# Терригенная взвесь в прибрежной зоне моря:

## контактные и дистанционные измерения и моделирование

Таруса, 25 февраля 2016 г

### План доклада

- Общие сведения о терригенной взвеси в океане
- Отдельные результаты по переносу взвеси в прибрежной зоне
  - Натурные измерения в Черном море
  - Спутниковые наблюдения взвесенесущих плюмов
  - Новый региональный алгоритм расчета TSM по спутниковым данным Landsat
  - Лидарные измерения высокого разрешения
  - Новый метод расчета оседания взвеси
  - Численное моделирование взвесенесущих плюмов модель STRiPE
  - Перенос взвеси и риск подводных оползней на шельфе о-ва Тайвань

## Источники терригенной взвеси

Общее поступление терригенного материала в океаны составляет 22,1 млрд. т. в год, причем эта сумма складывается из

•речной взвеси (18,5 млрд. т.),
•ледникового стока (1,5 млрд. т.),
•эолового переноса (1,6 млрд. т.),
•абразии берегов (около 0,5 млрд. т.)

[Н.М. Страхов, 1976]



Академик М.Н. Страхов (1900-1978) Сопоставляя эти цифры с поступлением биогенного вещества, которое определено также на основе стока соответствующих элементов с суши (1,36 млрд. т карбонатов и 0,46 млрд. т кремнезема, всего 1,82 млрд. г, т. е. 7,6% от суммарного), Н.М. Страхов приходит к следующему заключению: «Приведенные образом подсчеты коренным меняют привычные представления 0 природе океанского **ГЕОХИМИЧЕСКОГО** процесса. Если под последним понимать совокупность частных явлений и процессов, формирующих химический состав осадков, то приходится признать, что в океане геохимический процесс в целом есть прежде всего (на 90-93%) процесс физический, а еще точнее - механический, т.е. процесс механического разноса и фракционирования твердых фаз, поступивших с берега, аллохтонных; в весьма малой степени (6-9,2%) этот физический процесс осложнен биогенным....

Единственно правильной общей трактовкой геохимического процесса в океанах является, по мнению автора, гидродинамическая концепция, развитая на предыдущих страницах. Она отвечает столь большому числу фактов, что можно лишь удивляться тому, что доселе такая трактовка не была заявлена в литературе. »

[Страхов, 1976]

## Глобальный баланс взвеси в океане (Лисицын, 1977)

Абсолютные массы терригенного и биогенного (карбонатного и кремнистого) материала в речном стоке и в пелагических осадках океанов (млрд.т в год в числителе, % в знаменателе)

Вид осадочного	Речной сток	Пелагические осадки океанов				
материала		Атлантический	Индийский	Тихий	Мировой	
Терригенный	22,1/92,4	0,642/52,19	0,304/50,88	0,784/67,90	1,730/58,02	
Биогенный:	1,82/7,6	0,588/47,8	0,293/49,11	0,37/32,08	1,251/41,98	
карбонатный (CaCO3)	1,36/5,7	0,543/44,14	0,231/38,74	0,305/26,46	1,079/36,22	
кремнистый (SiO <sub>2</sub> аморфн)	0,46/1,9	0,045/3,66	0,069/10,37	0,065/5,62	0,172/5,76	
Итого:	23,92/100	1,230/99,99	0,597/99,99	1,154/99,98	2,981/100	

Результаты этих подсчетов приводятся в таблице. Они касаются ложа океанов, в основном областей с глубинами более 3 тыс. м, которые занимают более 3/4 площади Мирового океана. Эти подсчеты показывают, что из 22,1 млрд. т терригенного материала, поставляемого с континентов в океан, в пелагиаль проникает всего только 1,729 млрд. т, т.е. 7,8%, подавляющая же часть этого материала (92,2%) осаждается по периферии океана (близ устьев рек, в краевых морях, желобах и у основания склона) и участия в пелагической седиментации не принимает. Отсюда реальные соотношения между терригенным и биогенным материалом в пелагиали оказываются иными, чем это следует из балансных подсчетов, на которых базируется Н.М. Страхов.



Академик А.П. Лисицын (род. 1923)

Современная концепция 0 СВЯЗИ течениями осадконакопления В океане С существенным образом отличается от концепции H.M. Страхова. Перемещения осадочного материала определяются не только течениями в поверхностном слое океана, а всей сложной многоэтажной системой течений, в которой все большее значение приобретает перемещение в глубинных и придонных слоях контурными и придонными течениями.

В разных частях океана роль течений каждого из этажей может быть различной и суммарное перемещение отдельной частицы осадочного материала в большинстве случаев очень трудно прогнозировать. Картина перемещений осадочного материала только поверхностными течениями практически нигде в океане не подтверждается, реальное перемещение много сложнее и изменчивее в пространстве. Понятно, что величины оценок несколько меняются в зависимости от метода и района исследований, но тем не менее при всех отклонениях совершенно очевидно, что биогенный процесс в пелагиали океана в целом во многие десятки раз мощнее терригенного, и процессы подготовки транспортировки и отложения осадочного материала биосом являются здесь главными.

Ледовый и эоловый материалы в пелагической седиментации играют роль не меньшую, чем речные взвеси, и представления об их второстепенном значении связаны главным образом с использованием ошибочной, на наш взгляд, методики подсчета! [Лисицин, 1977]

## Глобальное распределение взвеси в океане



# Общие закономерности распределений взвеси

Концентрация взвеси в открытом океане меняется в широких пределах от первых мкг/л до нескольких мг/л и более. Только в прибрежных участках морей и океанов мутность морских вод может возрастать локально до десятков мг/л и выше. Подавляющая же масса морских вод, преимущественно глубинных, характеризуется концентрациями взвеси в пределах 1-30 мкг/л, в среднем около 10 мкг/л (или почти в 50000 раз ниже, чем в речном стоке!). Пространственное распределение взвеси в поверхностном слое океанских вод подчиняется циркумконтинентальной и широтной климатической зональности (Лисицын, 1974). Основной закономерностью распределения взвеси по глубине в пелагических частях океана является обогащение взвесью верхнего деятельного слоя и уменьшение концентраций в глубинных горизонтах. В отрытых водах Мирового океана в распределении взвешенных частиц по размерам выделяется два максимума: один – в пределах фракций 0,5-1,0 мкм, второй – 25-50 мкм. Эти максимумы имеют генетический смысл: первый максимум - «терригенный», второй – «биогенный» (Богданов, Копелевич, 1973). Преобладание тонкодисперсного материала делает взвесь мощным адсорбентом растворенных [Гордеев, 2009] веществ.

#### Гранулометрическая структура взвеси



FIG. 2. Size-frequency distribution; to show the notation of the axes and the least number of data points used to define the form of the distribution. Concentration is *by volume*. All the sizefrequency distributions in Figs. 3–9 were constructed in this way.



FIG. 7. Geographic pattern of particle size spectra of the surface waters.

#### Гранулометрическая структура взвеси



















#### Вынос реками загрязнений в море



Черное море. 18 мая 2010 г.

## Распределения взвеси в прибрежной зоне Черного моря





Речной плюм	Средний расход, м <sup>3</sup> /с	Число съемок	Горизонтальный масштаб, км	Вертикальный масштаб, м	Аномалия солености, епс	Аномалия содержания взвеси, мг/л
Мзымта	49.5	17	$3.0 \pm 1.8$	$2.6 \pm 1.2$	$3.1 \pm 1.4$	$25.5 \pm 17.3$
Сочи	16.1	2	$2.2 \pm 1.2$	$1.9 \pm 1.5$	$2.4 \pm 1.0$	$3.0 \pm 2.1$
Туапсе	12.8	1	1.8	2.0	1.1	24.0
Пшада	9.8	2	$1.3 \pm 0.7$	$0.9 \pm 0.7$	$0.2 \pm 0.1$	$0.8 \pm 0.3$
Вулан	6.4	9	$1.2 \pm 0.6$	$0.6 \pm 0.5$	$0.2 \pm 0.1$	$0.9 \pm 0.4$
Мезыб	3.9	1	0.4	0.1	0.05	не обнаружена
Кудепста	3.4	10	$0.9 \pm 0.7$	$1.0 \pm 0.8$	$1.1 \pm 0.8$	$9.3 \pm 8.3$
Битха	0.3	1	0.08	0.4	0.1	не обнаружена

Таблица 1. Некоторые характеристики плюмов рек российского сектора Черного моря по данным натурных наблюдений 2006—2012 гг.

ОКЕАНОЛОГИЯ том 54 № 3 2014







# Феодосийский залив – май 2015 г





# Новый спутниковый алгоритм для Черного моря - Landsat



#### Спутниковые измерения взвеси



Слайд 2 из 41







#### Seasonal statistics of Mzymta plume





	Mean scale, km	RMSE, km	Q-ty of patches, total	Q-ty of patches less then 100 m, %
Chlorophyll	0.39	0.42	2730	39
CDOM	0.37	0.35	2615	31
TSM	0.49	0.52	2296	33

TSM scales histogram for the scale range 10-1000 m, the Kara Sea 2011



# Контактные измерения высокого разрешения



#### 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.

#### Typical laser-induced fluorescence spectrum of natural waters



An example of 12-hours section, made by UFL-8 onboard R/V "Akademik M.Keldysh" in 54th cruise in the Kara Sea, 2007.



#### UFL-8 calibration, the Lake Balaton, Hungary, 2008





Settling = 
$$2[v(C_{max}-C_{min})+C_{min}-C_{obs}]/(2+v)$$
,  
where v= $(S_{max}-S_{obs})/(S_{max}-S_{min})$ 

#### Example of data



#### Settling of suspended matter



### Mixing of suspended matter

?





Dependence of settling on distance from the river mouth normalized by inertial radius



#### Dependence of settling on wind stress



#### Numerical modeling





$$\begin{split} \begin{array}{l} \begin{array}{l} \underline{\text{Dissipation equation}}\\ \rho^{i+1} &= \rho^i + \frac{D_v^i}{h_c} (\rho_{vva} - \rho^i) \\ h^i &= \lambda^i - \frac{D_v^i}{h_c} \Delta t, \end{array} \end{array} & \begin{array}{l} \frac{\text{Random walk scheme}}{x^{i+1} = x^i + u^{i+1} \Delta t - \frac{a_w^{i+1} \Delta t^2}{2} + \sqrt{2D_h^i \Delta t} \eta_w \\ y^{i+1} &= y^i + v^{i+1} \Delta t - \frac{a_w^{i+1} \Delta t^2}{2} + \sqrt{2D_h^i \Delta t} \eta_y \end{aligned} \\ \hline \\ \underline{\text{Vertical diffusivity}} \\ \frac{D_v^i}{h_t} &= \zeta_v \left( 1 - \min\left(1, Rt^i\right)^2 \right)^3 \\ \text{[Large, 1994]} \end{array} & \begin{array}{l} \frac{\text{Eddy viscousity}}{y^i = 10^{-5} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{1 + 0.3Rt^i}} \text{ M}^2/\text{c}} \\ \mu_h^i &= 10^{-5} + \frac{9 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{1 + 0.3Rt^i}} \text{ M}^2/\text{c} \\ \text{[Yankovsky and Chapman, 1997]} \end{aligned} \\ D_h^i &= \zeta_h \cdot \Delta x \cdot \Delta y \\ \begin{pmatrix} \left( \frac{u_{x+\Delta x,y}^i - u_{x-\Delta x,y}^i}{\Delta x} \right)^2 + \left( \frac{v_{x,y+\Delta y}^i - v_{x,y-\Delta y}^i}{\Delta y} \right)^2 + \\ + \frac{1}{2} \left( \frac{v_{x+\Delta x,y}^i - v_{x-\Delta x,y}^i}{\Delta x} + \frac{u_{x,y+\Delta y}^i - u_{x,y-\Delta y}^i}{\Delta y} \right)^2 \end{aligned} \end{aligned} \end{aligned}$$
 [Smagorinsky, 1963] \\ \hline \\ \frac{\text{Boundary conditions}}{u\_0^i \sim U[0, w\_r]} \end{aligned}

#### Plume dependence on wind forcing



#### Plume dependence on alongshore current



- вдольбереговое течение, направление на северо-запад
- вдольбереговое течение, направление на юго-восток

#### Plume dependence on Coriolis parameter



#### PLUME DEPENDENCE ON RIVER DISCHARGE RATE



## STRiPE – indirect estimation of river discharge from satellite imagery

We perform thousands of plume simulations under various forcing and discharge conditions to determine the exact discharge.

The simulation results are organized as a data base, so the most similar river plume among the modeled results could be quickly found for every satellite image of the plume.



## STRiPE – indirect estimation of river discharge from satellite imagery



77 points in total Average error – 15%

#### Marakot typhoon over Taiwan (August 2009)











#### **General idea**



## Modeling sediment transport under typhoon conditions

22.7

22.6

22.5

22.

22.3

120.9 121

121.1 121.2 121.3 121.4 121.5 121.6







22

22.6

1111

121.7

120.9 121

121.1 121.2 121.3 121.4 121.5 121.6 121.7

POM model

#### Settled (left) and suspended (right) sediment after Morakot typhoon passage



#### Sediment thickness times bottom slope



### Maps of mudslide risk

