

# Применение различных алгоритмов восстановления хлорофилла для оценки первичной продукции в Арктике к данным спектрорадиометров MODIS и SeaWiFS

Дмитрий Петренко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет

<sup>2</sup>Научны фонд «Нансен-Центр»



## Содержание доклада:

- ◆ Оптические свойства природных вод
- ◆ Классификация вод Арктического бассейна
- ◆ Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- ◆ Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (*хл*)
- ◆ Оценка адекватности алгоритмов восстановления *хл*
- ◆ Сравнение временных рядов концентраций *хл*
- ◆ Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

## Содержание доклада:

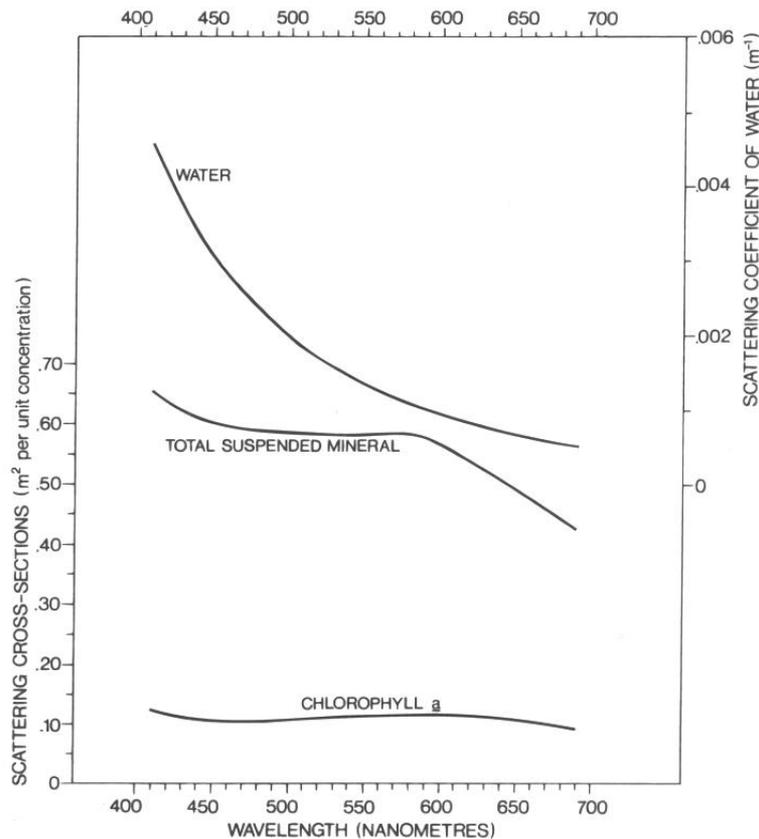
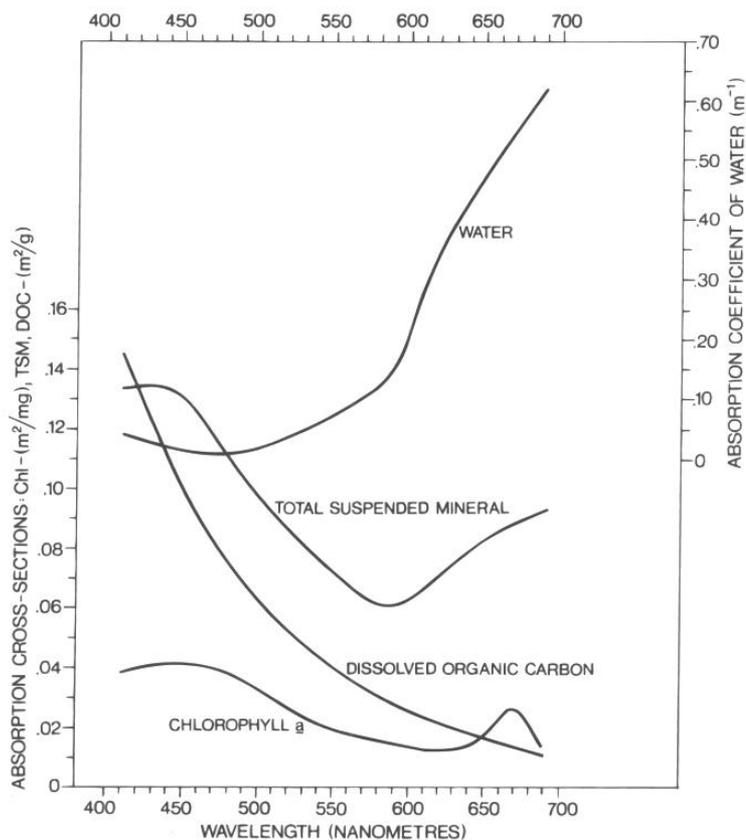
- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (*chl*)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления *chl*
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций *chl*
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

# Первичные гидрооптические свойства природных вод

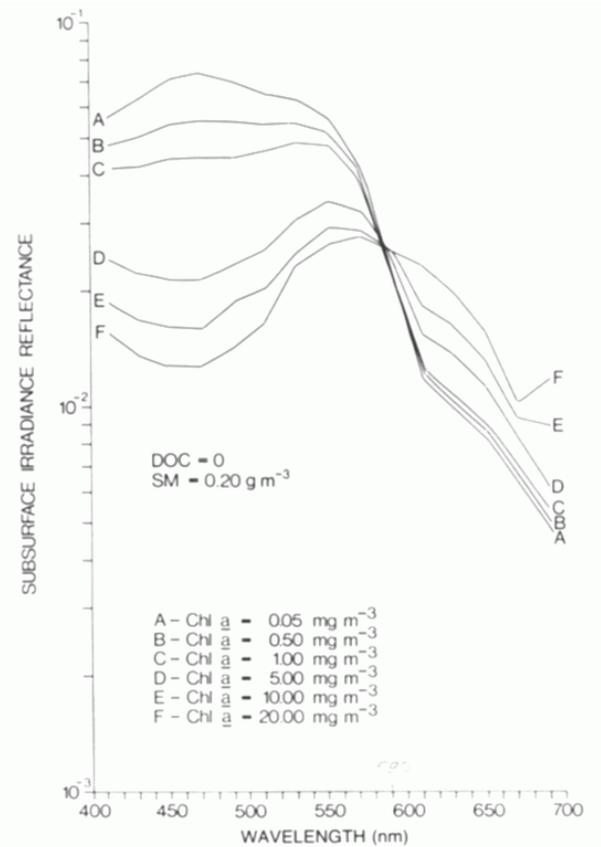
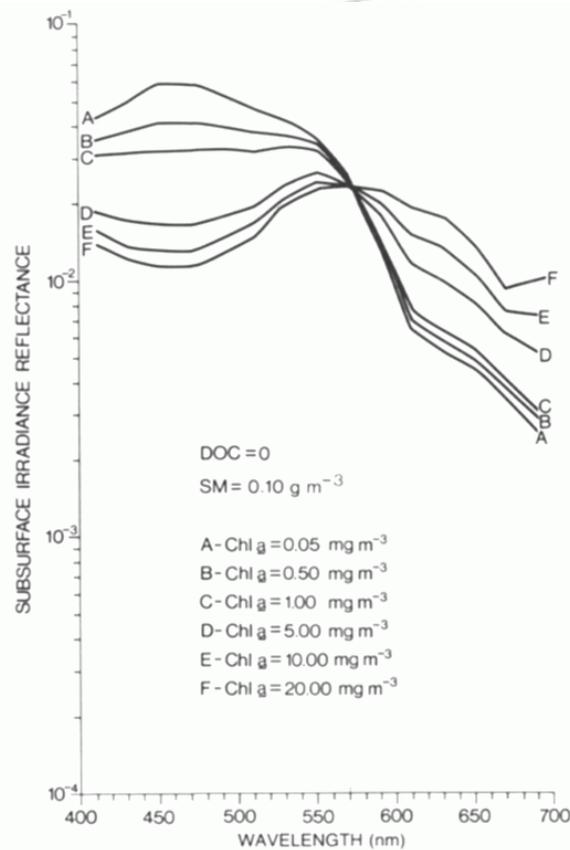
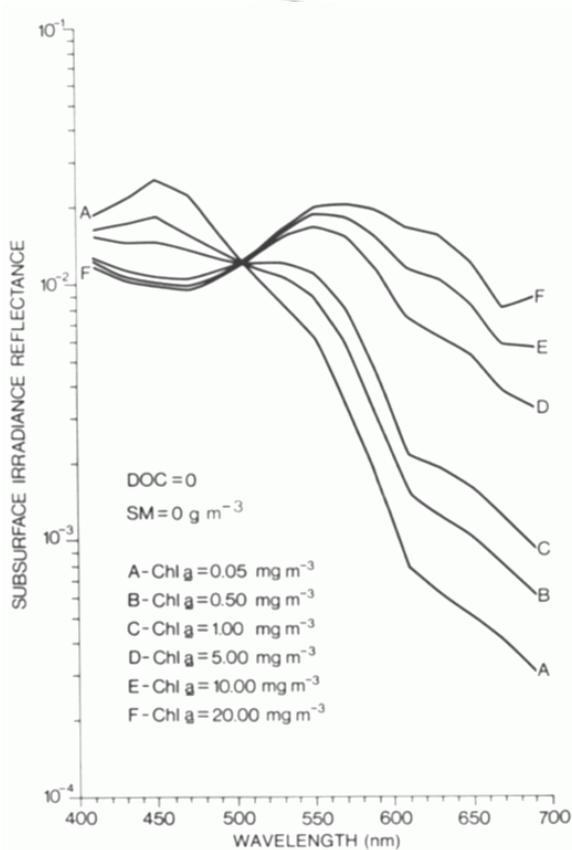
$$b_b(\lambda) = \sum_{j=1}^m C_j b_{b_j}^*(\lambda)$$

$$a(\lambda) = \sum_{i=1}^n C_i a_i^*(\lambda)$$

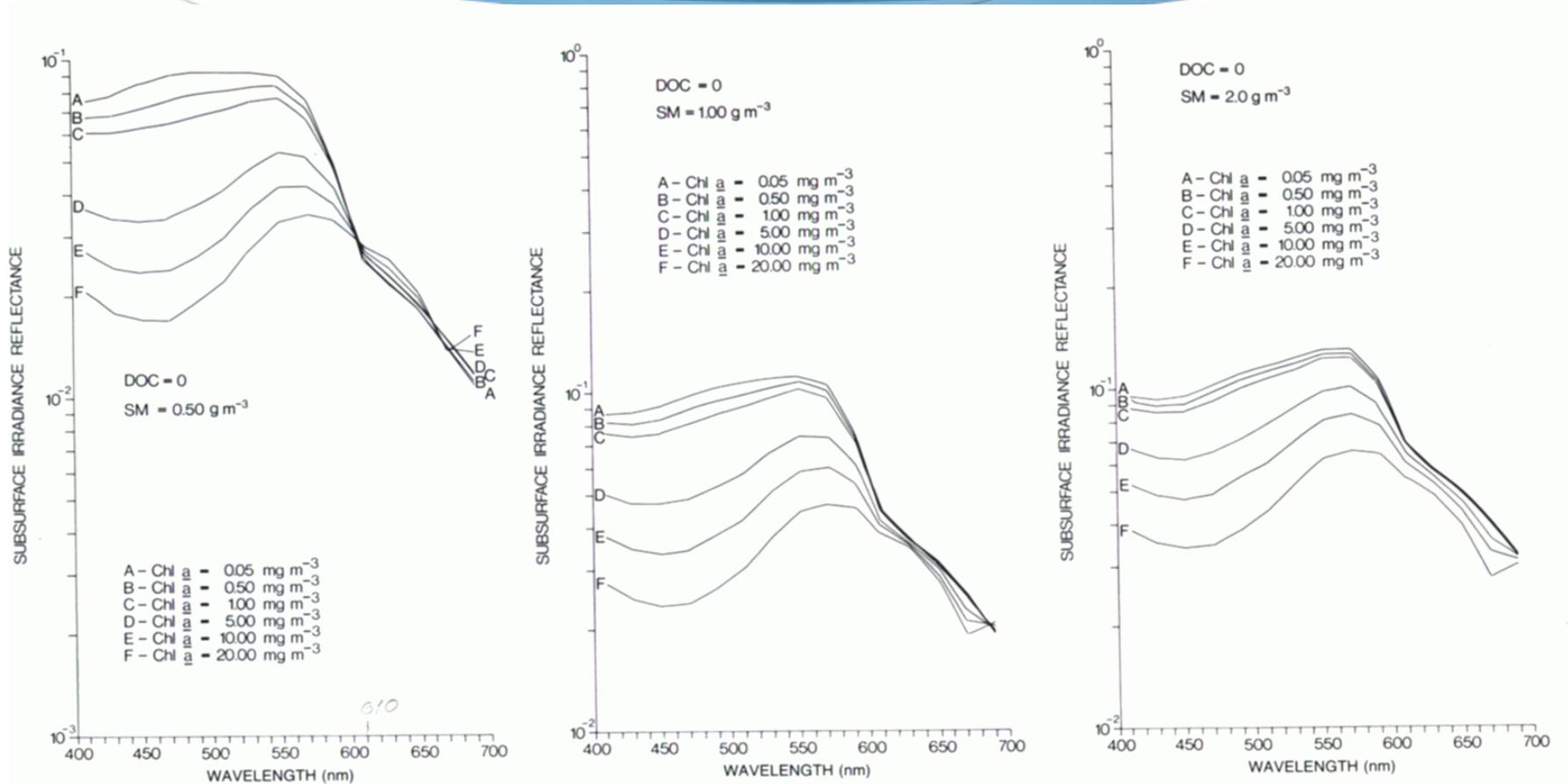
# Сравнительная суперпозиция поглощающих и рассеивающих свойств (цвет образующих компонент) ЦОК



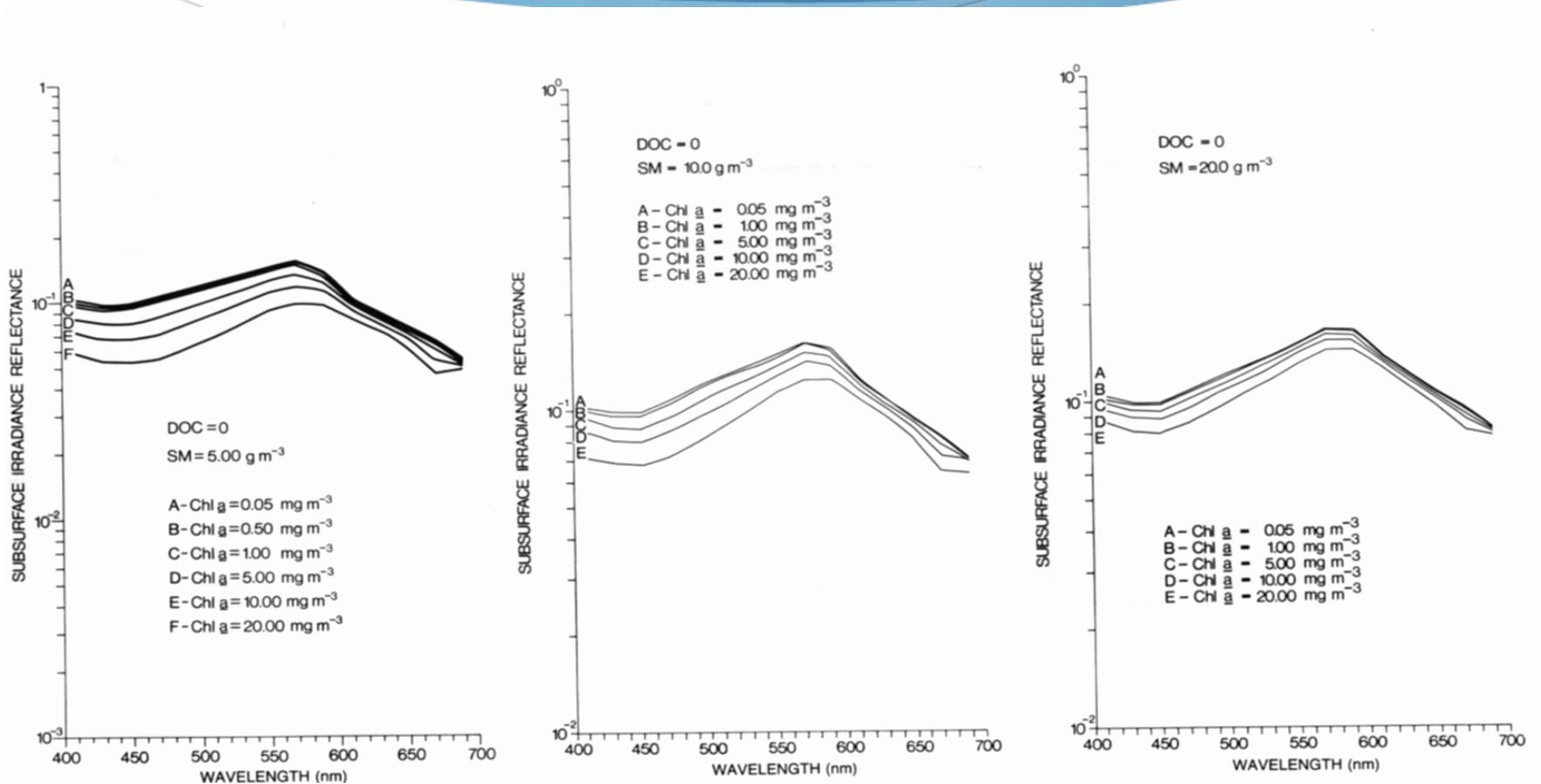
# Концептуальные основы построения био-оптических алгоритмов



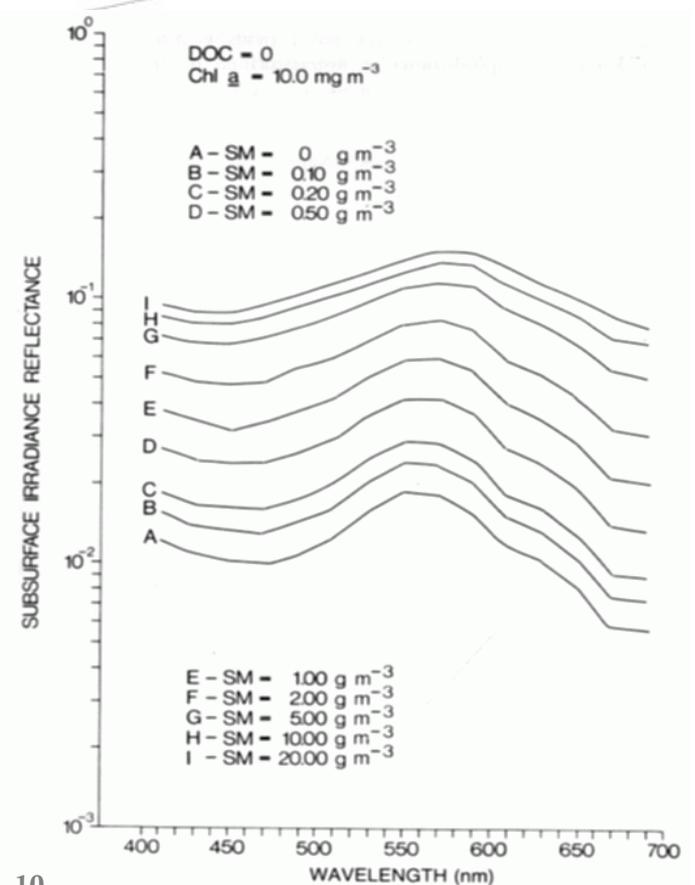
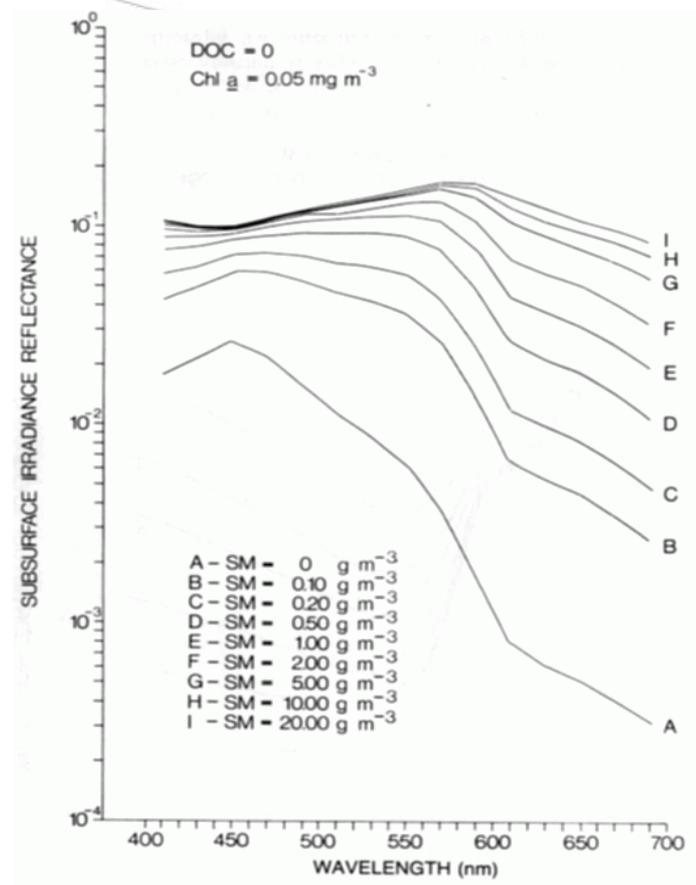
# Концептуальные основы построения био-оптических алгоритмов (продолжение)



# Концептуальные основы построения био-оптических алгоритмов (продолжение)



# Концептуальные основы построения био-оптических алгоритмов (продолжение)



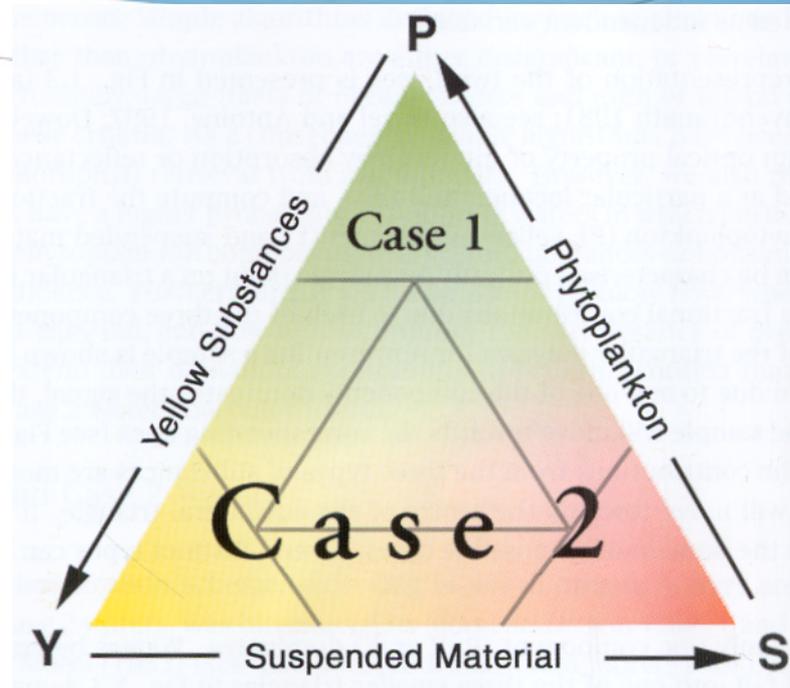
## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (хл)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления хл
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций хл
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

# Типичные вещества, определяющие вариации цвета природной воды

- ◆ Фитопланктон
- ◆ Бактериопланктон
- ◆ Зоопланктон
- ◆ Детрит
- ◆ Растворенное органическое вещество (окрашенная фракция)
- ◆ Взвешенное минеральное вещество
- ◆ Воздушные пузырьки

# Классификаци вод типа I и II



IOCCG, 2000

# Разделение Арктического Бассейна



-  - Шельфовая зона (< 200м)
-  - Пелагиальная зона

## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (*хл*)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления *хл*
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций *хл*
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

# Алгоритм восстановления ПП по Marra *et al.* [2003]

$$P(z) [\text{мгС/м}^2 \text{ день}] = \varphi \cdot a_{\text{ph}}^* \cdot \text{Chl}_a \cdot E_{\text{par}}(z),$$

где  $\varphi$  - квантовый выход (моль С моль фотон<sup>-1</sup>);

$a_{\text{ph}}^*$  удельный коэффициент поглощения хлорофилла фитопланктона [ $\text{м}^2$  (мг Хл<sub>а</sub>)<sup>-1</sup>];

$E_{\text{par}}$  - фотосинтетически активная радиация (моль фотон · м<sup>-2</sup> · день<sup>-1</sup>);

$Z$  (0-100) м;

Фотическая зона рассчитывается с использованием спектрального коэффициента диффузного ослабления света,  $K_d(\lambda)$

# Алгоритм восстановления ПП по Behrenfeld et al. [1997]

$$P_{eu}([\text{мгС}/\text{м}^2 \text{ день}]) = 0.66125 \cdot P_{opt}^B \cdot [E_o / (E_o + 4.1) \cdot Z_{eu} \cdot C_{opt} \cdot DL],$$

где  $P_{eu}$  ПП в фотической зоне;  $P_{opt}^B = -3.27 \cdot 10^{-8} \cdot T^7 + 3.4132 \cdot 10^{-6} \cdot T^6 + 1.348 \cdot 10^{-4} \cdot T^5 + 2.462 \cdot 10^{-3} \cdot T^4 - 0.0205 \cdot T^3 + 0.0617 \cdot T^2 + 0.2749 \cdot T + 1.2956$  (мгС/мгХл час)

$C_{opt}$  - концентрация хл при  $P_{opt}^B$  ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

$E_o$  - фотосинтетически активная радиация (моль фотон  $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{день}^{-1}$ )

$Z_{eu}$  - фотическая зона  $\ln(0.01) / K_d(490)$  (м);

$C_{opt}$  принимается равным  $C_{sat}$ .

DL – длина солнечного дня (ч)

# Алгоритм восстановления ПП по Behrenfeld *et al.* [2005]

$$PP = C_{sat} \times [ 2 \text{ cell divisions day}^{-1} \times [\text{Chl}:C_{sat} / 0.22 + (0.045 - 0.022) \times e^{-3/g}] \times [-\ln(0.01)/K_d(490)] \times [0.66125 E_o / E_o + 4.1],$$

где PP измеряется в (мг С /м<sup>2</sup> день)

$C_{sat}$  и  $I_g$  определяются как  $C_{sat}(\text{мг С м}^{-3}) = \{ (b_{b,p}(443) - 0.00035) \times 13,000 \}$   
 $I_g = E_o \cdot e^{(-K_d(490) \times \text{MLD}/2)}$ ;  $E_o$  = освещенность водной поверхности в диапазоне длин волн 400-700 нм,

$b_{b,p}$  – спектральный коэффициент обратного рассеяния клетками фитопланктона;

MLD-глубина перемешанного слоя

# Входные параметры для ПП алгоритмов

- Marra *et al.*, 2003:  
Chl<sub>a</sub>, E<sub>0</sub>, SST
- Behrenfeld and Falkowski, 1997:  
Chl<sub>a</sub>, E<sub>0</sub>, SST, K<sub>d</sub> (490), DL
- Behrenfeld *et al.*, 2005  
Chl<sub>a</sub>, E<sub>0</sub>, SST, K<sub>d</sub> (490), DL, b<sub>b,p</sub>(443), MLD

## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (*хл*)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления *хл*
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций *хл*
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

# Стандартный алгоритм NASA OC4 для SeaWiFS

$$\log_{10}(\text{CHL}) = 0.366 - 3.067R + 1.930R^2 + 0.649R^3 - 1.532R^4$$

где

$$R = \log_{10}[\max(R_{rs}(443), R_{rs}(490), R_{rs}(510)) / R_{rs}(555)]$$

# Стандартный алгоритм NASA OC3 для MODIS

$$\log_{10}(\text{CHL}) = 0.283 - 2.753R + 1.457R^2 + 0.659R^3 - 1.403R^4$$

где

$$R = \log_{10}[\max(R_{rs}(443), R_{rs}(488)) / R_{rs}(551)]$$

# Garver-Siegel-Maritorena (GSM) алгоритм

$$L_{WN}(\lambda) = \frac{tF_0(\lambda)}{n_w^2} \sum_{i=1}^2 g_i \left[ \frac{b_b(\lambda)}{b_b(\lambda) + a(\lambda)} \right]^i \dots$$

где

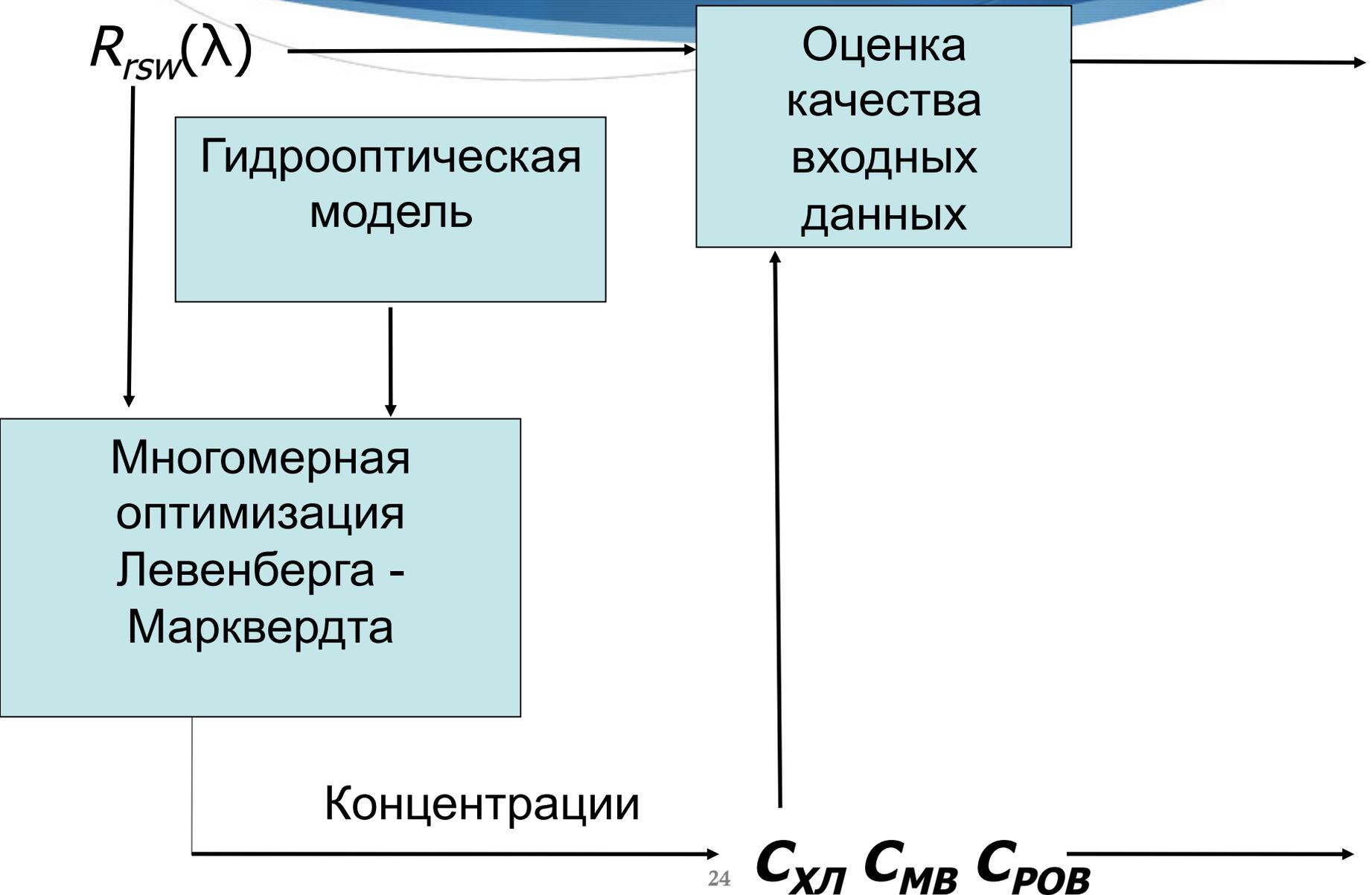
$t$  коэффициент взаимодействия океана с атмосферой

$F_0$  освещенность

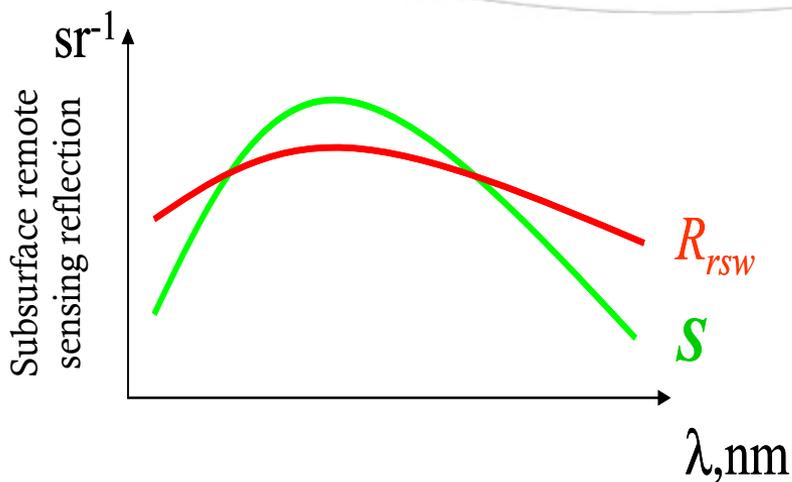
$n_w$  коэффициент рефракции морской воды

$g_i$   $f/Q$  фактор (см. Morel and Gentily, 1991 )

# Схема алгоритма BOREALI

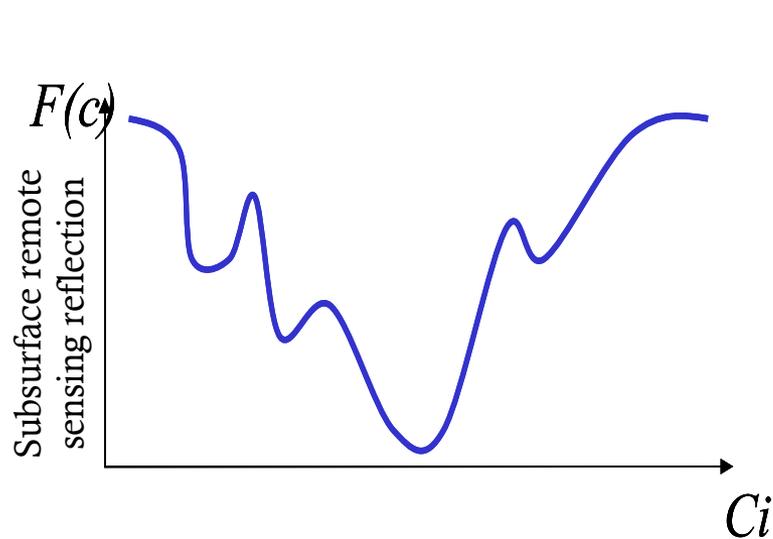


# Методическая основа алгоритма BOREALI - метод Левенберга - Марквердта



$$g_j = (S_{rswj} - R_{rswj}) / S_j$$

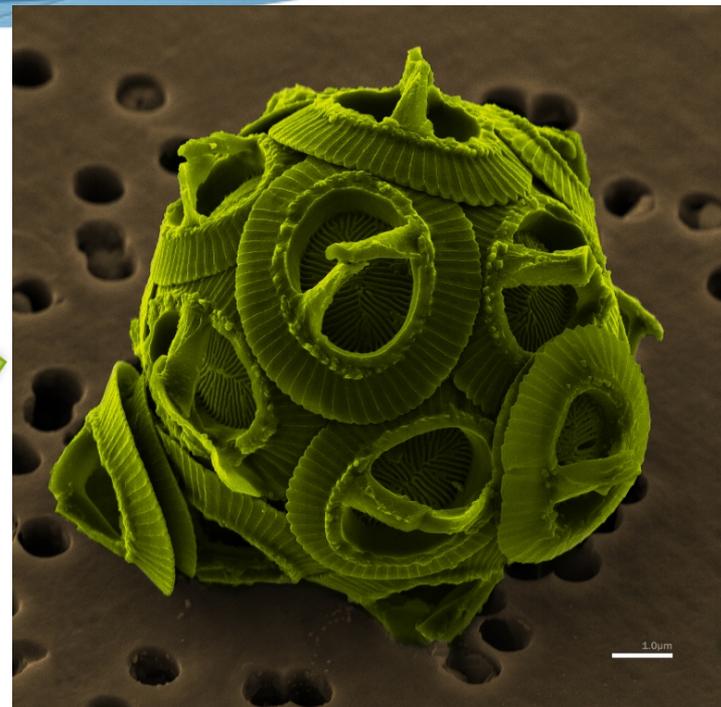
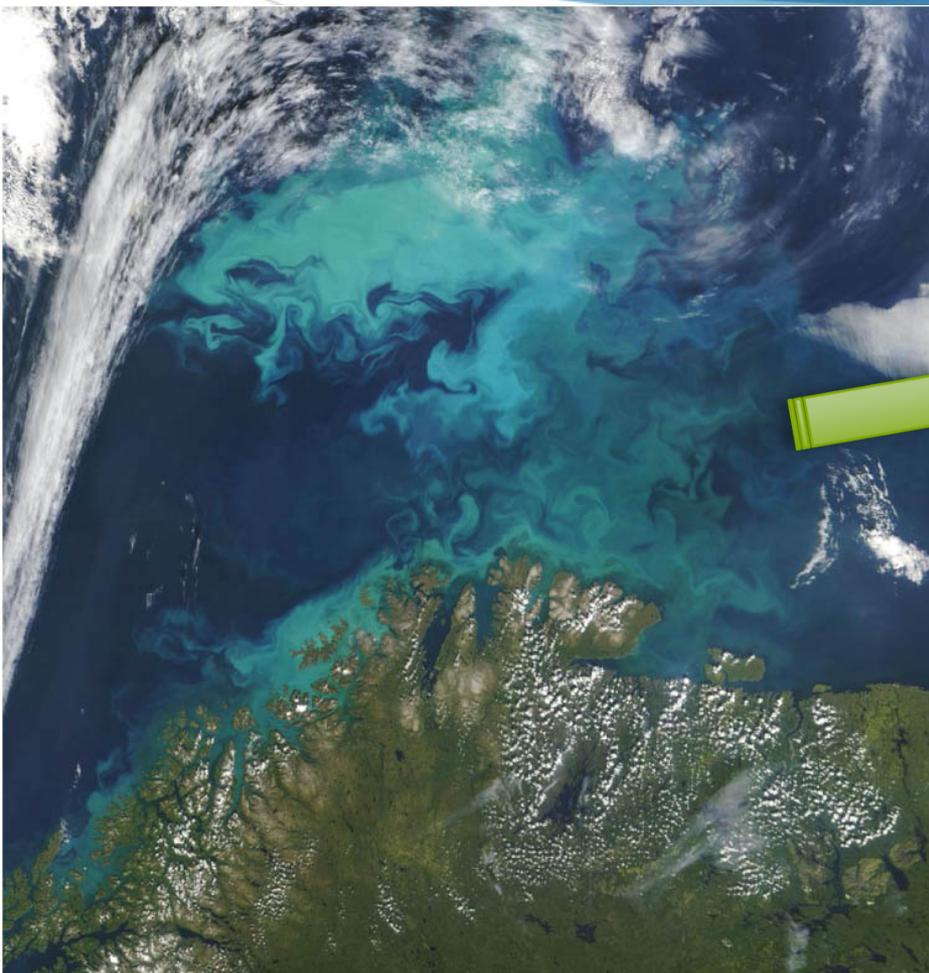
$R_{rsw}$  - измеренное  
 $S_{rsw}$  - моделированное



$$\overline{R_{rsw}} = -0.00036 + 0.110(b_b/a) - 0.0447(b_b/a)^2$$

[Jerome et al., 1996]

# Цветение кокколитофоров *Emiliania huxleyi*



# Гидрооптические модели алгоритма BOREAL

Для вод типа II:

$$a = a_{\text{в}} + a_{\text{хл}} + a_{\text{ров}} + a_{\text{мв}};$$

$$b_b = b_{b\text{в}} + b_{b\text{хл}} + b_{b\text{ров}} + b_{b\text{мв}}$$

Для облоостей цветения кокколитофоров:

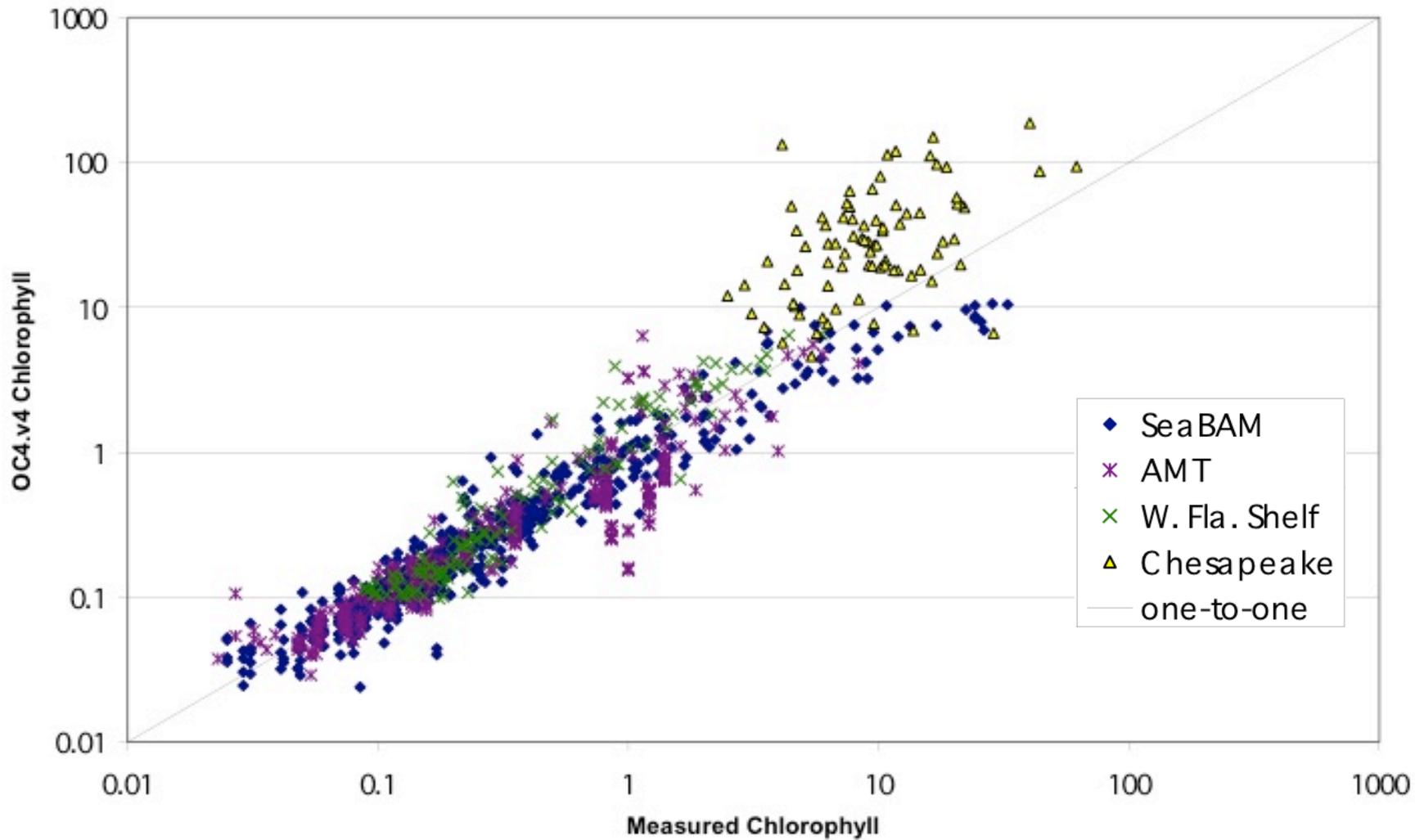
$$a = a_{\text{в}} + a_{\text{хл}} + a_{\text{кф}} + a_{\text{кк}};$$

$$b_b = b_{b\text{в}} + b_{b\text{хл}} + b_{b\text{кф}} + b_{b\text{кк}}$$

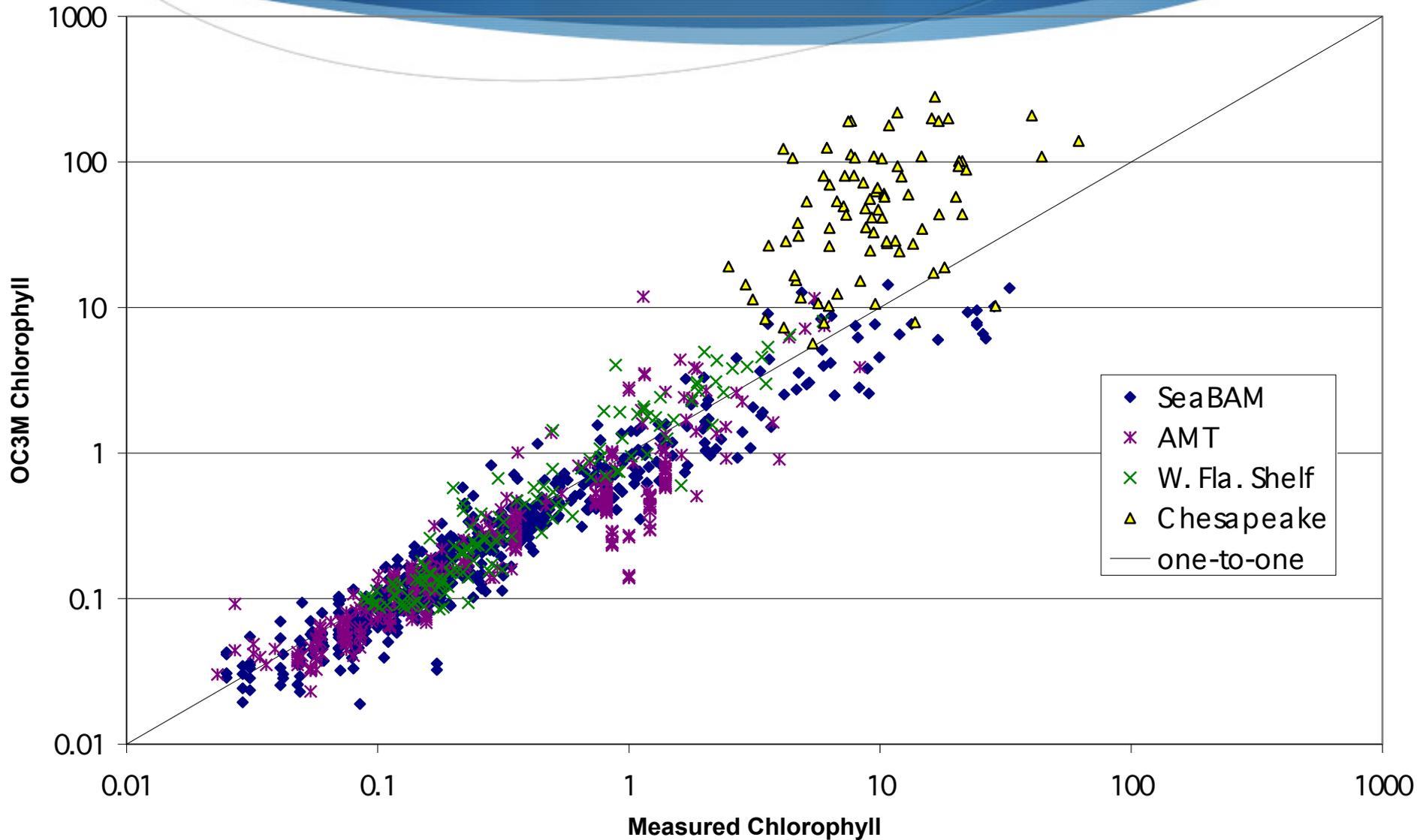
## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (хл)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления хл
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций хл
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

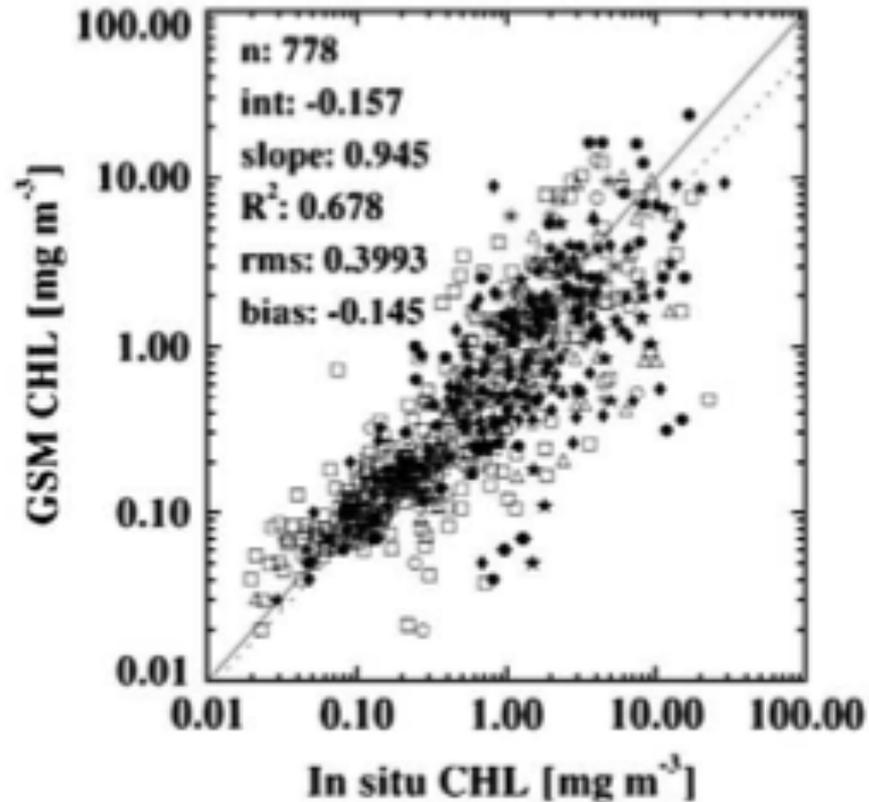
# Валидация алгоритма OC4



# Валидация алгоритма ОСЗ

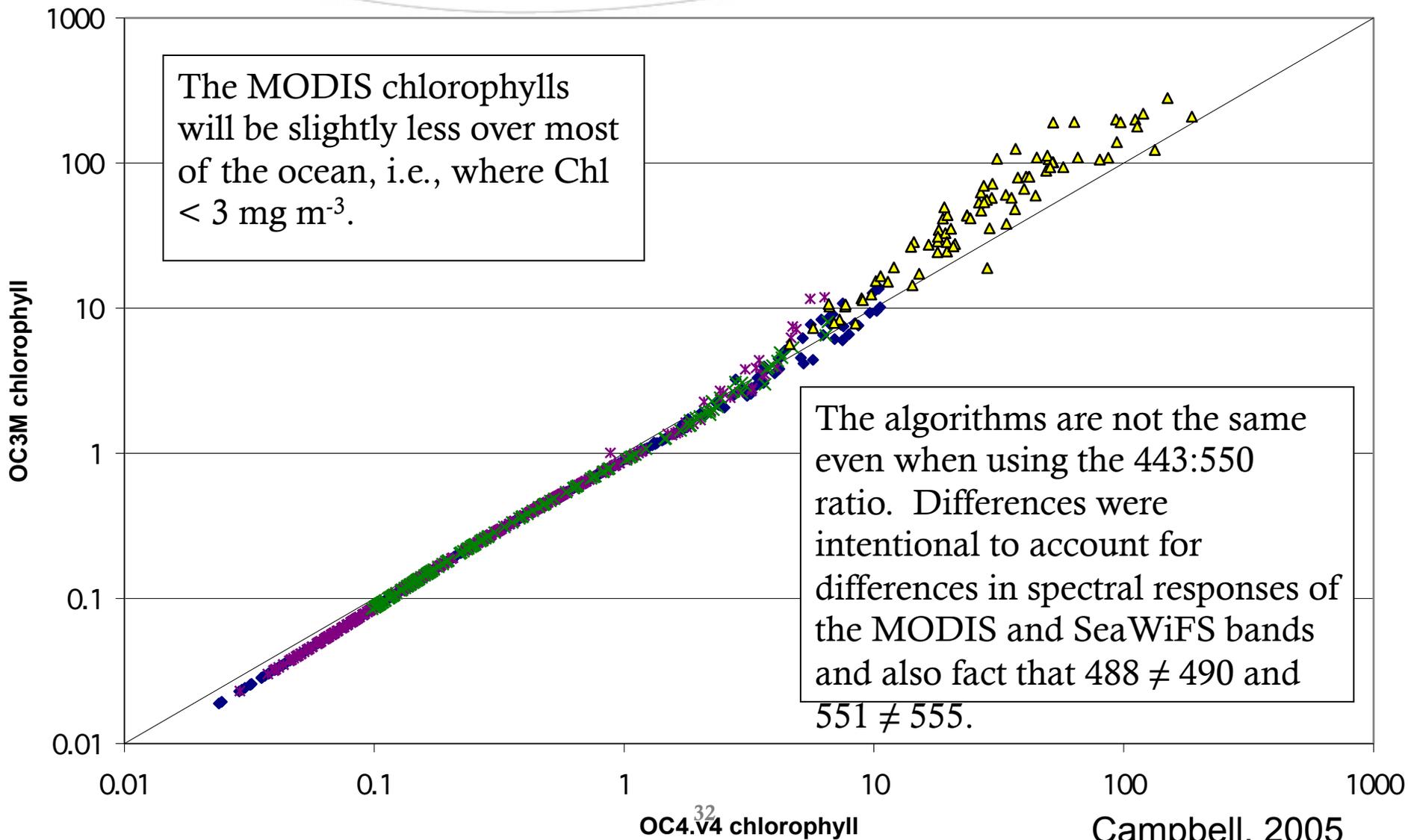


# Валидация алгоритма ОСЗ



# Сравнение ОС3 и ОС4

(при допущении 448 ~ 490, 551 ~ 555)

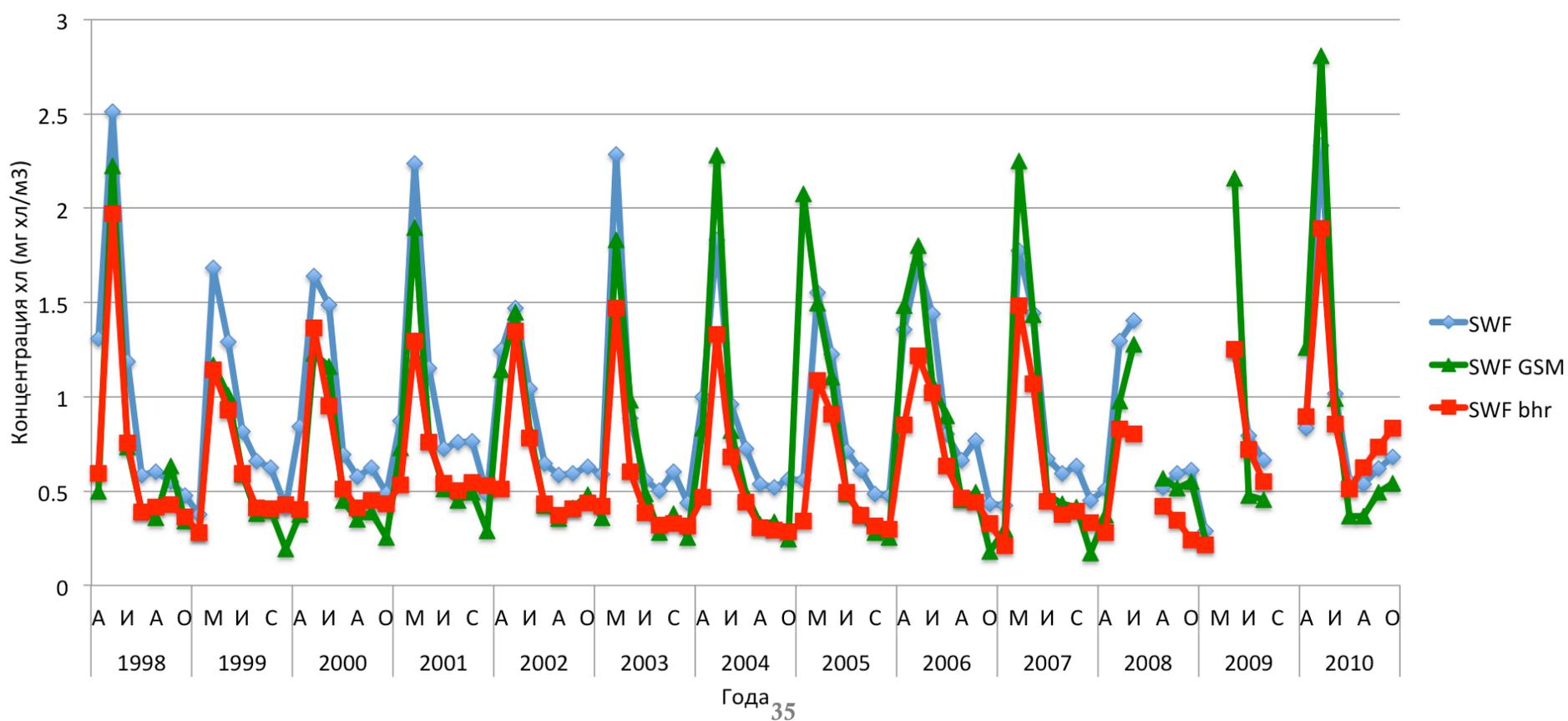


## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (хл)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления хл
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций хл
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

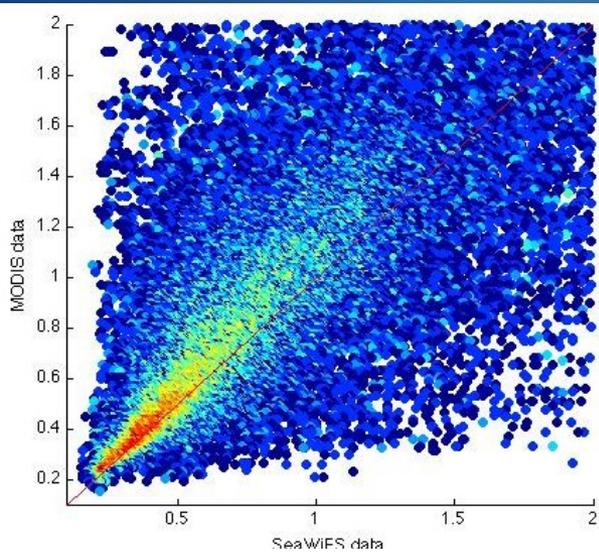


# Сравнение количественных оценок концентраций хл по данным SeaWiFS в пелагиальной зоне

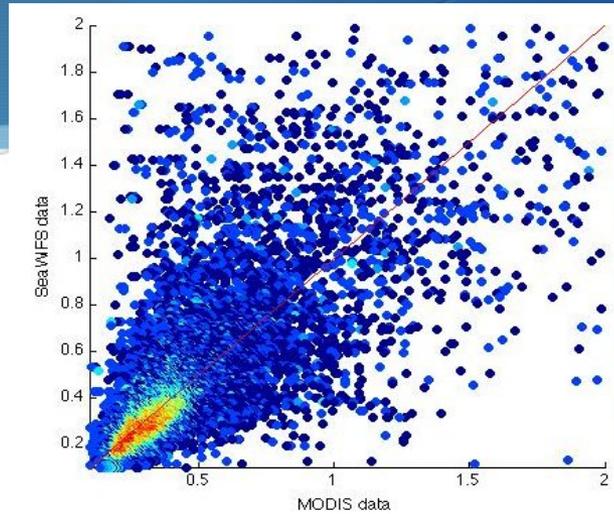


# Сравнение средних значений концентраций за 2003год

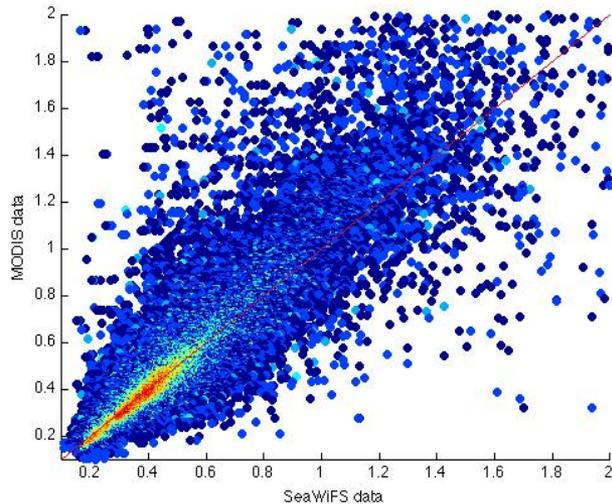
OC4



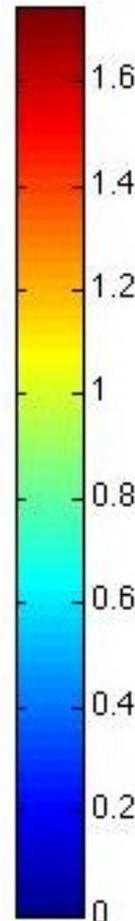
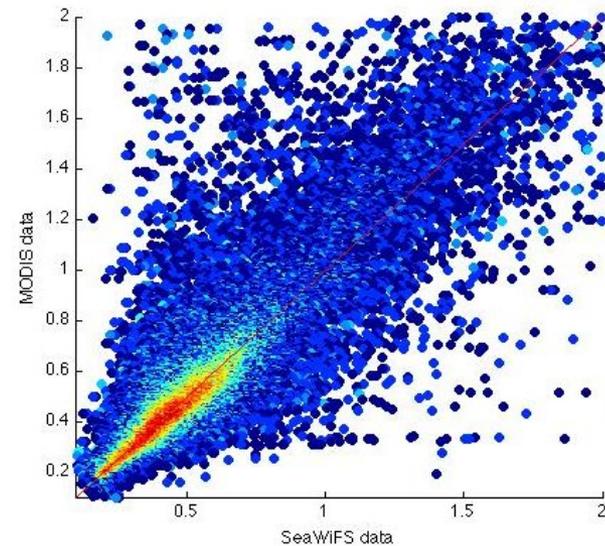
GSM

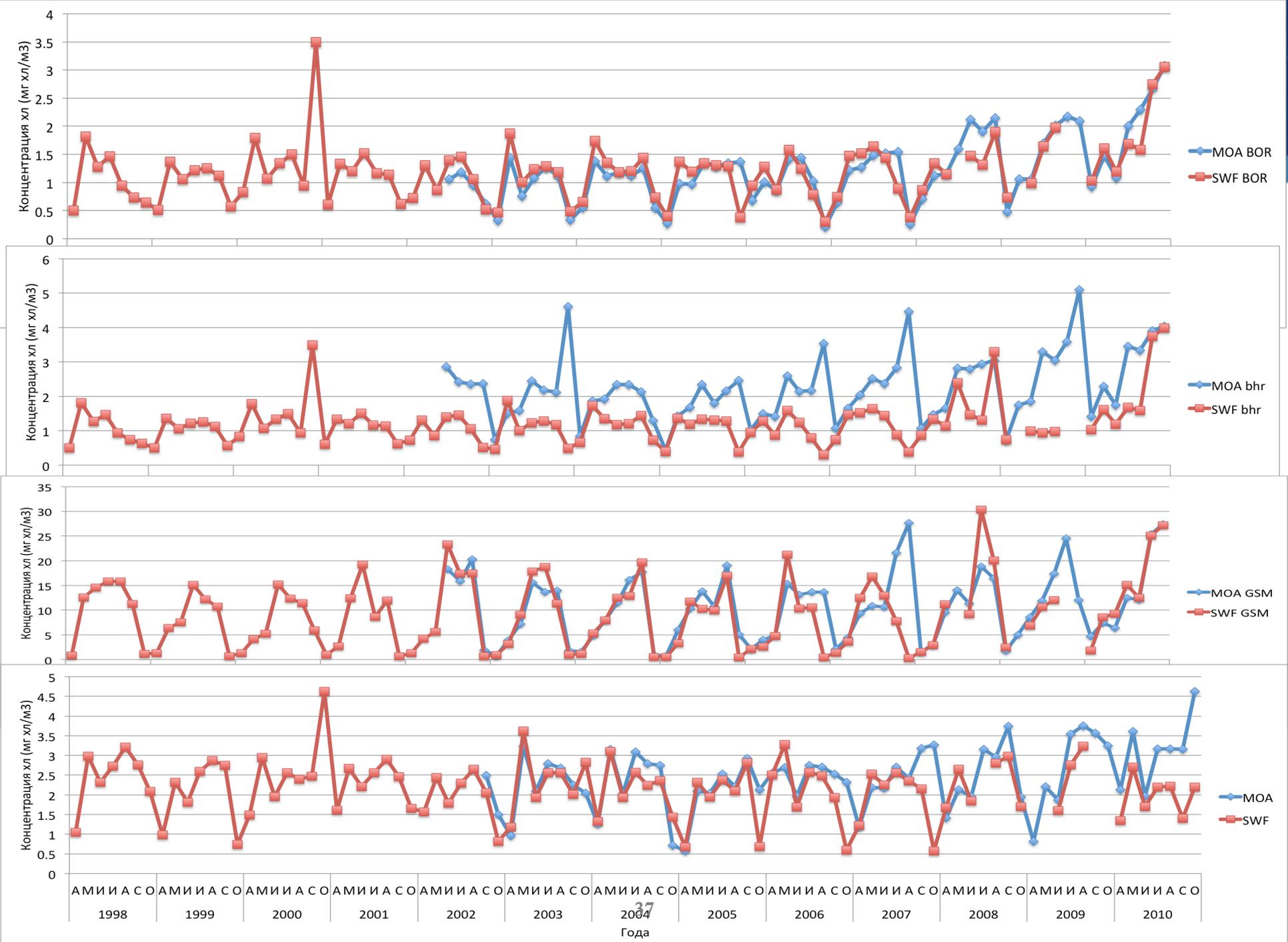


Behrenfeld

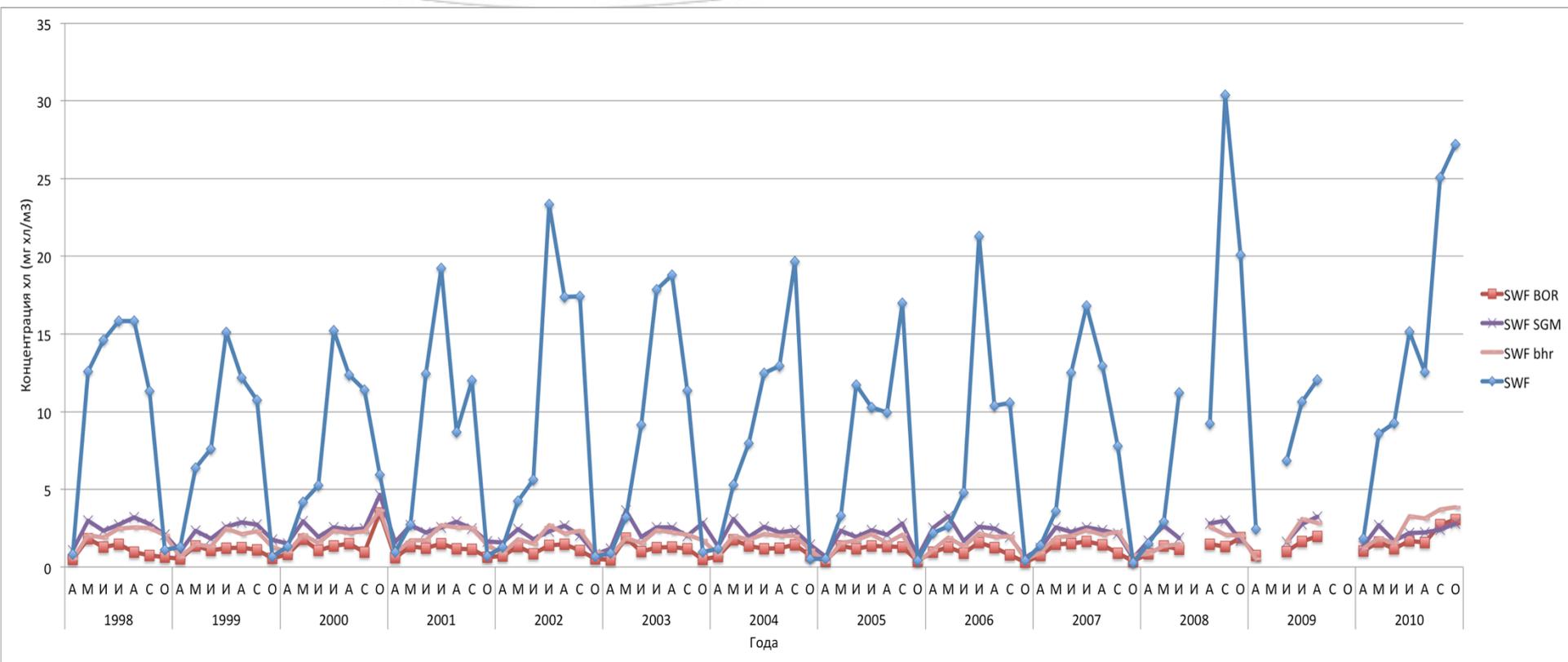


BOREALI





# Сравнение количественных оценок концентраций хл по данным SeaWiFS в шельфовой зоне





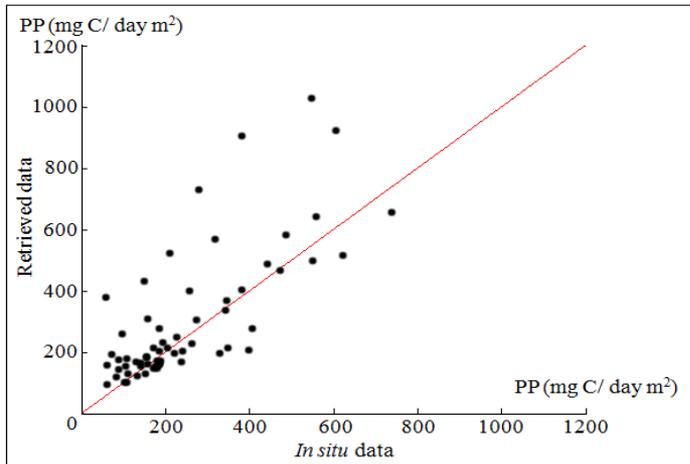
## Содержание доклада:

- 💧 Оптические свойства природных вод
- 💧 Классификация вод Арктического бассейна
- 💧 Алгоритмы восстановления первичной продукции (ПП)
- 💧 Алгоритмы восстановления концентрации хлорофилла (хл)
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления хл
- 💧 Сравнение временных рядов концентраций хл
- 💧 Оценка адекватности алгоритмов восстановления ПП

# Статистические характеристики результатов сравнения: в пелагиальной зоне

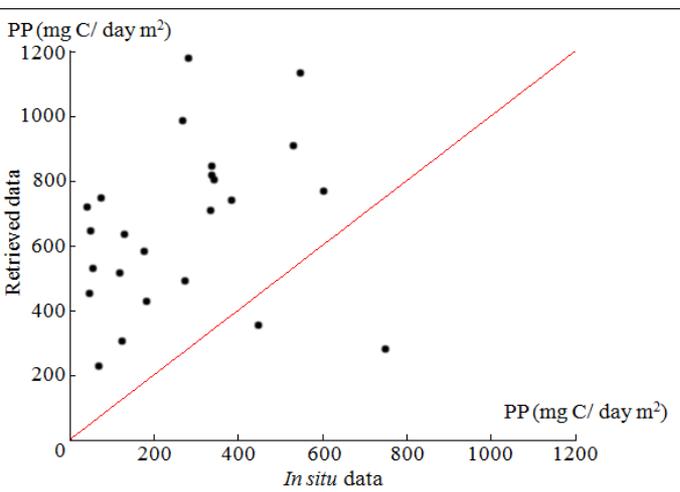
Алгоритм: Bhr 97

Входные *chl* данные: GSM-Bhr



Алгоритм: Bhr 97

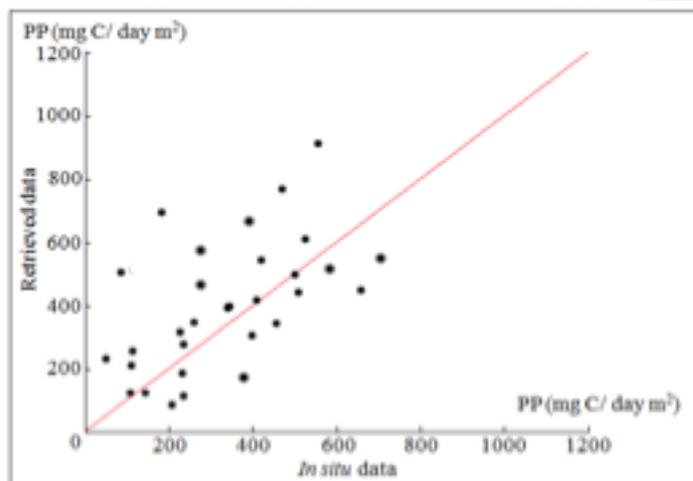
Входные *chl* данные: OC-3



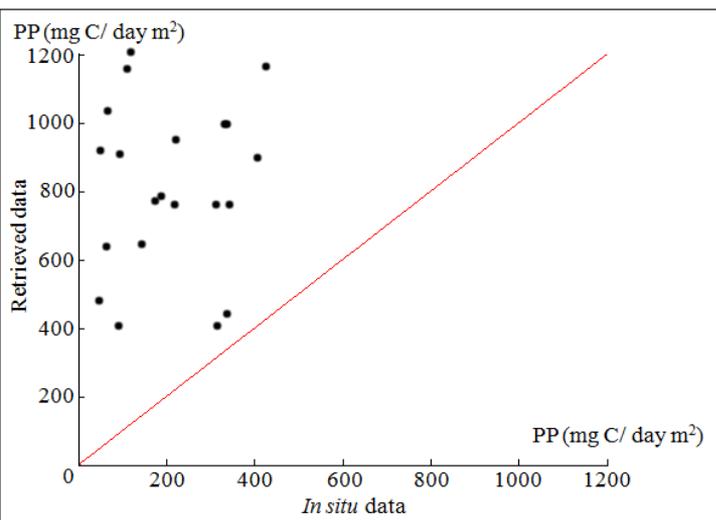
Алгоритм	Входные <i>chl</i> данные	Коэффициент корреляции $R^2$
Bhr 97	GSM/Bhr	0.80
Bhr 97	GSM/NASA	0.64
Bhr 97	OC3/NASA	0.52
Bhr 05	GSM/Bhr	0.23
Bhr 05	GSM/NASA	0.17
Bhr 05	OC3/NASA	0.09
Mara 03	GSM/Bhr	0.69
Mara 03	GSM/NASA	0.54
Mara 03	OC3/NASA	0.37

# Статистические характеристики результатов сравнения: в шельфовой зоне

Алгоритм: Bhr 97+ BOREALI  
Входные *chl* данные: Ocean colour/NASA



Алгоритм: Bhr 97  
Входные *chl* данные: OC4/NASA



Алгоритм	Входные <i>chl</i> данные	Коэффициент корреляции $R^2$
Bhr 97	GSM/Bhr	0.61
Bhr 97	GSM/NASA	0.37
Bhr 97	OC3/NASA	-0.07
Bhr 05	GSM/Bhr	0.17
Bhr 05	GSM/NASA	0.12
Bhr 05	OC3/NASA	-0.15
Mara 03	GSM/Bhr	0.52
Mara 03	GSM/NASA	0.25
Mara 03	OC3/NASA	-0.11
Bhr 97	BOREALI / NASA	<b>0.75</b>
42Mara 03	BOREALI / NASA	0.73

# Заключение:

1. Данные MODIS и SeaWiFS хорошо согласуются
2. Следует строго разделять воды типа I и II и выбирать алгоритм восстановления хлорофилла соответственно
3. Алгоритм Behrenfeld 1997 показал лучший результат при сравнении с *in situ* данными и в пелагической и шельфовой зонах
4. Лучшие результаты при восстановлении ПП в пелагиальной зоне были показаны данными хл GSM/Bhr + BOREALI (в области цветения кокколитофоров)
5. Лучшие результаты при восстановлении ПП в шельфовой зоне были показаны данными хл BOREALI

**Спасибо за внимание!!**

