

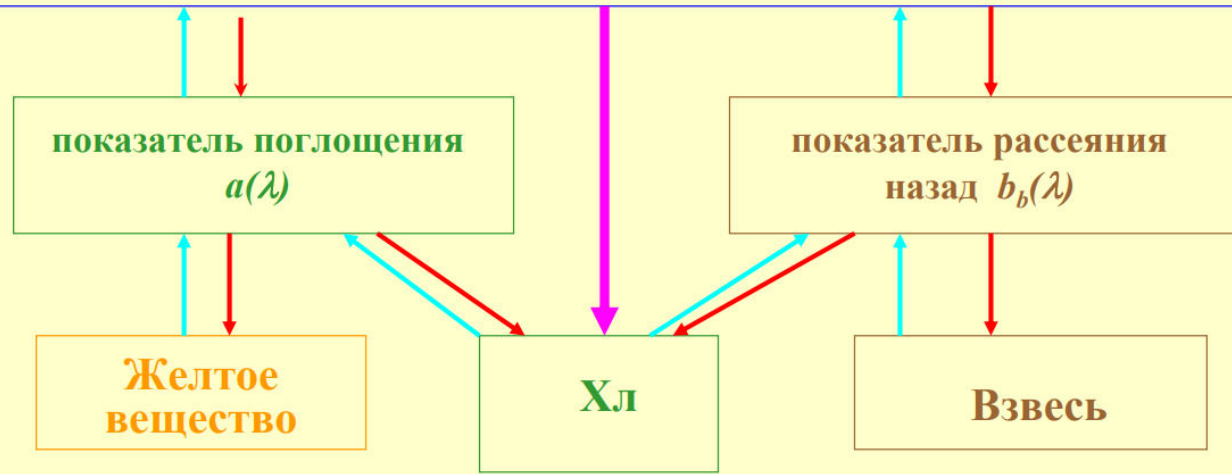
# Влияние поверхностного волнения на дистанционно регистрируемый цвет океана

Д.М. Ермаков, ИКИ РАН

# Био-оптические алгоритмы как решение некорректной обратной задачи

## Биооптические алгоритмы

Спектральный коэффициент яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$



Полуаналитический алгоритм:   
 — cyan — прямая задача   
 — red — обратная задача

Регрессионный алгоритм:   
 — magenta —

## ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЙ БИО-ОПТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Основан на использовании аналитической формулы для коэффициента яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$  и малопараметрических моделей для показателей поглощения  $a(\lambda_i)$  и рассеяния назад  $b_b(\lambda_i)$  морской воды:

$$\rho(\lambda) = \pi (0.070 + 0.155 X^{0.752}) X, \text{ где } X = b_b(\lambda_i) / [a(\lambda_i) + b_b(\lambda_i)];$$
$$a(\lambda) = \exp[-S(\lambda - 440)] \cdot a_y(440) + a_{ph}^*(\lambda) \cdot a_{ph}(440) + a_w(\lambda);$$
$$b_b(\lambda) = 0.5b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550) \cdot (550/\lambda)^n;$$

где  $a_w(\lambda)$  и  $b_{bw}(\lambda)$  - известные показатели поглощения и обратного рассеяния чистой морской водой;  $a_{ph}(\lambda)$  - спектральное поглощение пигментами фитопланктона;  $a_g(\lambda)$  - поглощение растворенным органическим веществом (РОВ), в которое включено также поглощение детритом;  $b_{bp}(\lambda)$  - показатель обратного рассеяния взвешенными частицами.  $S$  и  $n$  - наклоны спектральных кривых поглощения «желтым веществом» и рассеяния назад взвешенными частицами.

Вообще говоря 5 неизвестных:  $a_y(440)$ ,  $a_{ph}(440)$ ,  $b_{bp}(550)$ ;  $S$ ,  $n$ .

Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., 2005. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета, <http://www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/kop.pdf>

# Био-оптические алгоритмы как решение некорректной обратной задачи

## Регрессионные алгоритмы

Для определения концентрации хлорофилла использовались регрессионные алгоритмы, разработанные на основе данных натуральных измерений. По этим данным были рассчитаны уравнения регрессии между концентрацией хлорофилла  $C_{chl}$  и отношением нормализованных яркостей  $L_{WN}(510)/L_{WN}(555)$  для спектральных каналов SeaWiFS 510 и 555 нм, где рассчитанные нормализованные яркости  $L_{WN}(\lambda)$  совпадают с измеренными *in situ* с приемлемой точностью

$$Chl = A [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-B}.$$

Для Баренцева моря  $A=0.34$ ,  $B=1.39$ ; для Черного –  $0.88$  и  $2.26$ .

Для Северного и Среднего Каспия –  $0.38$  и  $3.65$ .

$$Chl = 0.34 [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-1.39}.$$

$$Chl = 0.88 [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-2.26}.$$

Алгоритм для расчета показателя рассеяния назад взвесью основан на расчете показателя рассеяния назад морской воды  $b_b(555)$  через значения параметра  $X(555)$  и показателя диффузного ослабления  $K_d(555)$  через отношение  $L_{WN}(510)/L_{WN}(555)$  для каналов 510 и 555 нм.

## Сравнение между данными судовых и спутниковых измерений концентрации хлорофилла в Северном и Среднем Каспии

Год	2003						
№ станции	3	5	6	7	8	9	12
<i>In situ</i>	9.0	1.5	0.72	0.76	0.52	0.22	0.42
новый алгоритм	3.8	2.9	1.7	1.3	0.64	0.46	1.0
Год	2004						
№ станции	4	6	7	8	14	15	17
<i>In situ</i>	15.9	11.2	1.30	8.35	0.78	1.15	1.95
новый алгоритм	8.8	8.7	1.9	8.35	0.41	0.52	0.55

Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., 2005. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета, <http://www.iki.rssi.ru/earth/ppt2005/kop.pdf>

# Атмосферная коррекция: учет мешающих факторов

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i)$$

(Регистрируемая)  
яркость на верхней  
границе атмосферы

Яркость блика  
(glint)

Яркость пены  
(white caps)

Искомая яркость  
толщи океана

Направленное пропускание  
излучения атмосферой

Диффузное пропускание  
излучения атмосферой

Компонента аэрозольного рассеяния

Компонента рэлеевского рассеяния

**Задача:** *восстановить яркость (собственный цвет) толщи океана на основании регистрируемой яркости и оптических свойств атмосферы и границы раздела*

Копелевич О.В. и др., 2006. Разработка и использование региональных алгоритмов...

<https://www.researchgate.net/publication/268346167>

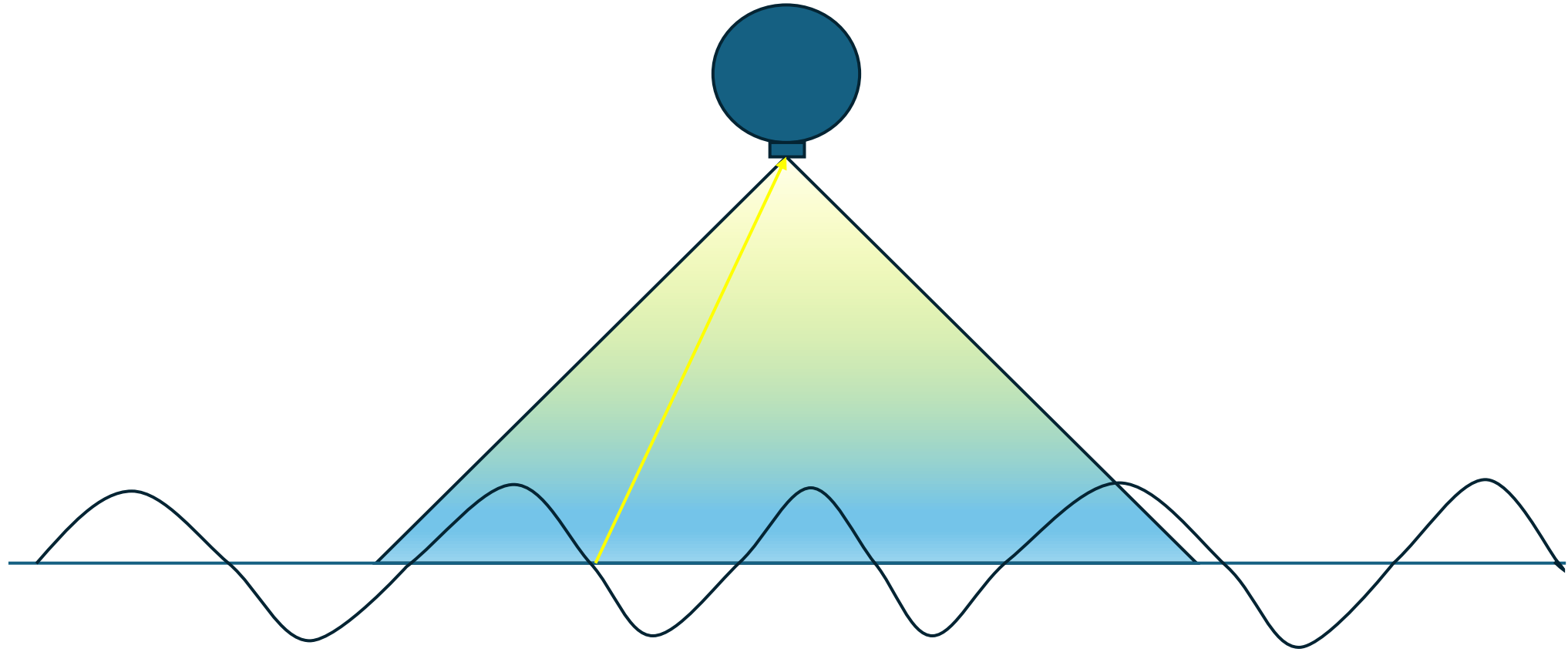
# Пример натуральных наблюдений в отсутствие основных мешающих факторов



# Проявление ветрового волнения в натуральных наблюдениях



# Геометрия оптического сканирования в условиях штиля и волнения



Фактический угол встречи луча зрения с взволнованной поверхностью океана может всюду в пределах пятна разрешения отличаться от «номинального». Это определяется не масштабом волн внутри пятна, а их кривизной, поэтому наибольший эффект могут вносить гравитационно-капиллярные волны, обладающие максимальной кривизной и почти мгновенно возникающие при наличии приповерхностного ветра.

# Постановка задачи учета вклада волнения в наблюдаемый цвет океана

Общая идея: используем синхронные оптические и микроволновые дистанционные наблюдения морской поверхности и выделим коррелированную компоненту, обусловленную поверхностным волнением

Оптические измерения

Ветровой вклад

Характеристика собственного цвета

$$\begin{cases} o_i = h(w_i) + c_i \\ m_i = w_i + e_i \end{cases}$$

Ошибка определения ветра

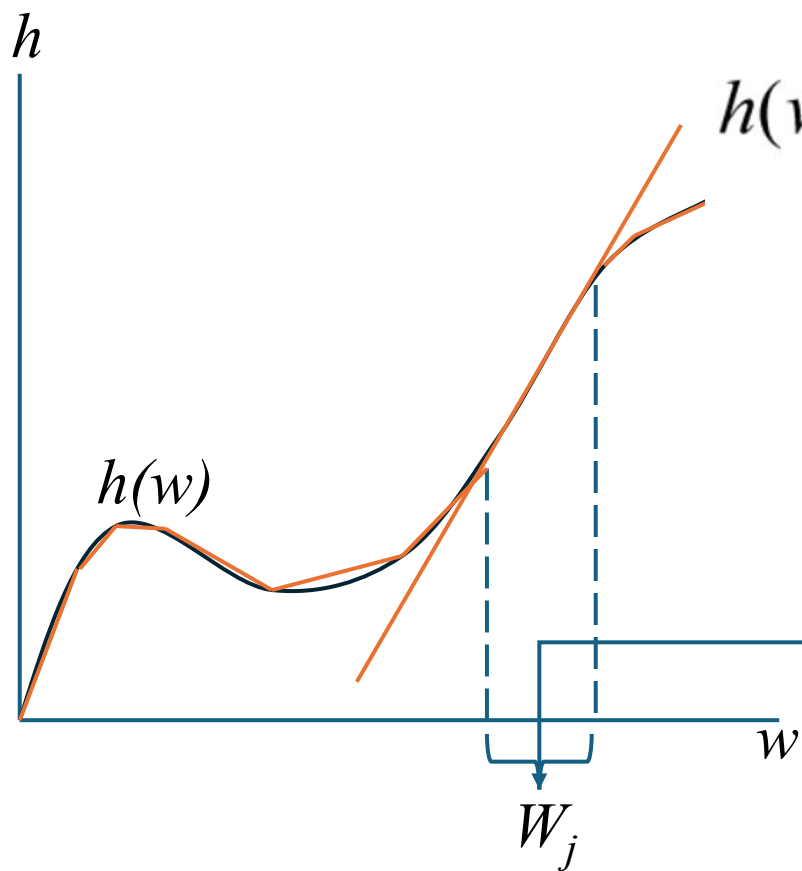
Ветер

Микроволновые измерения

Дополнительное предположение 1:

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_i e_i = 0, \quad \sigma_e^2 = \frac{1}{N} \sum_i e_i^2 \ll \sigma_w^2$$

# Алгоритм приближенного решения частной нелинейной факторной задачи



$$h(w_i) = A_j w_i + B_j, \quad w_i \in W_j, \quad \bigcup_j W_j = W$$

Параметры кусочно-линейного приближения.

$$\text{Тогда: } o_i = A_j w_i + B_j + c_i, \quad i \in I_j$$

Множество наблюдений, в которых  $w_i \in W_j$

$$\text{Сделаем нормировку: } x_i = \frac{w_i - \bar{w}}{\sigma_w}, \quad y_i = \frac{o_i - \bar{o}}{\sigma_o}, \quad i \in I_j$$

$$\text{Тогда: } \sigma_o y_i = A_j \sigma_w x_i + B_j + A_j \bar{w} - \bar{o} + c_i, \quad i \in I_j$$

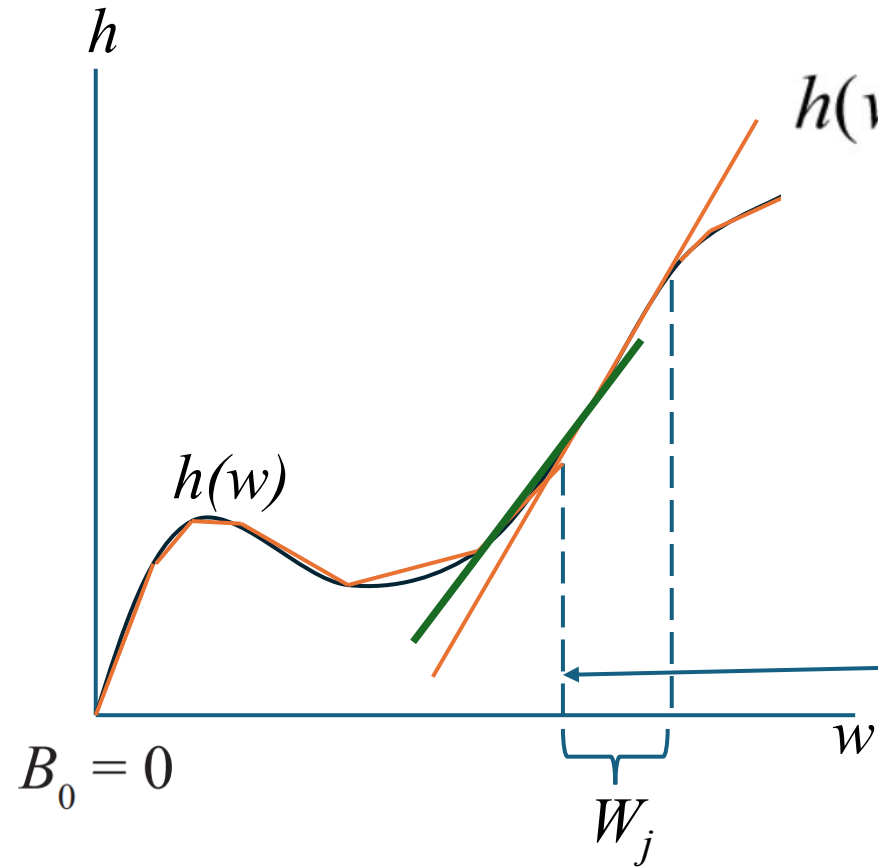
Умножив обе части на  $x_i$  и усреднив по  $i \in I_j$ , получим:  $\sigma_o \rho_j = A_j \sigma_w + \frac{1}{N_j} \sum_i x_i c_i$ ,  $\rho_j = \frac{1}{N_j} \sum_i x_i y_i$

Предположение 2: мгновенное поле ветра не коррелирует с «собственным цветом» океана:

$$\sum_i x_i c_i = 0, \quad i \in I_j$$

$$\text{Тогда: } A_j = \frac{\sigma_o \rho_j}{\sigma_w} \approx \frac{\sigma_o}{\sigma_m} \rho'_j \leftarrow \text{выборочная корреляция } o_i \text{ и } m_i$$

# Алгоритм приближенного решения частной нелинейной факторной задачи



$$h(w_i) = A_j w_i + B_j, \quad w_i \in W_j, \quad \bigcup_j W_j = W$$

Параметры кусочно-линейного приближения.

$$A_j = \frac{\sigma_o \rho_j}{\sigma_w} \approx \frac{\sigma_o}{\sigma_m} \rho'_j$$

В силу непрерывности  $h(w)$ :  $B_j = B_{j-1} + A_{j-1} w_{j-1}^+ - A_j w_j^-$

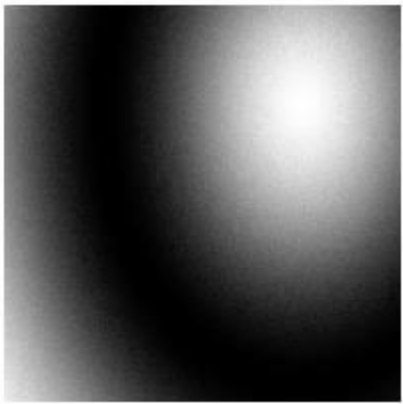
$$o_i = A_j m_j + B_j - A_j e_j + c_i \quad (15)$$

Учитывая (2), можно рассматривать член  $A_j m_i + B_j$  как несмещенную оценку вклада общего фактора в O-данные с погрешностью  $A_j e_i$ . Тогда  $o_i - (A_j m_i + B_j)$  является несмещенной оценкой  $c_i$ , полученной с той же погрешностью.

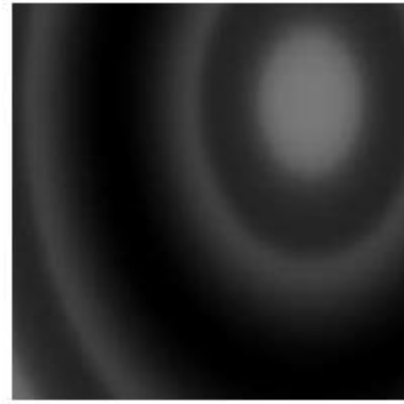
# Численный эксперимент – постановка

$$\begin{cases} o_i = h(w_i) + c_i \\ m_i = w_i + e_i \end{cases} \quad w_i = f(x, y) = 127.5 \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi \sqrt{(x-300)^2 + \frac{1}{2}(y-300)^2}}{400} \right) \right), \quad x = 0..399, y = 0..399, i = 400y + x$$

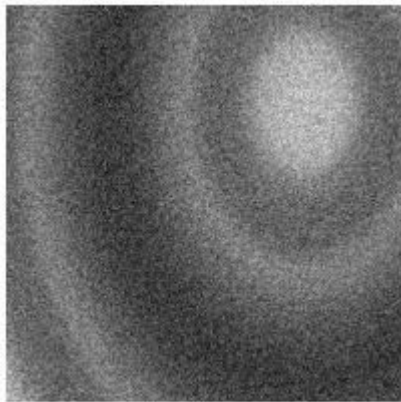
$c_i = \text{RND}[0,128]; e_i = 1) 0; 2) \text{RND}[-16, +16]$



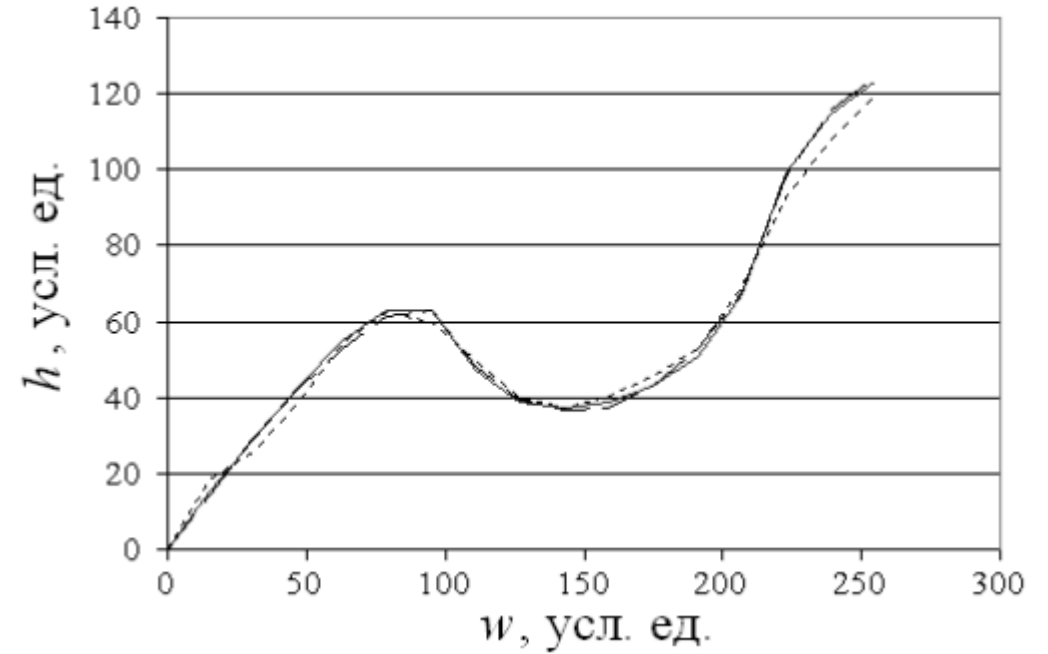
Поле ветра  $W$



Поле ветрового вклада  $H(W)$

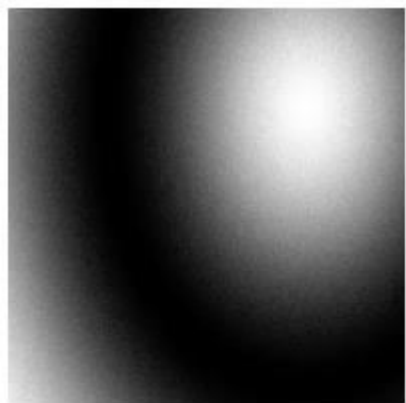


Оптические данные  $O$

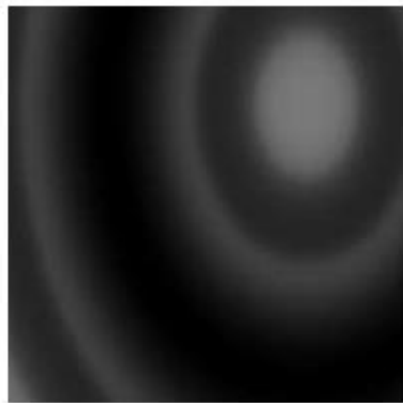


**Задача:** по известным  $M = W + e$  и  $O$  восстановить  $H$  и  $h$ .

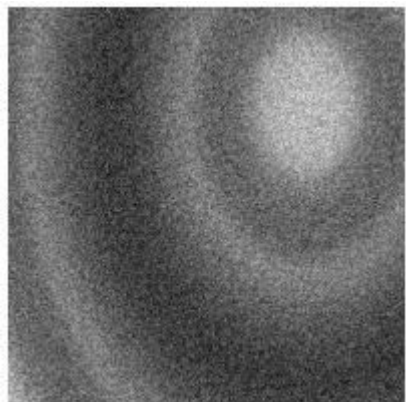
# Численный эксперимент – результаты



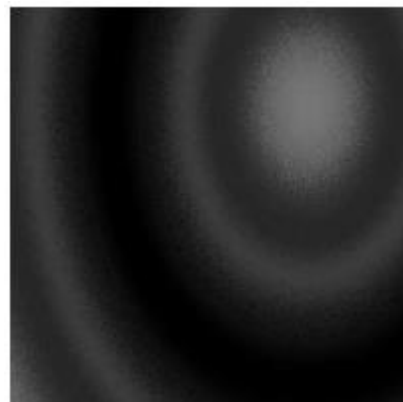
Поле ветра  $W$



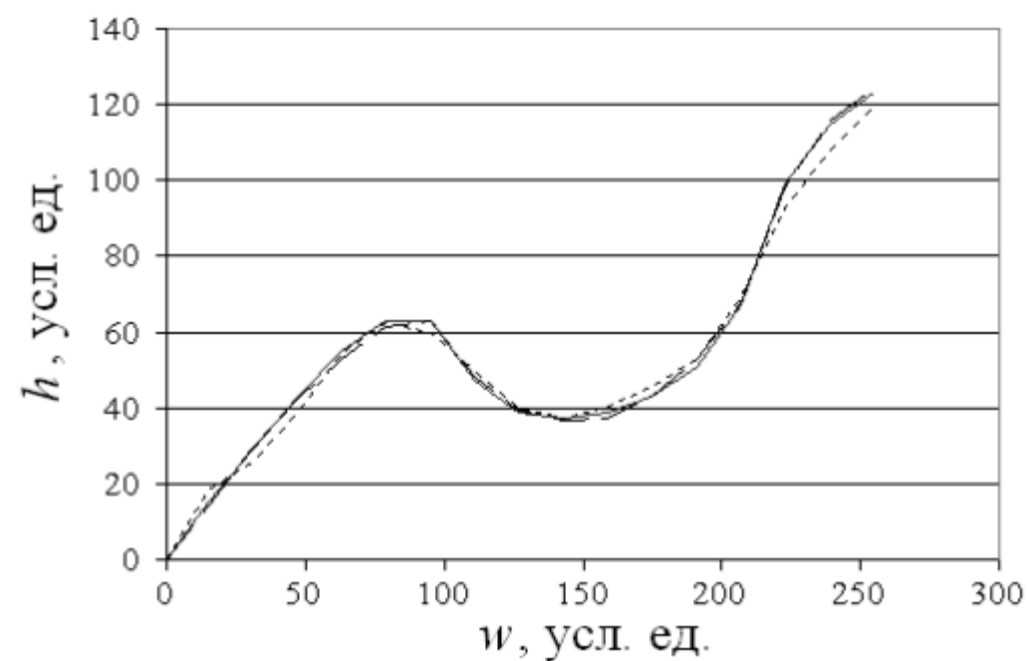
Поле ветрового вклада  $H(W)$



Оптические данные  $O$



Восстановленный вклад  $H(W)$



$$M = W + e, e = 0$$

Тест 1)	$\sigma_h$	$m_h$	$\sigma_H$	$m_H$
	1.0	3.1	0.9	0.9

$$M = W + e, e = \text{RND}[-16, +16]$$

Тест 2)	$\sigma_h$	$m_h$	$\sigma_H$	$m_H$
	3.1	1.3	5.9	0.9

# Формирование совмещенной выборки данных ДЗЗ

В качестве оптических данных было взято отношение  $L(443 \text{ нм})/L(555 \text{ нм})$  по измерениям MODIS (Aqua);

В качестве микроволновых данных были взяты восстановленные поля ветра по данным AMSR-E (Aqua).

Синхронные данные были отобраны по различным маскам акваторий, соответствующим:

- 1) водам типа 1 (открытого океана) в Тихом, Атлантическом и Индийском океанах
- 2) водам типа 2 (прибрежным водам) акваторий Тихого и Атлантического океанов.

Рассмотрен временной интервал 11.10.2010 – 21.10.2010.

Варианты разбиения по интервалам скорости ветра:

№	j	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	$W_0$	$W_1$	$W_2$	$W_3$	$W_4$	$W_5$	$W_6$	$W_7$	$W_8$	$W_9$	$W_{10}$	$W_{11}$	$W_{12}$	$W_{13}$	$W_{14}$	
1	0.0/	1.1/	2.3/	3.4/	4.6/	5.7/	6.8/	8.0/	9.1/	10.2/	11.4/	12.5/	13.7/	14.8/	15.9/	
	1.1	2.3	3.4	4.6	5.7	6.8	8.0	9.1	10.2	11.4	12.5	13.7	14.8	15.9	17.0	
2	0.0/	2.3/	4.6/	6.8/	9.1/	11.4/	13.7/	15.9/	-	-	-	-	-	-	-	
	2.3	4.6	6.8	9.1	11.4	13.7	15.9	17.0	-	-	-	-	-	-	-	
3	0.0/	1.8/	2.9/	4.1/	5.2/	6.4/	7.5/	8.6/	9.8/	10.9/	12.0/	13.2/	14.3/	15.5/	-	
	1.8	2.9	4.1	5.2	6.4	7.5	8.6	9.8	10.9	12.0	13.2	14.3	15.5	17.0	-	
4	0.0/	2.9/	5.2/	7.5/	9.8/	12.0/	14.3/	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2.9	5.2	7.5	9.8	12.0	14.3	17.0	-	-	-	-	-	-	-	-	

# Пример результатов для вод открытого океана [1]

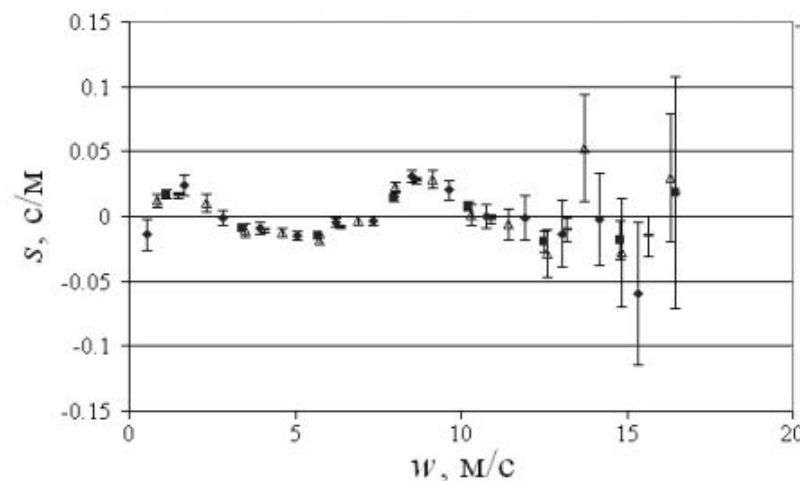


Рис. 3. Оценки «цветовой чувствительности»  $s(w)$  к ветру  $w$  на разных интервалах скоростей ветра: ромбы – разбиение №1; квадраты – №2; треугольники – №3; планка – №4  
Вертикальные полосы – доверительные интервалы по уровню 95%

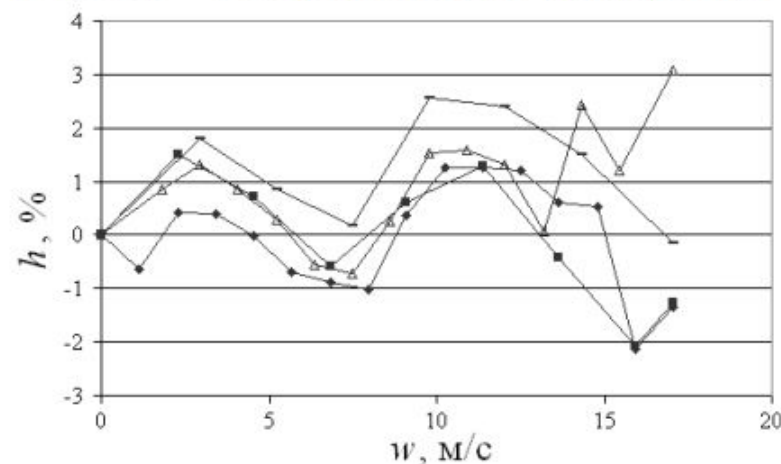
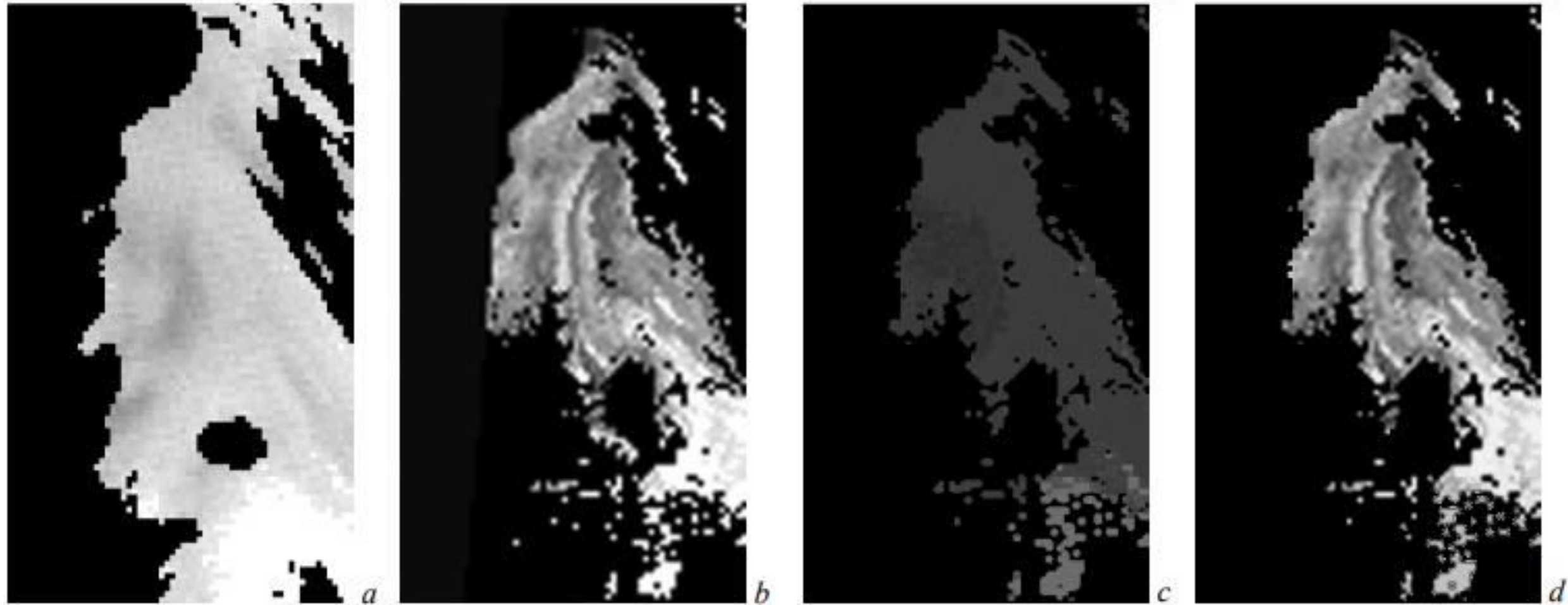


Рис. 4. Оценки «ветрового вклада»  $h(w)$  в цвет океана (в % от полной величины) на разных интервалах скорости ветра  $w$  (по разбиениям №1..4, как на рис. 3)

# Пример предыдущей совместной обработки SSM/I и SeaWiFS



*Figure 4. Test on historical data: a – SSM/I wind map;  
b – SeaWiFS colour index; c, d –  $H^*$ ,  $C^*$  - images*

# Обсуждение результатов

1. Результаты восстановления «цветовой чувствительности»  $s(w)$  (производной  $h(w)$  по  $w$ ) показывают, что она отлична от нуля в широком диапазоне скоростей ветра.
2. Если в качестве характеристики собственного цвета океана принять отношение нормализованных яркостей выходящего из толщи воды излучения на частотах 443 нм и 555 нм, то цветовая чувствительность достоверно (по уровню вероятности 95%) положительна в интервалах скоростей ветра 1,0 – 2,5 м/с и отрицательна при скоростях ветра 3,5 – 5,5 м/с.
3. Остающийся разброс цветовой чувствительности к ветру в пределах доверительных интервалов обуславливает неустойчивость восстановления функции ветрового вклада  $h(w)$  в наблюдаемый цвет океана.
4. Для улучшения оценок  $h(w)$  необходимо сузить доверительные интервалы оценок  $s(w)$  путем обработки большого массива спутниковых данных.

# ССЫЛКИ

1. *Ермаков Д.М., Смирнов М.Т.* Факторный анализ многоканальных спутниковых изображений океана для исследования эффектов поверхностного волнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т. 8. № 3. С. 25-32. [http://d33.infospace.ru/d33\\_conf/2011v8n3/25-32.pdf](http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n3/25-32.pdf)
2. *Ermakov D.M., Smirnov M.T., Polyakov V.M.* Integrating optical remote data into passive microwave remote sensing of the ocean // Proc. ESA Living Planet Symposium, Bergen, Norway (Ed. H. Lacoste-Francis), ESA SP-686 (CD ROM), ESA Communications, European Space Agency, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, December 2010.

Обзор и анализ работ выполнены в рамках госзадания ИКИ РАН (тема «Мониторинг», г/р № 126031818938-6)

Спасибо за внимание!