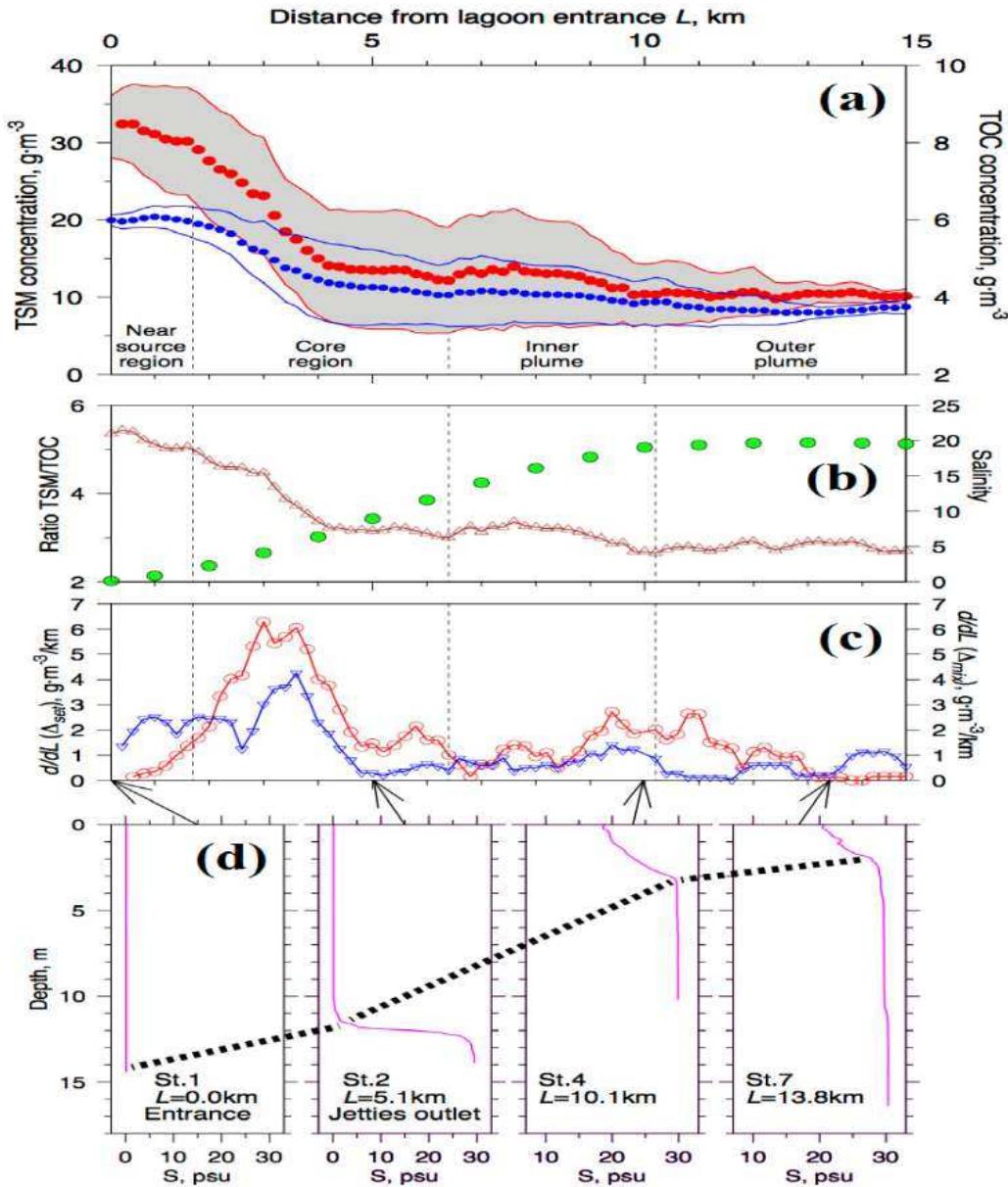
79,387 одновременных определений ТСМ и ТОС в течение суток

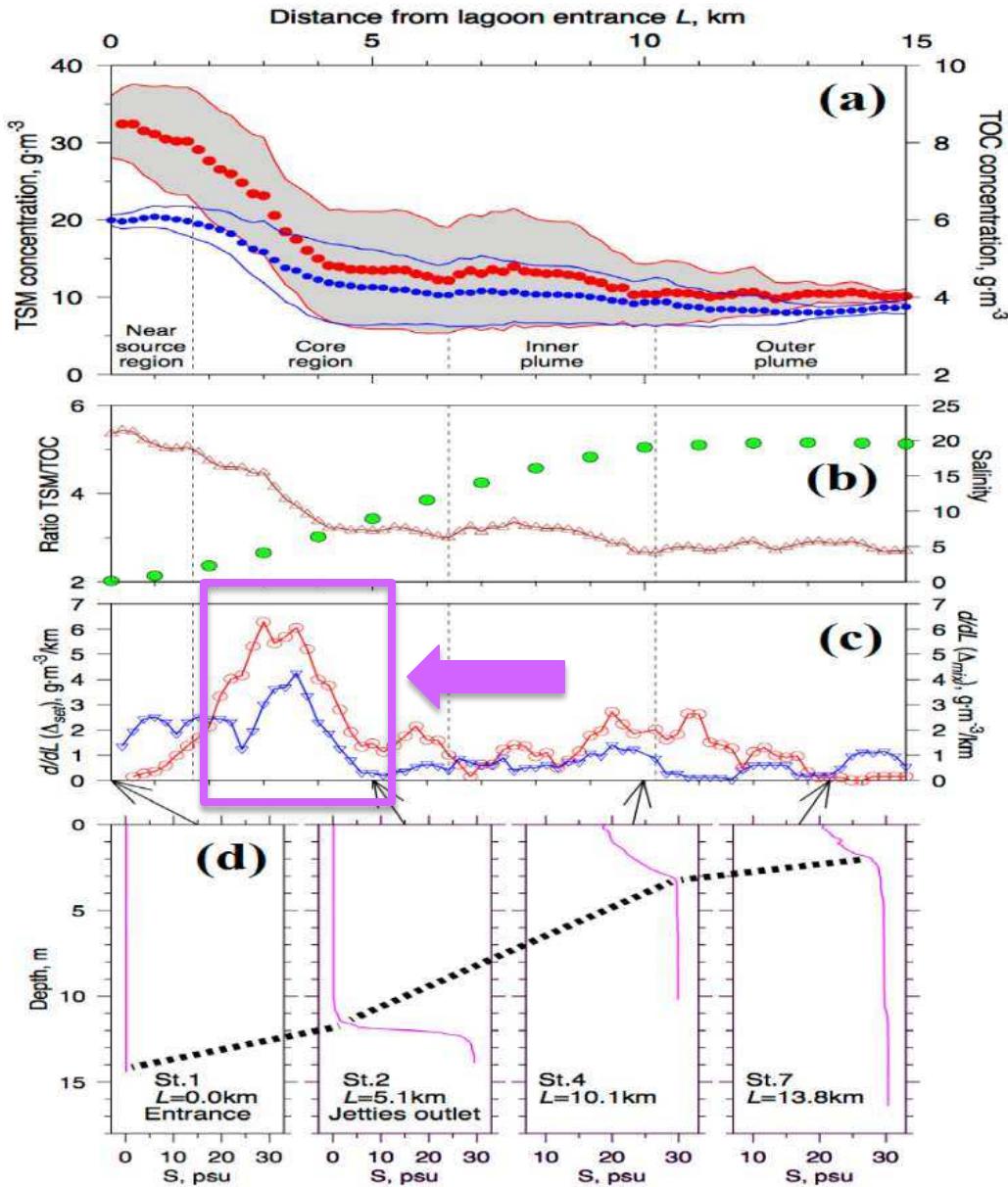


(a)

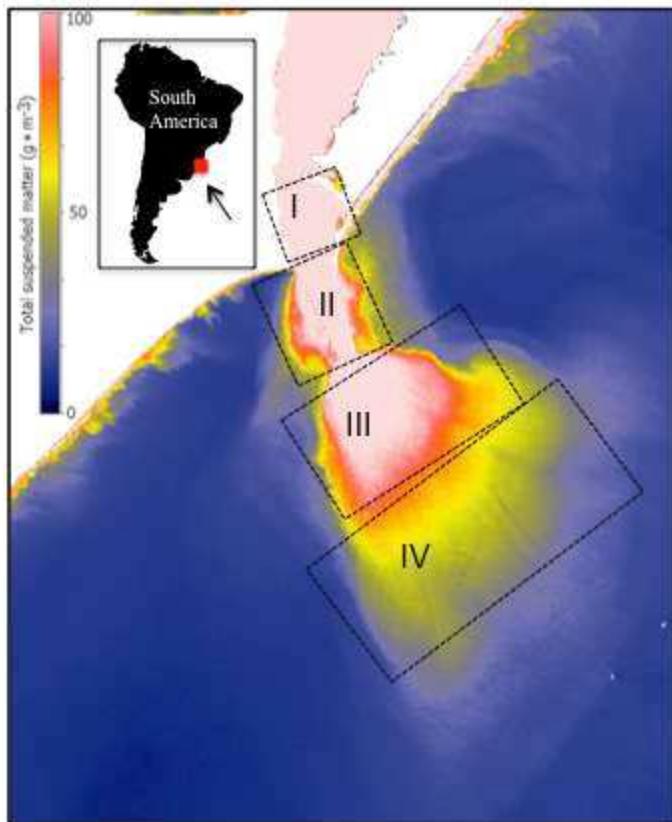


(b)





Четыре внутренних области плюма



I - No stratification. Salinity close to zero. Area less than 2% of the total plume area accounts for about 14% of total suspended matter (TSM) removal from surface layer, mainly because of gravitational settling.

II - Stratification develops in the bottom layer. The area is responsible for about 30% of both TSM and total organic carbon (TOC) content and over 50% of TSM loss, mainly due to turbulent mixing.

III - Shallowing of the plume-affected layer and increase of salinity oceanward. Elevated spatial variability of TSM and TOC concentrations. About 25% of TSM removal from the upper layer takes place here.

IV - Salinity and thickness of the plume-affected layer almost uniform. Only about 10% of the TSM removal takes place in this part of plume.

Лагранжева модель речного плюма

Osadchiev, A.A., and P.O. Zavialov, 2013. Lagrangian model of a surface-adverted river plume.
Continental Shelf Research, **58**, 96–106, [doi: 10.1016/j.csr.2013.03.010](https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.03.010)

Numerical modeling

Уравнение сохранения импульса для частицы

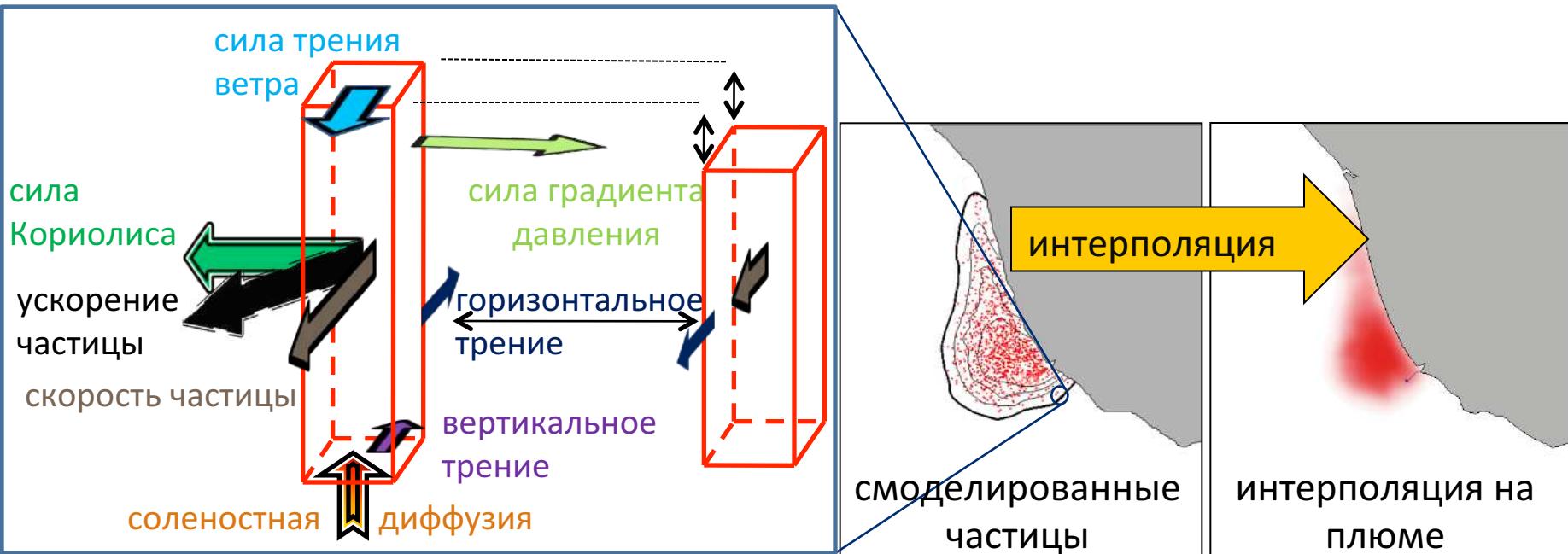
сила Кориолиса трение ветра вертикальное трение

горизонтальное трение

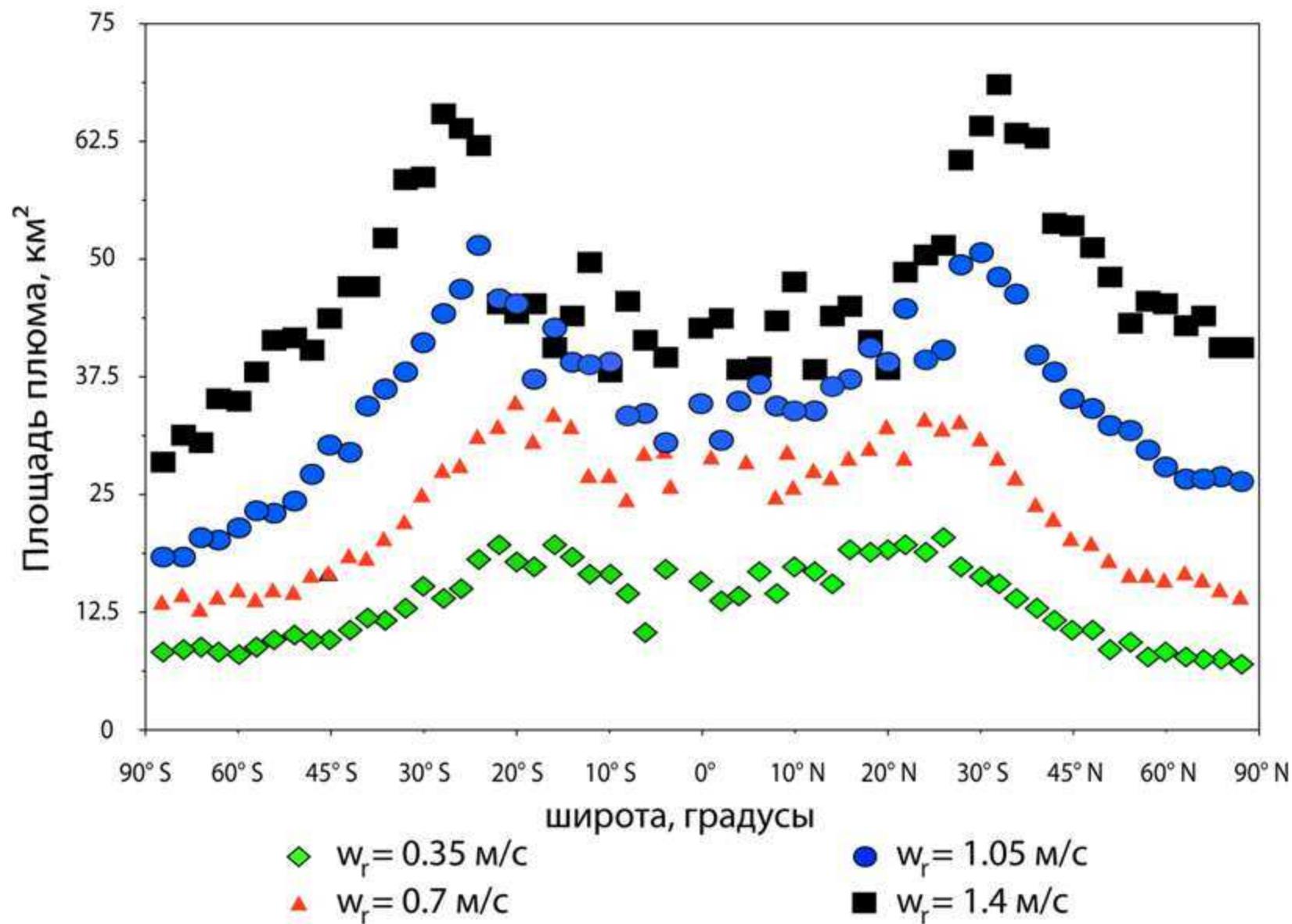
сила градиента давления

$$a_x^{i+1} = f v^i + \frac{\tau_x^i}{\rho^i h^i} - \frac{\mu_v^i u^i - u_{sea}^i}{h^i} + \frac{\mu_h}{h^i} \left(\frac{u_{x+\Delta x,y}^i + u_{x-\Delta x,y}^i - 2u^i}{\Delta x} + \frac{u_{x,y+\Delta y}^i + u_{x,y-\Delta y}^i - 2u^i}{\Delta y} \right) - g \kappa \frac{h_{x+\Delta x,y}^i - h_{x-\Delta x,y}^i}{\Delta x}$$
$$a_y^{i+1} = -f u^i + \frac{\tau_y^i}{\rho^i h^i} - \frac{\mu_v^i v^i - v_{sea}^i}{h^i} + \frac{\mu_h}{h^i} \left(\frac{v_{x+\Delta x,y}^i + v_{x-\Delta x,y}^i - 2v^i}{\Delta x} + \frac{v_{x,y+\Delta y}^i + v_{x,y-\Delta y}^i - 2v^i}{\Delta y} \right) - g \kappa \frac{h_{x,y+\Delta y}^i - h_{x,y-\Delta y}^i}{\Delta y}$$

Surface Trapped River Plume Evolution model (Osadchiev and Zavialov, 2013)



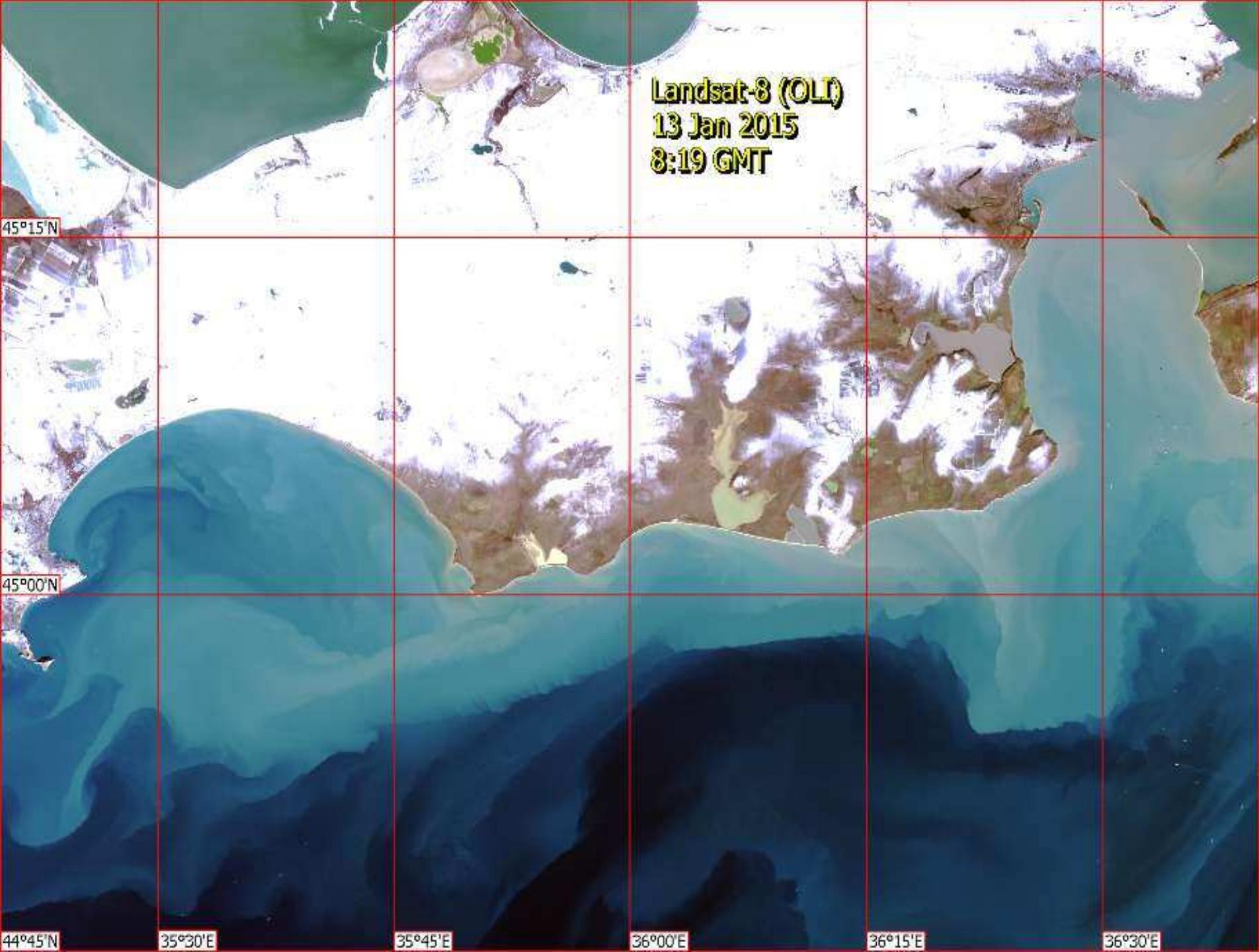
Plume dependence on Coriolis parameter



Влияние плюма на кросс-шельфовый перенос

Zavialov, P.O., A.S. Izhitskiy, and R.O. Sedakov, 2018. Sea of Azov waters in the Black Sea: Do they enhance wind-driven flows on the shelf? IN: M.G. Velarde, R.Yu. Tarakanov, A.V. Marchenko (Eds): The Ocean in Motion. Circulation, Waves, Polar Oceanography, 978-3-319-71933-7, Springer, ISBN 978-3-319-71934-4, DOI: 10.1007/978-3-319-71934-4, pp. 461-474.

Landsat-8 (OLI)
13 Jan 2015
8:19 GMT



45°15'N

45°00'N

44°45'N

35°30'E

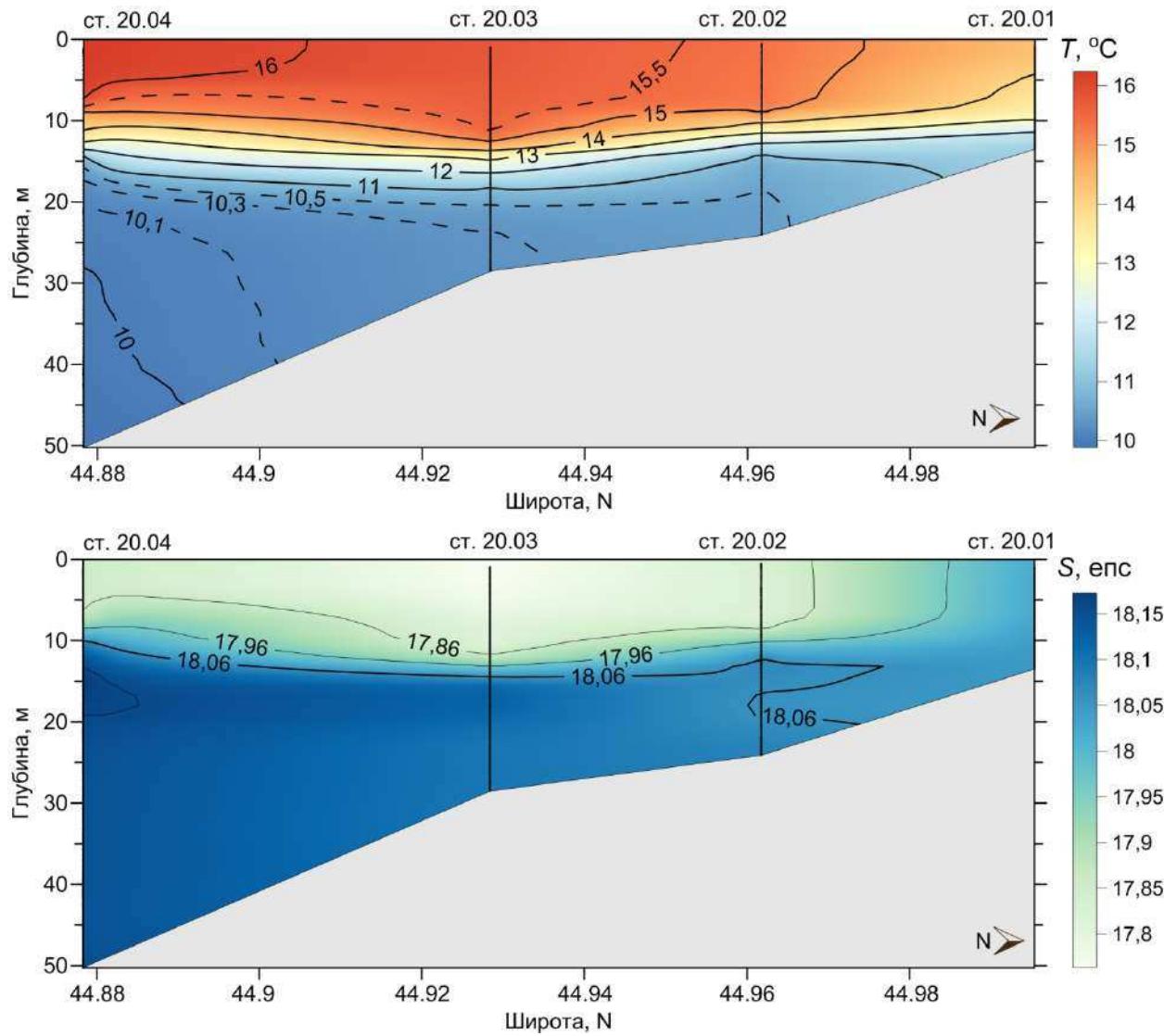
35°45'E

36°00'E

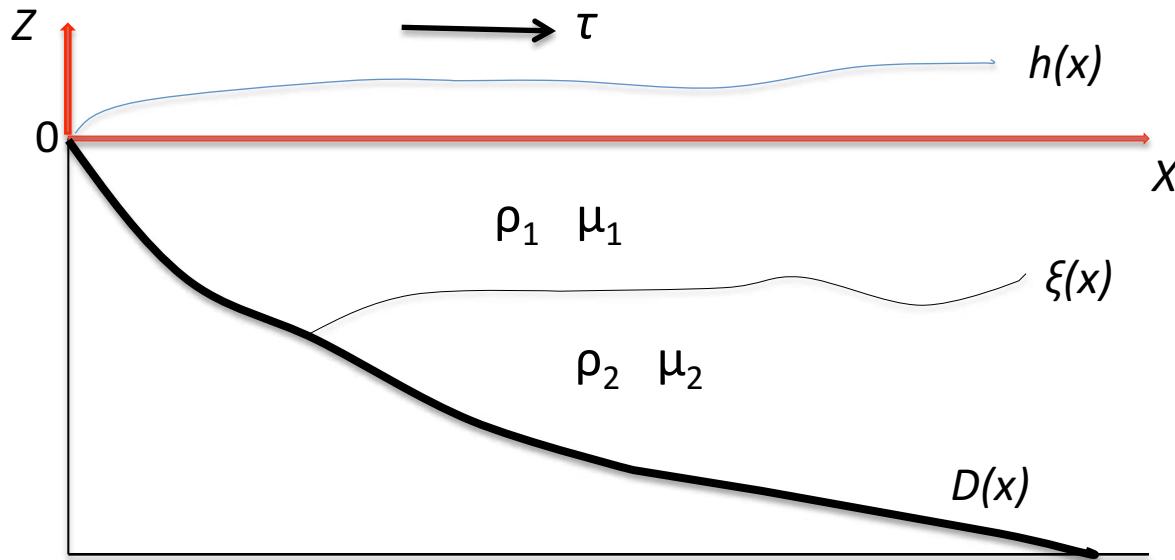
36°15'E

36°30'E

Вертикальная структура – поперечный берегу разрез от м. Чауда



Модель



Уравнения движения

$$\mu_1 \frac{\partial^2 u_1}{\partial z^2} = g \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$\rho_2 \mu_2 \frac{\partial^2 u_2}{\partial z^2} = g \rho_1 \frac{\partial h}{\partial x} - g(\rho_2 - \rho_1) \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

Уравнения неразрывности

$$\frac{\partial w_1}{\partial z} = - \frac{\partial u_1}{\partial x}$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial z} = - \frac{\partial u_2}{\partial x}$$

Границные условия

$$1. \quad \rho_1 \mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \tau,$$

$$2. \quad u_2(D) = 0,$$

$$3. \quad w_2(D) = 0,$$

$$4. \quad \frac{w_1(\xi)}{u_1(\xi)} = \xi'(x),$$

$$5. \quad \frac{w_2(\xi)}{u_2(\xi)} = \xi'(x),$$

$$6. \quad \rho_1 \mu_1 \frac{\partial u_1}{\partial z} \Big|_{z=\xi} = \rho_2 \mu_2 \frac{\partial u_2}{\partial z} \Big|_{z=\xi}.$$

Решение

$$u_1(x, z) = \frac{S_1(x)}{2}z^2 + A_1z + B_1(x),$$

$$u_2(x, z) = \frac{S_2(x)}{2}z^2 + A_2z + B_2(x),$$

$$w_1(x, z) = -\frac{S'_1(x)}{6}z^3 - \frac{A'_1(x)}{2}z^2 - B'_1(x)z + C_1(x),$$

$$w_2(x, z) = -\frac{S'_2(x)}{6}z^3 - \frac{A'_2(x)}{2}z^2 - B'_2(x)z + C_2(x).$$

где

$$S_1(x) \equiv \frac{g}{\mu_1} \frac{\partial h}{\partial x},$$

причем функции $S_1(x)$ и $B_1(x)$ суть решения следующих уравнений:

$$S_2(x) \equiv \frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2} S_1 - \frac{g}{\mu_2} \frac{\Delta \rho}{\rho_2} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \Delta \rho = \rho_2 - \rho_1,$$

$$A_1 = \frac{\tau}{\rho_1 \mu_1},$$

$$A_2(x) = \frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2} [S_1 \xi + A_1] - S_2 \xi,$$

$$B_2(x) = -\frac{S_2}{2} D^2 - A_2 D,$$

$$C_1(x) = \frac{\mu_1}{g} S_1 B_1,$$

$$C_2(x) = \frac{S'_2}{6} D^3 + \frac{A'_2}{2} D^2 + B'_2 D,$$

$$S'_1 \left[-\frac{rD^3}{3} + \frac{rD^2}{2} \xi - \frac{r\xi^3}{6} \right] + S_1 \left[\xi + 2D^2 D' r - \frac{\xi \xi^2}{2} + \frac{\xi' D^2}{2} r \right] + F = 0, \quad \text{где}$$

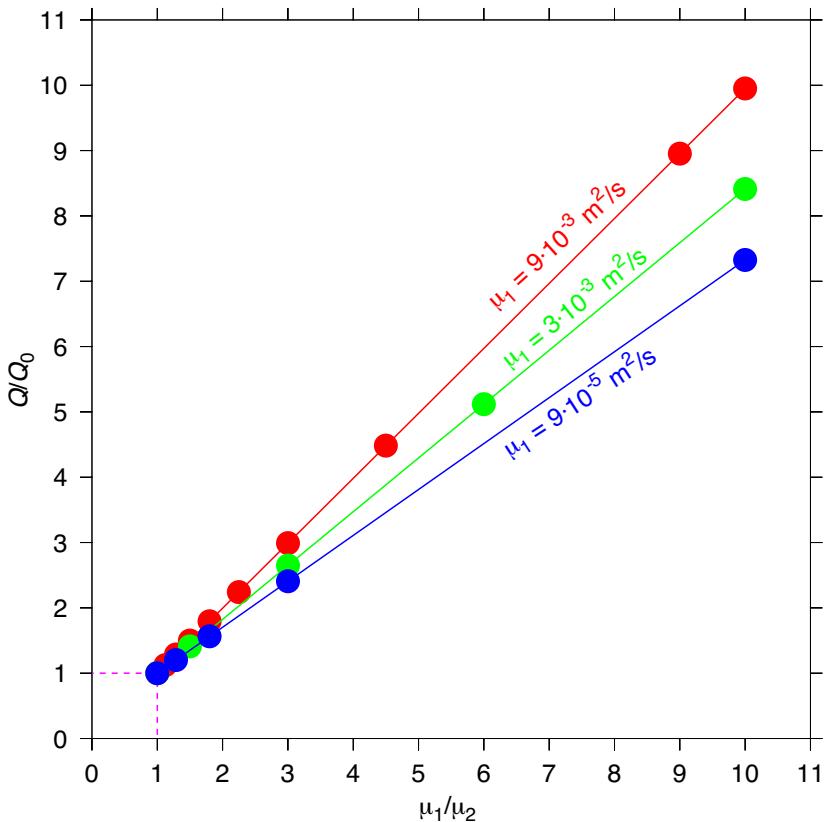
$$F = \frac{2}{3} \alpha \xi^3 \xi'' + \alpha \left(D^2 - \frac{\xi^2}{2} \right) (\xi')^2 + D' r \frac{\tau}{\rho_1 \mu_1} (D - \xi) - \alpha \xi'' \xi^2 D - \alpha \xi' \xi^2 D' - \frac{\alpha}{2} \xi'' \xi D^2 - 3DD' \alpha \xi' \xi - \frac{2}{3} \alpha D^3 \xi'' - 2D^2 \alpha D' \xi' - \frac{\alpha}{2} (\xi')^2 \xi^2 - \xi' \frac{r\tau}{\mu_1 \rho_1} (D + \xi) - D \alpha (\xi')^2 \left(\xi + \frac{D}{2} \right),$$

$$r = \frac{\rho_1 \mu_1}{\rho_2 \mu_2},$$

$$\alpha = \frac{g}{\mu_2 \rho_2} \frac{\Delta \rho}{\rho_2}.$$

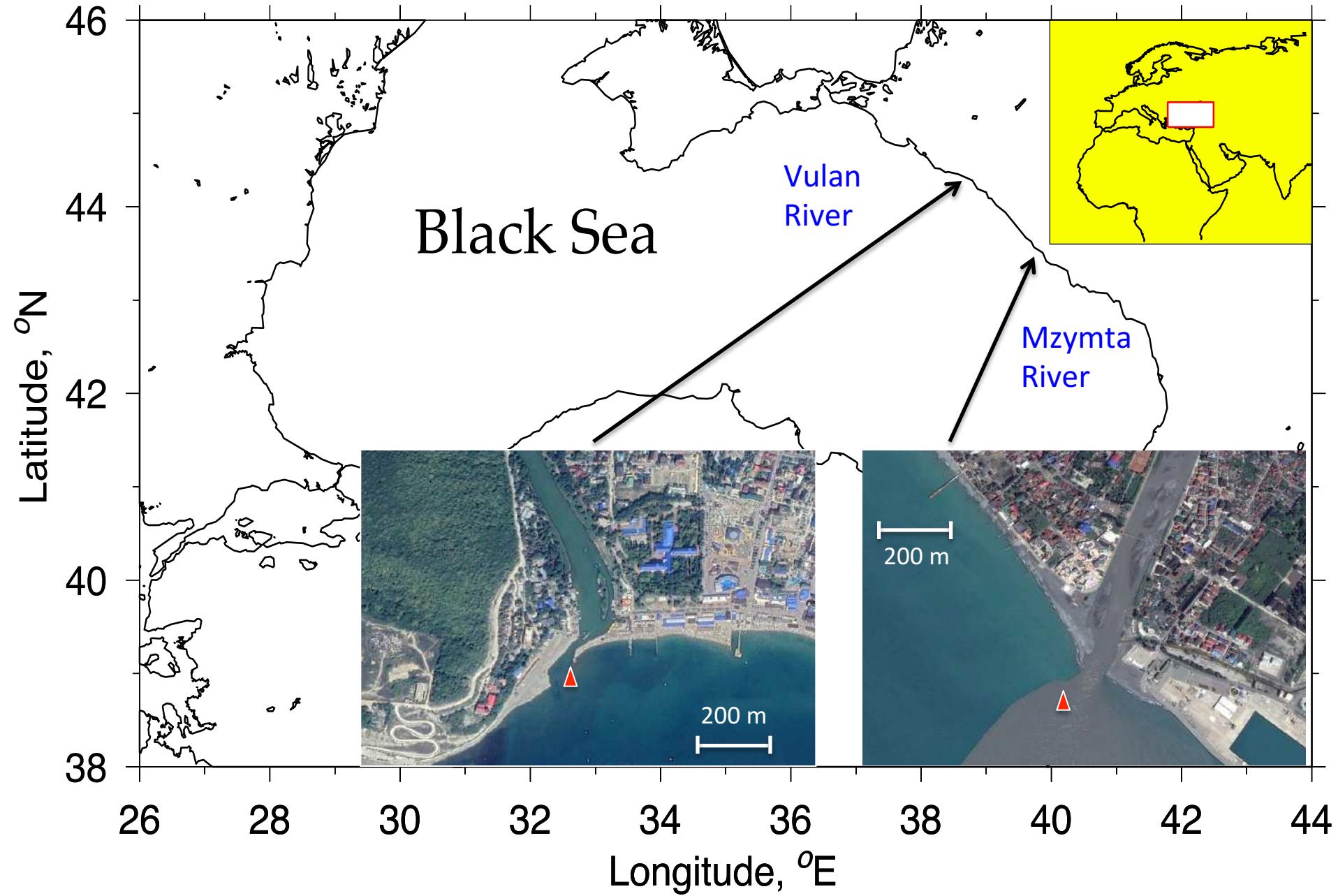
$$\xi B'_1 = \frac{\mu_1}{g} S_1 B_1 - \frac{S'_1}{6} \xi^3 - \xi' \left\{ \frac{1}{2} S_1 \xi^2 + A_1 \xi + B_1 \right\}.$$

Зависимость переноса от отношения вязостей в двух слоях

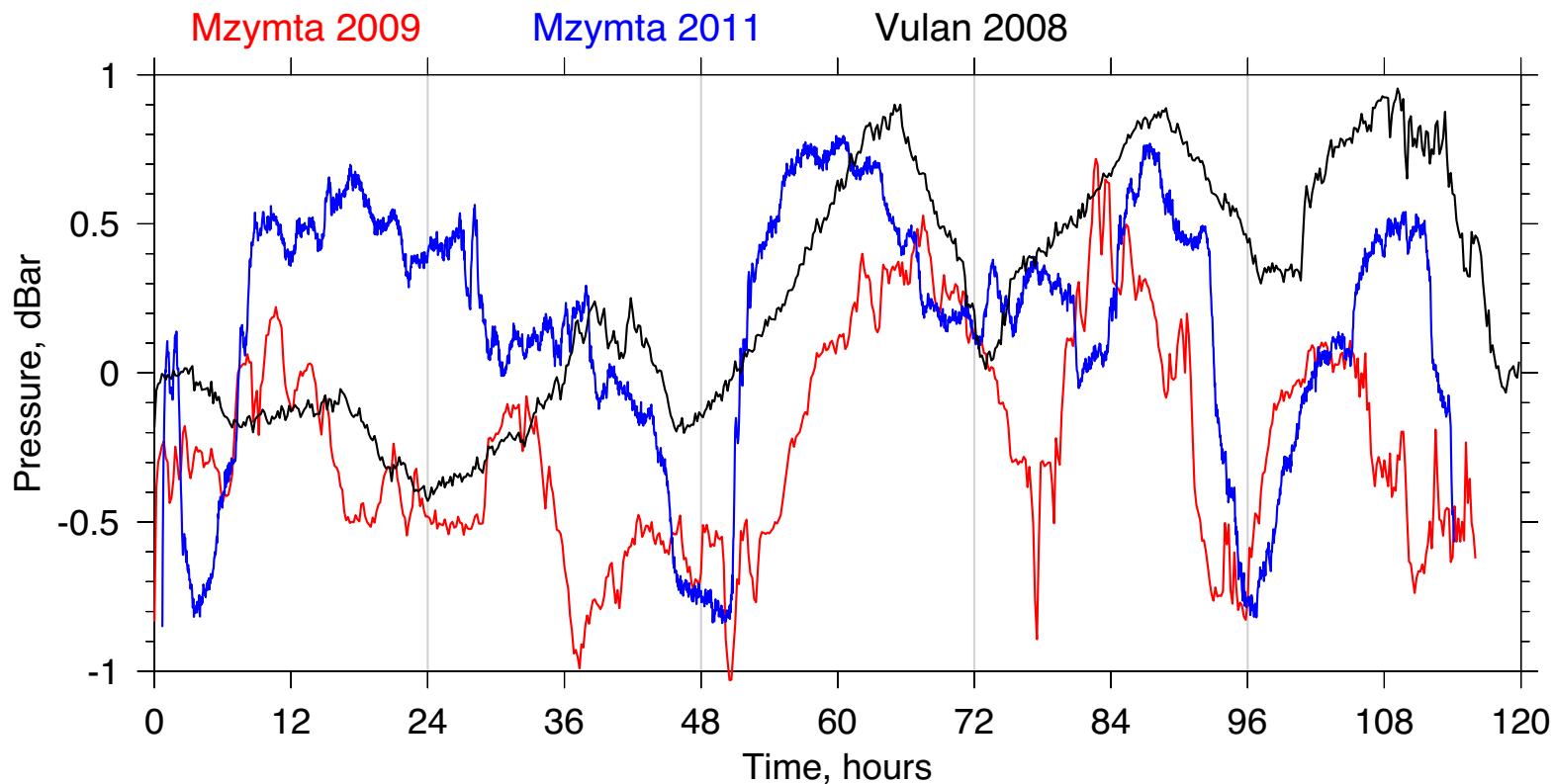


ПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ В РЕЧНЫХ ПЛЮМАХ

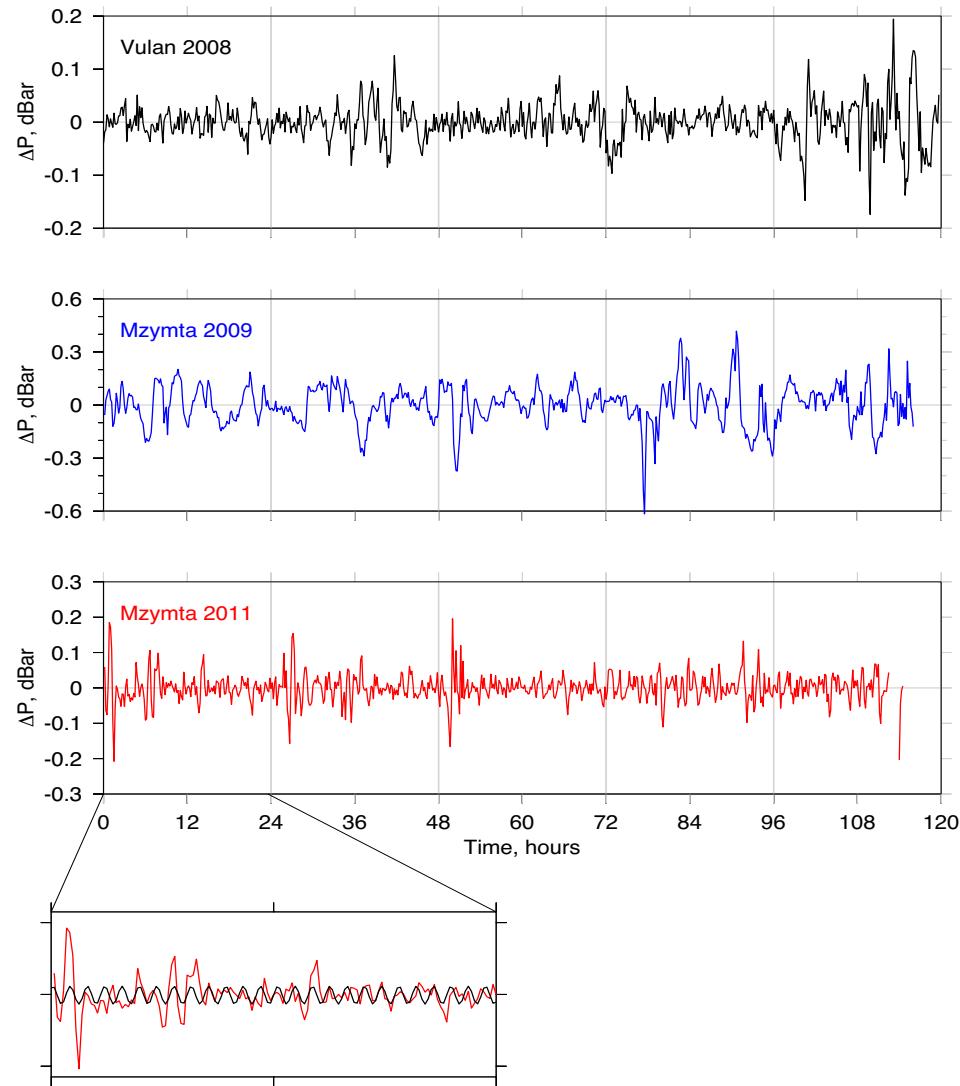
Zavialov, P.O., 2021. Are periodic oscillations of sea surface height inherent to river plumes?
Front. Mar. Sci. 8:679323. doi: 10.3389/fmars.2021.679323



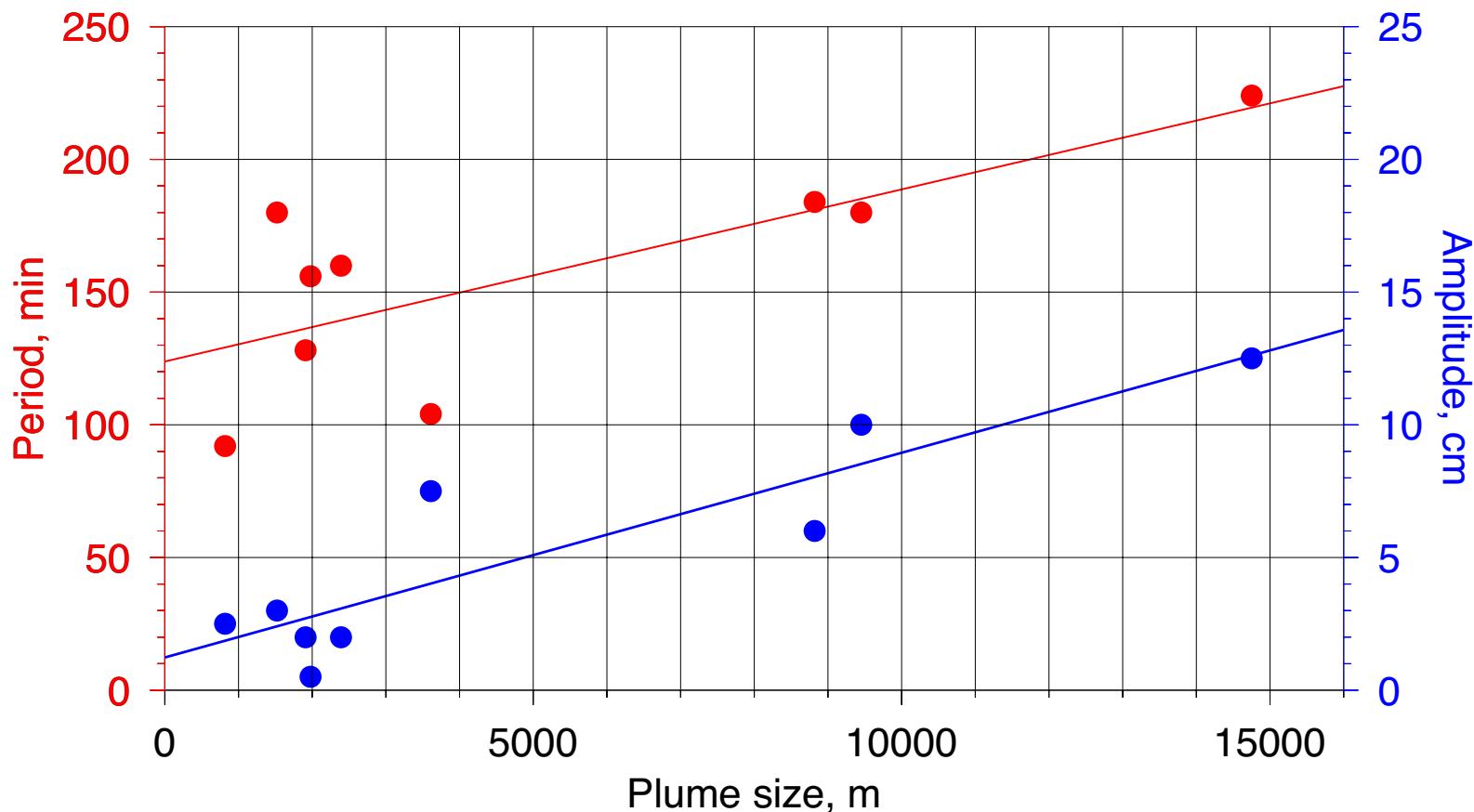
Исходные данные



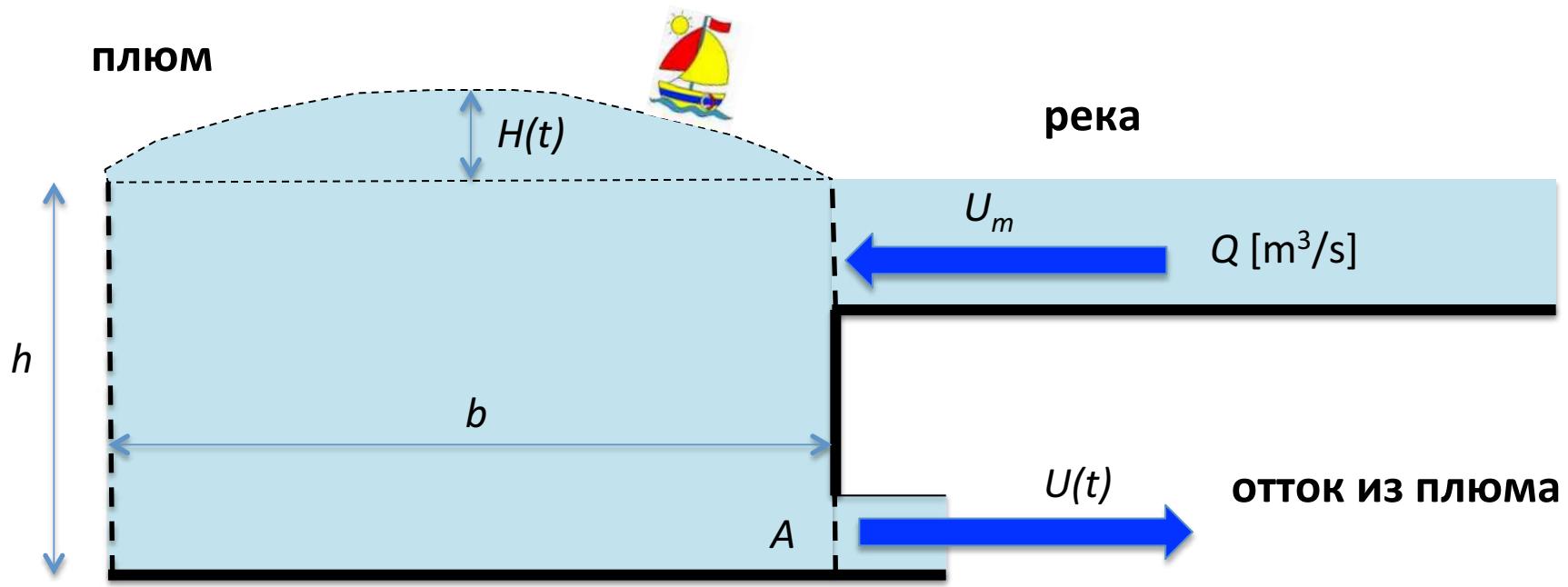
Высокочастотная составляющая



Период и амплитуда в зависимости от горизонтального масштаба плюма



плюм



$$b^2 \frac{dH}{dt} = Q - UA, \leftarrow \text{баланс массы}$$

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \simeq \frac{g}{b} H, \leftarrow \text{баланс сил}$$

$$\frac{d^2H}{dt^2} + \frac{gA}{b^3} H = 0.$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{b^3}{gA}}$$

Если $A \approx bh$, то

$$T = \frac{2\pi b}{\sqrt{gh}}$$

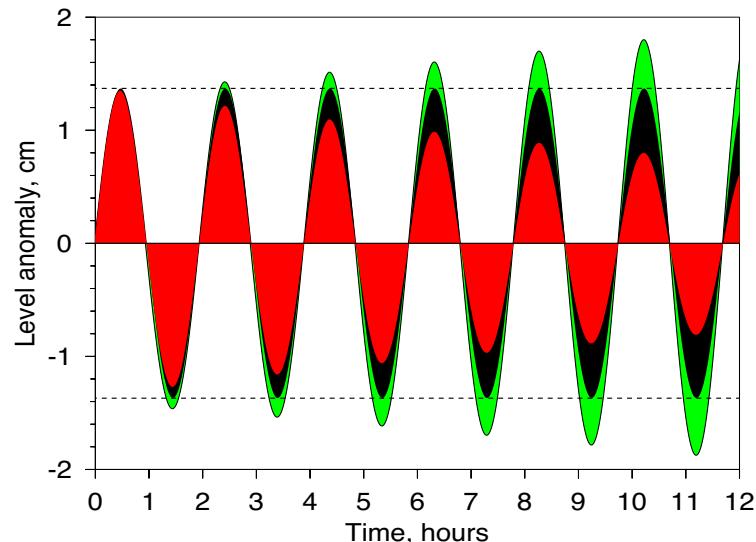
река

$$Q [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$U(t)$$

отток из плюма

$$\frac{dU}{dt} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - U \frac{\partial U}{\partial x} - C_D \frac{U^2}{h},$$



Речные плюмы в прибрежной зоне моря

- Переносят большую часть антропогенных загрязнений и терригенных веществ;
- В существенной степени воздействуют на литодинамические процессы;
- Влияют на прибрежную морскую циркуляцию и модулируют кросс-шельфовые обмены;
- Создают пульсации уровня моря и являются источниками кинетической энергии при генерации внутренних волн.

Для выхода на новый уровень понимания закономерностей динамики плюмов, механизмов их генерации и влияния на морскую и речную среду, целесообразно выполнить натурные эксперименты совместными усилиями океанологов и гидрологов суши с одновременными измерениями «по обе стороны устья».

Спасибо за внимание!