



ФГБУН «Институт морских биологических исследований имени А.О. Ковалевского РАН»

**РЕГИОНАЛЬНЫЕ **БИОопТИЧЕСКИЕ** МОДЕЛИ  
для оценки показателей продуктивности вод  
ЧЕРНОГО МОРЯ  
по данным дистанционного зондирования**



Чурилова Т. Я., в.н.с., к.б.н., ИМБИ РАН

Суслин В.В., с.н.с., к.ф-м.н., МГИ РАН

Кривенко О. В., с.н.с., к.б.н., ИМБИ РАН

Ефимова Т. В., м.н.с., ИМБИ РАН

Моисеева Н. А., вед.инж., ИМБИ РАН



МНИ

# Широкий спектр перспективных направлений прикладного использования данных ДЗЗ



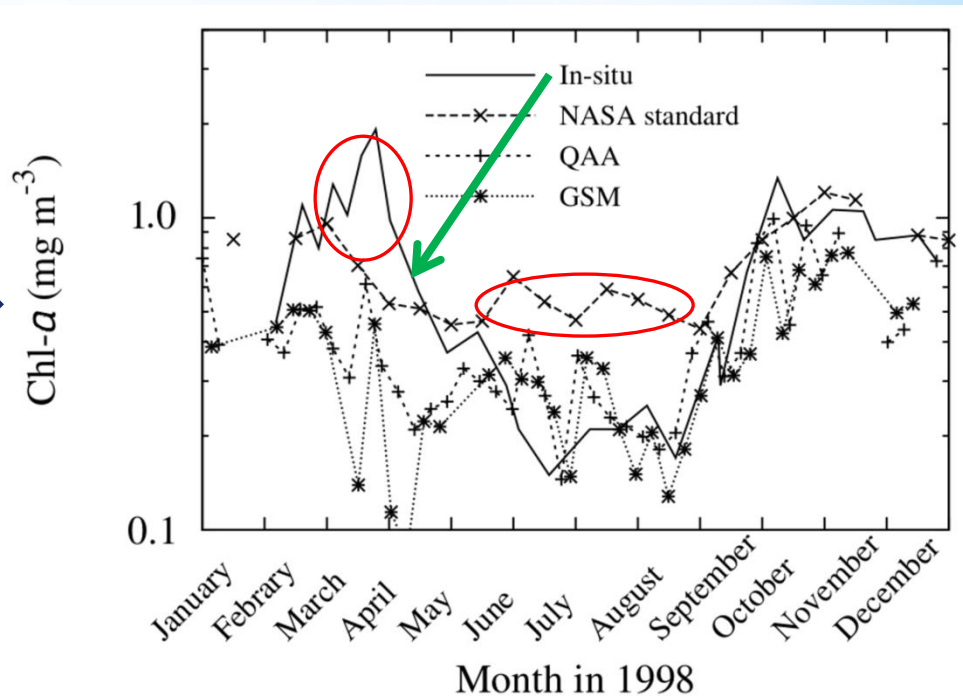
# Корректность алгоритмов

Мировой Океан

**не однороден** по биооптическим показателям вод

Однако, стандартный алгоритм -????

Не дает корректной оценки концентрации хлорофилла *a* В Черном море



Сравнение модельных оценок с результатами измерений Хл *a* в море (Suslin, Churilova, 2016)

**Требуются алгоритмы,  
учитывающие  
региональные особенности  
биооптических показателей вод**

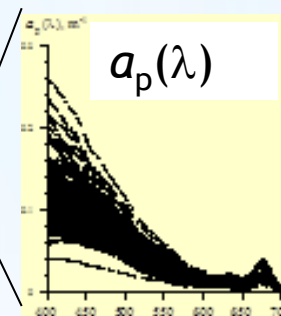
# Поглощение света

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + [a_p(\lambda) + a_{\text{CDOM}}(\lambda)]$$

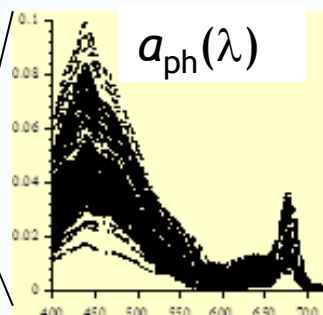
**Вода**

(Pope, Fry, 1997)

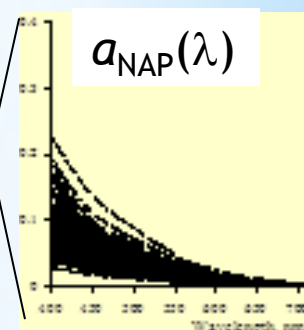
**Взвешенное  
вещество**



**Планктонные  
водоросли**

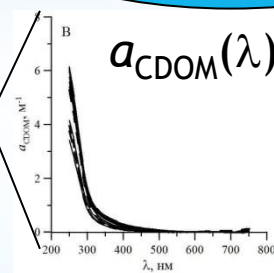


**Неживая взвесь**



**РОВ**

**Окрашенное РОВ  
CDOM**



**Неокрашенное  
РОВ**

# ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ

ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА ВСЕМИ ОПТИЧЕСКИ  
АКТИВНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ МОРЯ:

1. Фитопланктон (ph):

$$a_{\text{ph}}(\lambda) = A(\lambda) \times \text{Chl } B(\lambda);$$

2. Неживая взвесь (NAP):

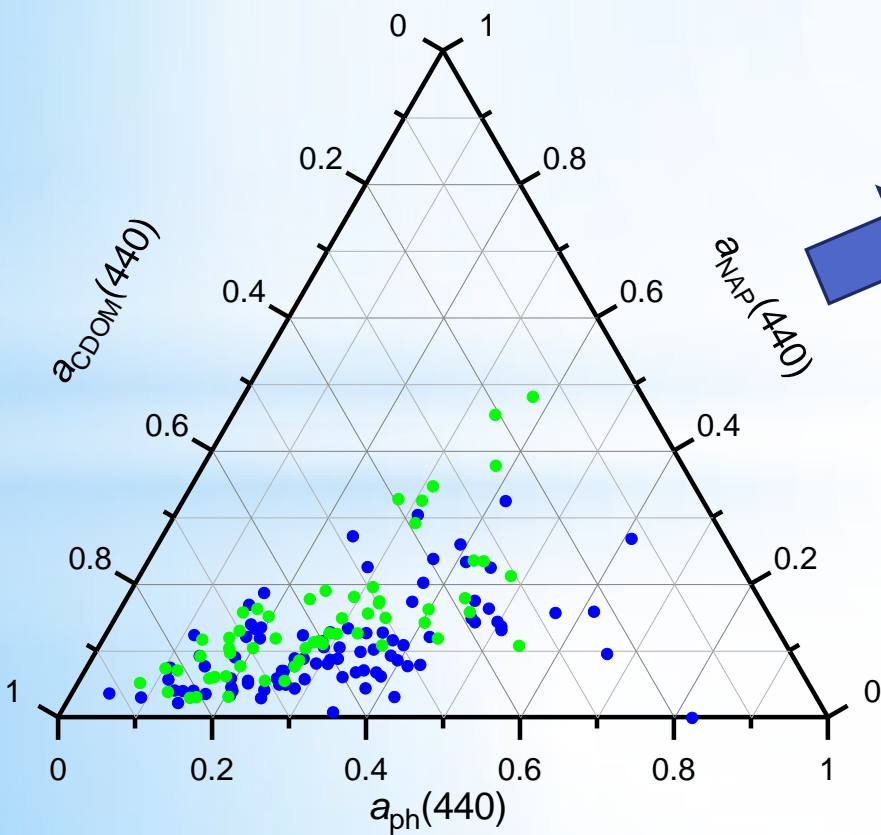
$$a_{\text{NAP}}(\lambda) = a_{\text{NAP}}(\lambda_r) \exp(-S \times (\lambda - \lambda_r)); (400 - 700 \text{ нм})$$

3. Окрашенное растворенное органическое вещество  
(CDOM) :

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_r) \exp(-S \times (\lambda - \lambda_r)); (350 - 500 \text{ нм})$$

Оценить  
относительный вклад  
каждого компонента в общее поглощение света

# Относительный вклад фитопланктона, CDOM и NAP в общее поглощение света на 440 нм в Черном море



$a_{\text{CDOM}}$  - основной оптически активный компонент в глубоководных (синий) и прибрежных (зеленый) районах Черного моря

# Региональные биооптические модели для оценки показателей продуктивности экосистемы **Черного моря** на основе спутниковой информации

1. Модель концентрации хлорофилла а и коэффициента поглощения света -  $a_{CDM}(490)$  (Суслин и др., 2008, 2014, Suslin, Churilova 2016);
2. Модель оценки биомассы фитопланктона (Финенко, Чурилова и др., 2011)
3. Спектральная Модель подводной облученности - ФАР (Churilova et al., 2009)
4. Спектральная Модель первичной продукции - ПП (Churilova et al., 2010)
5. Модель скоростей потоков неорганических соединений азота через микропланктонное сообщество (Кривенко и др., 2015)



# Модель Chl и $a_{CDM}(490)$

## Решение модели:

Данные сканеров (Level 2):

Color Scanner	Data version	Center of bands, nm			Filter of flags/masks	Operation period
		$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$		
SeaWiFS	R2010.0	490	510	555	4, 6, 8*, 9, 13	Sept 1997 - Dec 2010
MODIS-Terra	R2013.0	488	531	547	4, 6, 9, 24*	Feb 2000 - current
MERIS	R2012.0	490	510	560	4, 6, 9, 24*	May 2002 - Apr 2012
MODIS-Aqua	R2013.1	488	531	547	4, 6, 9, 24*	Jul 2002 - current

\* negative values of  $R_{rs}$

Уравнения:

$$a_{ph}(\lambda_0) = \Psi_{ph}(\vec{a}_w, \vec{y}, \vec{\chi}, \vec{k}, \vec{I}) \quad (1)$$

$$a_{CDM}(\lambda_0) = \Psi_{CDM}(\vec{a}_w, \vec{y}, \vec{\chi}, \vec{k}, \vec{I})$$

Eqs of  $C_a$  and  $a_{CDM}(490)$  isolines to space  $\{I_1, I_2\}$  for two types of Solutions ("Deep" and "Shelf")

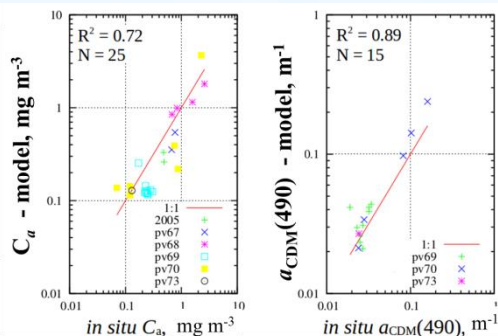
Переменные и коэффициенты модели:

notation	expression	source
$\vec{I}$	$I_1 = \frac{F_2 \cdot R_{RS}(\lambda_2)}{F_1 \cdot R_{RS}(\lambda_1)}$ $I_2 = \frac{F_3 \cdot R_{RS}(\lambda_3)}{F_2 \cdot R_{RS}(\lambda_2)}$	$F_i$ , $i=1,2,3$ solar constant [Thuillier et al., 2003]
$\vec{a}_w$	$a_w(\lambda_i)$ , $i=1,2,3$	[Pope & Fry]
$\vec{y}$	$\exp(-S \cdot (\lambda_i - \lambda_0))$ , $i=1,2,3$	[Churilova et al., 2008]
$\vec{\chi}$	$\chi_1 = (\frac{\lambda_1}{\lambda_2})^n$ и $\chi_2 = (\frac{\lambda_2}{\lambda_3})^n$	[Kopelevich, 1978]
$\vec{k}$	$k_i = \frac{a_{ph}(\lambda_i)}{a_{ph}(\lambda_0)}$ , $i=1,2,3$	[Suslin et al., 2008]

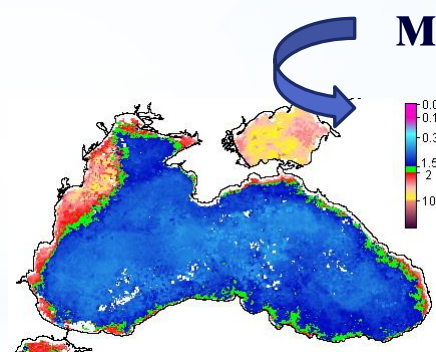
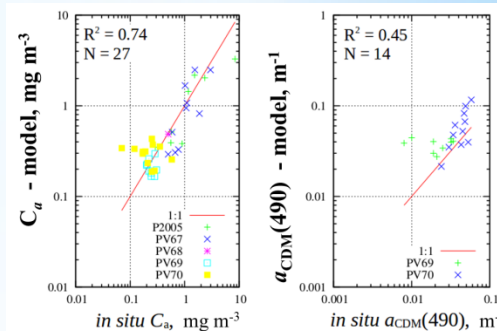
, where  $\lambda_0 = 490$  nm.

## Сравнение модельных результатов с данными in situ измерений

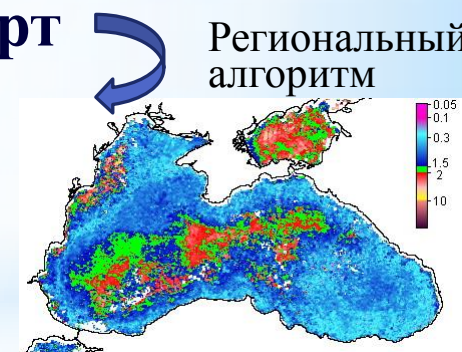
MODIS-Aqua



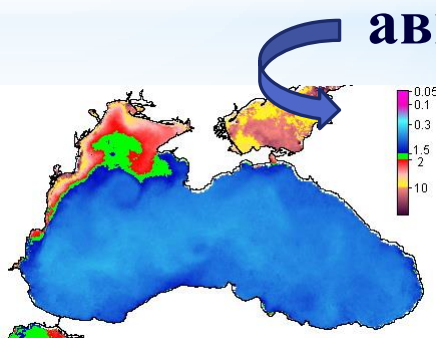
MERIS



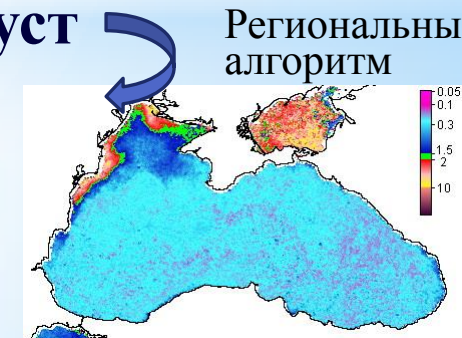
март



Региональный алгоритм



август



Региональный алгоритм

# Модель ФАР - $E_d(\lambda)$

модификация Бедфордской модели (Platt et al., 1991) на основе биооптических показателей вод Черного моря

**Подводная облученность:**

$$E_d(z, \lambda) = E_{dd}(z - \Delta z, \lambda) \exp(-k_{dd}(z, \lambda) \Delta z) + E_{sd}(z - \Delta z, \lambda) \exp(-k_{sd}(z, \lambda) \Delta z)$$

где  $k_{dd}(z, \lambda)$  и  $k_{sd}(z, \lambda)$  - коэффициенты вертикального ослабления для прямого и диффузного света

$$k_{dd}(z, \lambda) = (a(z, \lambda) + b_b(z, \lambda)) / \cos \Theta_d$$

$$k_{sd}(z, \lambda) = (a(z, \lambda) + b_b(z, \lambda)) / 0.83,$$

$$\Theta_d = 23 \text{ (лето)}, \Theta_d = 66 \text{ (зима)},$$

# Поглощение света - $a(\lambda)$

$$a(\lambda) = (a_{ph}(\lambda) + a_{NAP}(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_w(\lambda))$$

$a_w(\lambda)$  - поглощение света водой (Pore and Fry, 1997)

В модели учитываются установленные различия в параметризации

$a_{ph}(\lambda)$ ,  $a_{NAP}(\lambda)$  и  $a_{CDOM}(\lambda)$

между сезонами и слоями зоны фотосинтеза; прибрежными и глубоководными районами моря

## Обратное рассеяние света:

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)$$

**а) водой** (Smith and Baker, 1981) :

$$b_{bw}(\lambda) = 0.5b_w(\lambda)$$

**б) частицами** (Суетин и др., 2002) :

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(555) (\lambda/555)^{-n}$$

$n$  – коэффициент, который отражает размерную структуру частиц, изменяется от 0.3 (крупные диатомовые) до 1.5 (кокколиты).

**в) коэффициент  $b_{bp}(555)$  рассчитывается по спутниковым данным:**

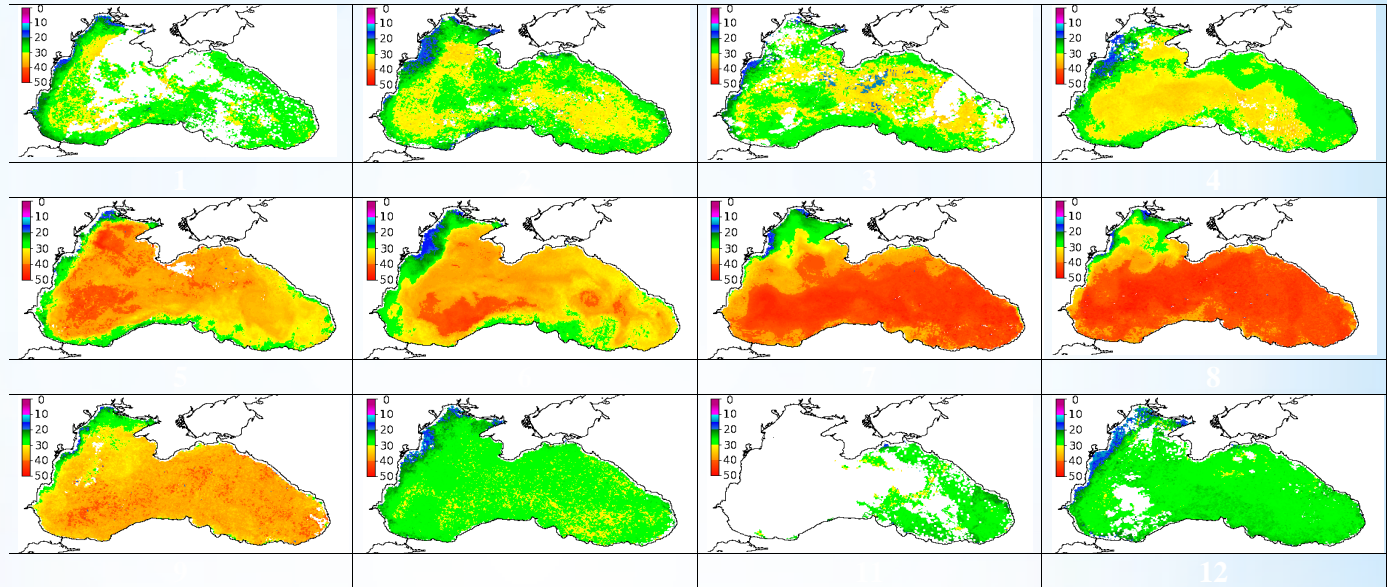
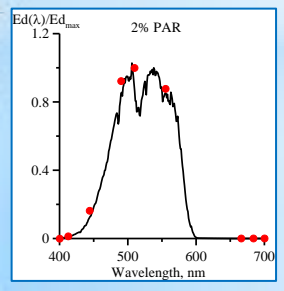
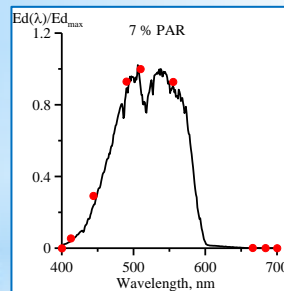
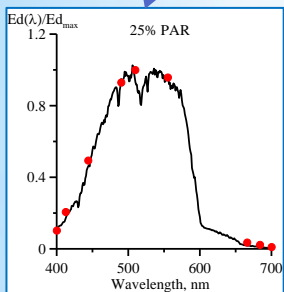
$$b_{bp}(555) = (6.76 \text{ nlw}(555) + 0.03(\text{nlw}(555))^3 + 3.40 \text{ nlw}(555) \times I_{510}^{3.8}) \cdot 0.001,$$

$$\text{где } I_{510} = \text{nlw}(555)/\text{nlw}(510)$$

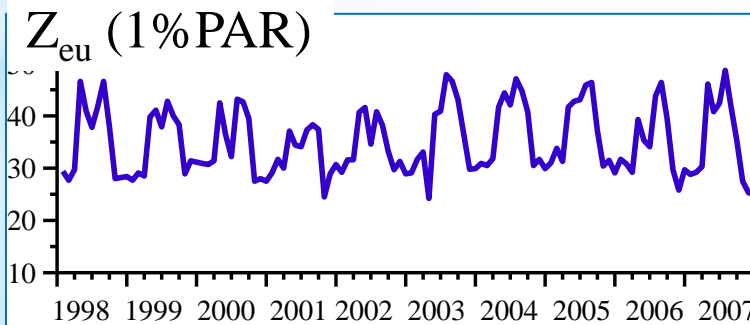
# Модель ФАР - $E_d(\lambda)$

Глубина зоны фотосинтеза -  $Z_{eu}$  (1% PAR)

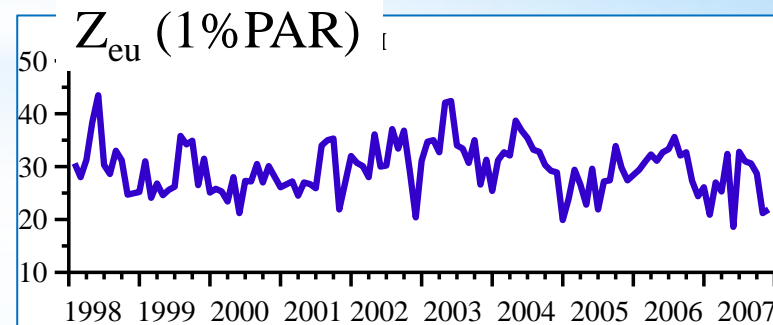
Валидация



Глуководная часть



Северо-западный шельф



# Спектральная модель первичной продукции

адаптация моделей (*Morel, 1991, Wozniak et al., 2007*) на основе  
биооптических показателей вод и  
фотофизиологических характеристик фитопланктона  
Черного моря

**Спектральный** подход к оценке первичной продукции в столбе воды **учитывает**

(а) **изменение спектрального состава света по глубине и**

(б) спектральные **особенности** поглощения света пигментами **фитопланктона**,  
что позволяет точно оценивать количество квантов света, поглощенных  
фитопланктоном, используемых в фотохимических реакциях с определенной  
эффективностью, которая оценивается **квантовым выходом фотосинтеза**

$$PP(z) = 12000 \times \phi(z) \times PUR(z) \quad (\text{мгС сут}^{-1} \text{ м}^{-3})$$

где  $\phi(z)$  - квантовый выход фотосинтеза ( $\text{МольС } (\text{Э})^{-1}$ ),

12000 – константа для перехода от молей к мг углерода

$$\text{а) } PUR(z) = \int E_d(z, \lambda) \times a_{ph}(z, \lambda) d\lambda, \quad (\text{Э сут}^{-1} \text{ м}^{-3})$$

$PUR(z)$  – поглощенные фитопланктоном кванты энергии

# Квантовый выход фотосинтеза

модификация модели  
(Wozniak et al., 2007)

на основе фотофизиологических  
характеристик фитопланктона  
Черного моря

$$\phi = \phi_m \times f(E, T) \times f(NPP) \times f(N) \times f(PAR_{inh})$$

где  $f(E, T)$ ;  $f(NPP)$ ;  $f(N)$ ;  $f(PAR_{inh})$  - факторы  
влияния света и температуры; доли  
фотопротекторных пигментов; биогенной  
обеспеченности; фотодеструкции РЦ,

$$f(E, T) = [1 - \exp(-PUR^*_{psp} / KPUR^*_{psp}(T))] \times KPUR^*_{psp}(T) / PUR^*_{psp}$$

$f(E, T)$  – 80% изменчивости  $\phi$

# Полу-эмпирическая спектральная модель ПП

## Спутниковые данные

$nlw(\lambda_1), nlw(\lambda_2),$   
 $nlw(\lambda_3)$

PAR  
 $Ed(0)$

SST(0)

Модель  $X_l(0m)$

$X_l(0m) - C_0$

Модель вертикального  
профиля  $X_l: C(z)=f(C_0, \text{сезон})$

Вертикальное распределение  $X_l$   
 $C(z)$

Спектральная модель света  
 $Ed(\lambda)=f(E_0, a(\lambda), bb(\lambda))$

Проникающая в море радиация  
 $Kd(\lambda, z); Ed(\lambda, z)$

Поглощенная энергия  
 $PUR(z)=f(Ed(\lambda, z), a_{ph}(\lambda, z))$

Поглощенная фитопланктоном энергия  
 $PUR(z)$

Квантовый выход фотосинтеза  
 $\phi(z)=f(E, T, PUR^*(z))$

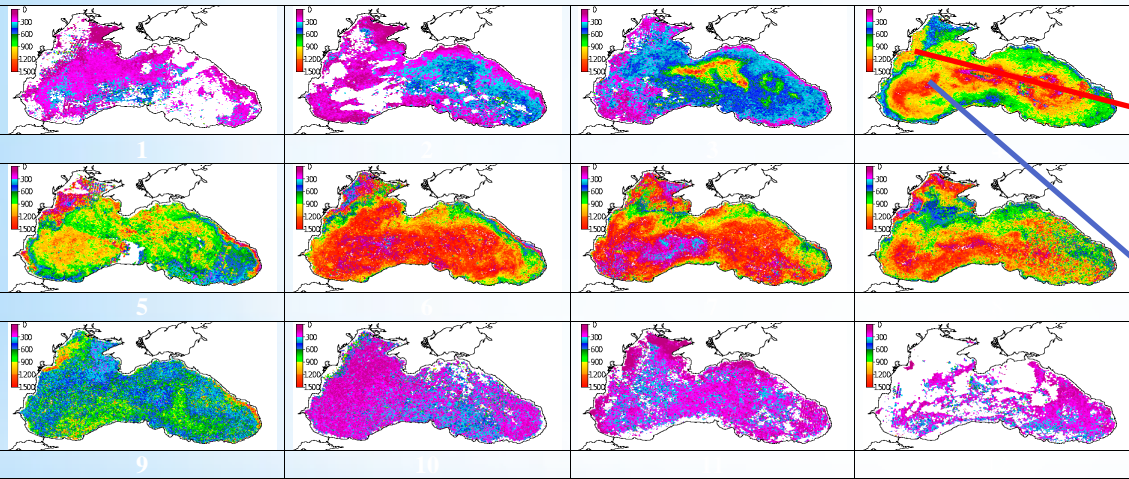
Квантовый выход  
 $\phi(z)$

Первичная продукция  
 $PP(z)=f(PUR(z), f(z))$

Первичная продукция  
 $PP(z)$



# Первичная продукция в Черном море



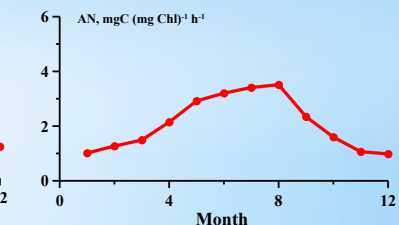
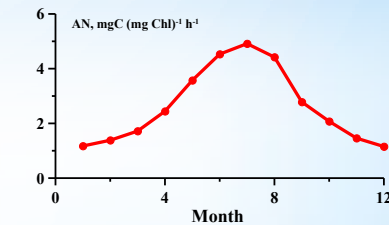
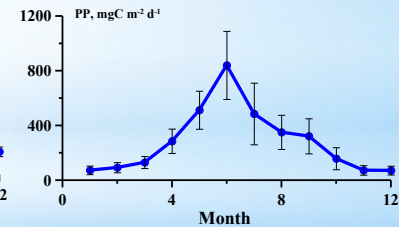
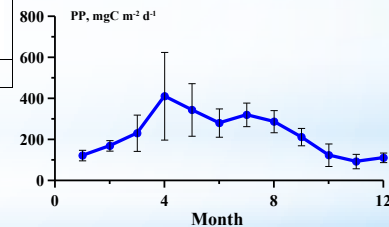
Среднегодушная  
величина **PP** ( $\text{мгС м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ )  
и ассимиляционное число  
**AN** ( $\text{мгС мгХл}^{-1} \text{ч}^{-1}$ )

Глуководный  
район

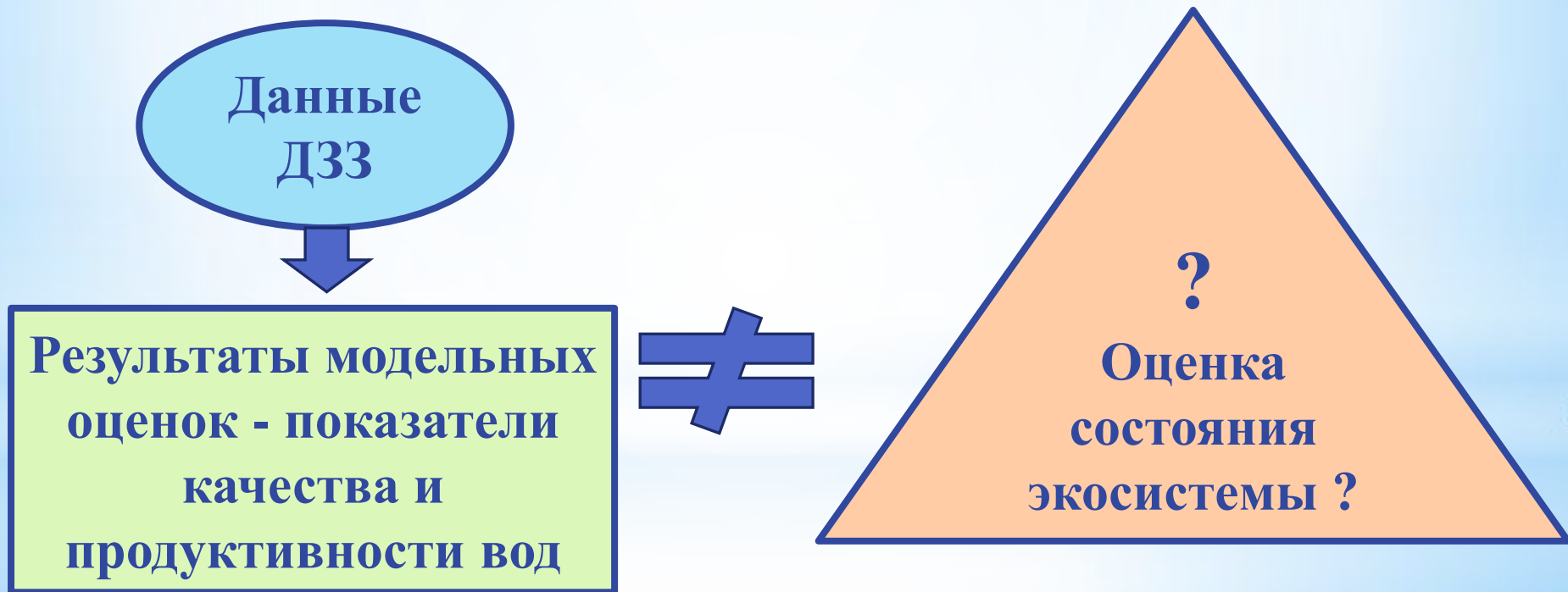
Придунайские  
воды

2

Среднемесячная величина **PP**  
( $\text{мгС м}^{-2} \text{сут}^{-1}$ ) в 2007г.



# Методология использования данных ДДЗ для оценки и прогнозирования **СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ**



# Методология использования данных дистанционного зондирования для целей экологического мониторинга

Многоспектральные сканеры восходящего излучения  
(в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра)

Продукты дистанционного зондирования

Модели I уровня

Биооптические свойства вод региона

Физиология водорослей

Модели II уровня

Хл а

РОВ

ВОВ

Модели III уровня

Первичная продукция

Световые условия в среде

Скорости роста

Методология оценки состояния водной среды

Биомасса

Программный продукт

Индикаторы состояния экосистемы

Профильные министерства, ведомства, надзорные природоохранные органы и т.д.

# Благодарю за внимание

НИС «Профессор Водяницкий»



Фото Гавриловой Н.

