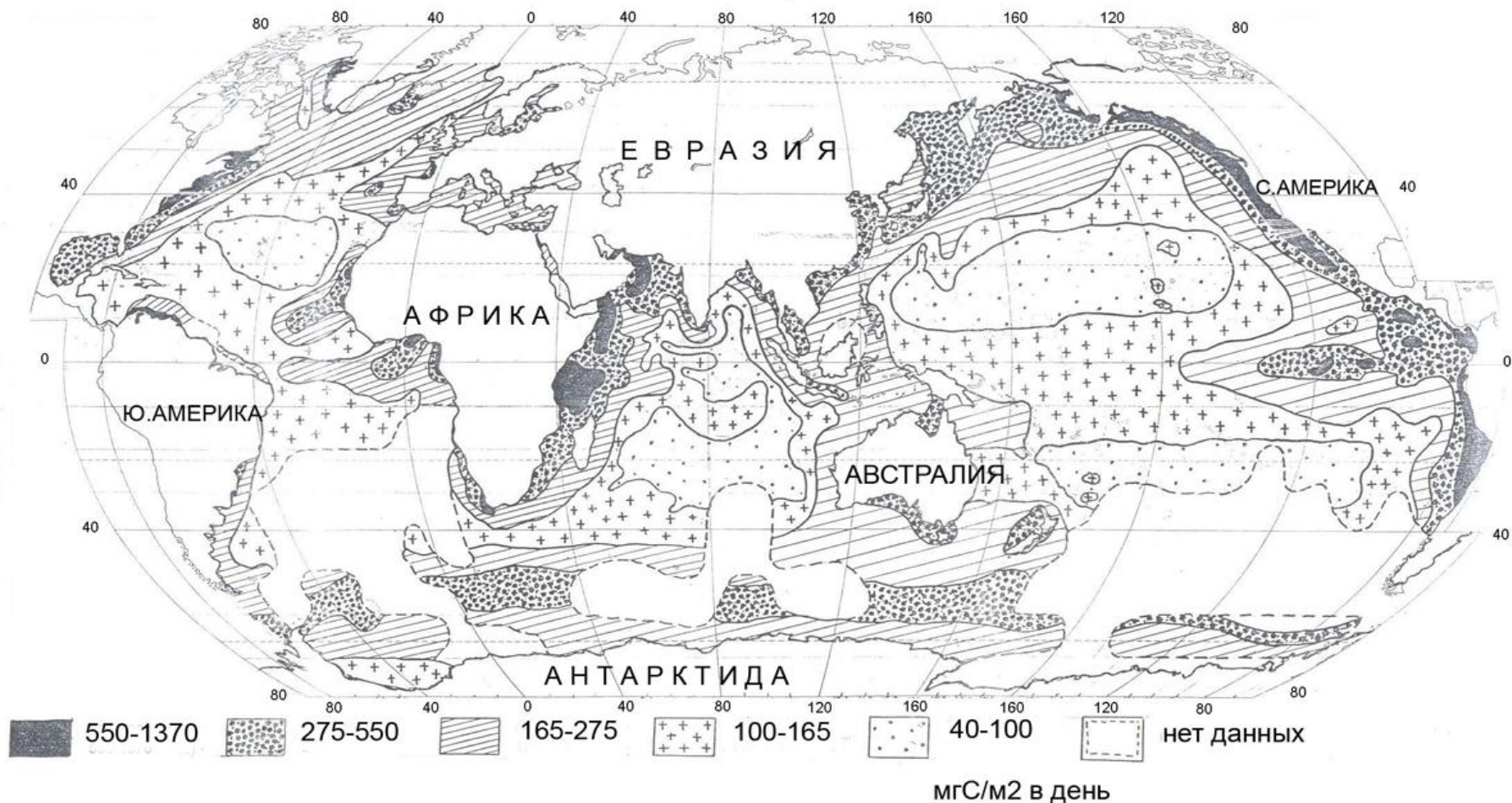


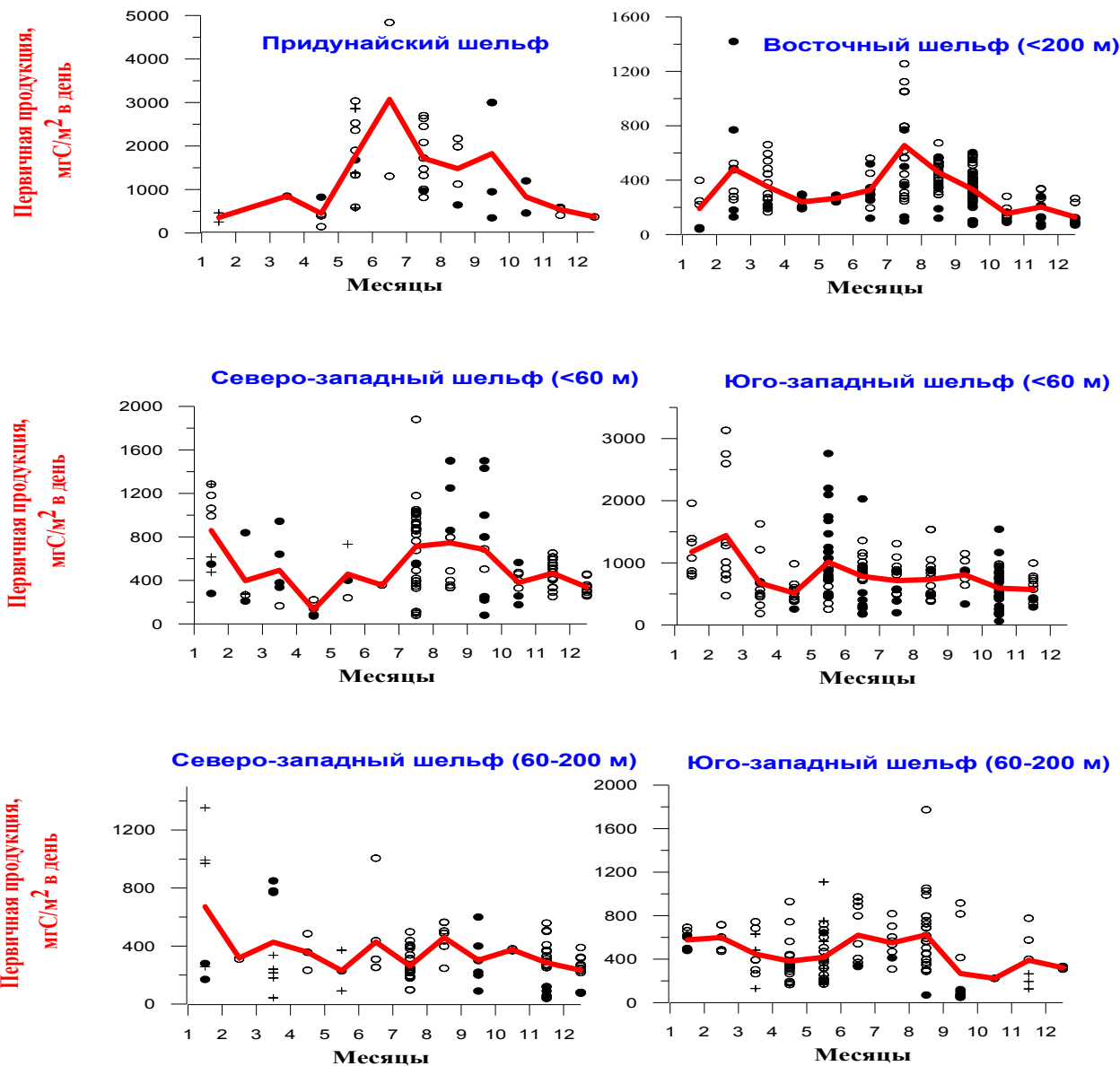
# Оценка первичной продукции в морских экосистемах

1. История оценок первичной продукции Мирового океана в доспутниковую эру.
2. Современные модели оценки первичной продукции Мирового океана по спутниковым данным.
3. Величины первичной продукции Мирового океана по современным представлениям.
4. Трудности оценок и источники ошибок.
5. Перспективы совершенствования представлений о величине первичной продукции Мирового океана.
6. Разработка региональных алгоритмов расчета первичной продукции на примере Карского моря.

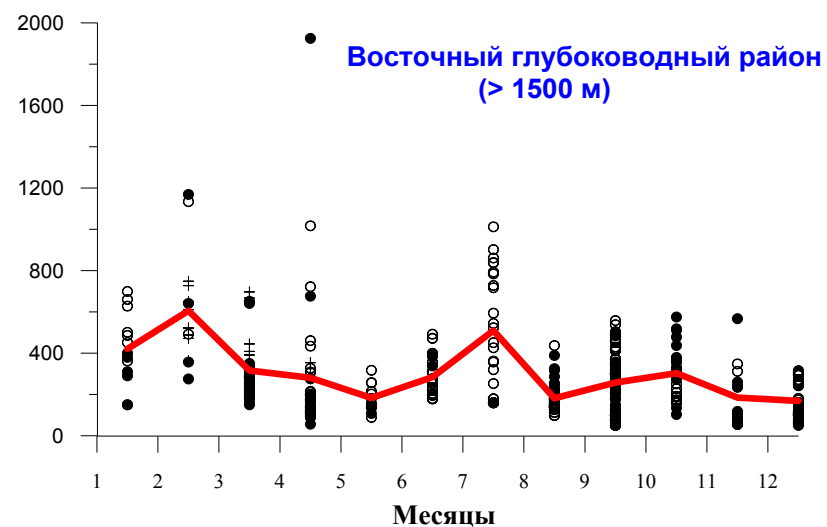
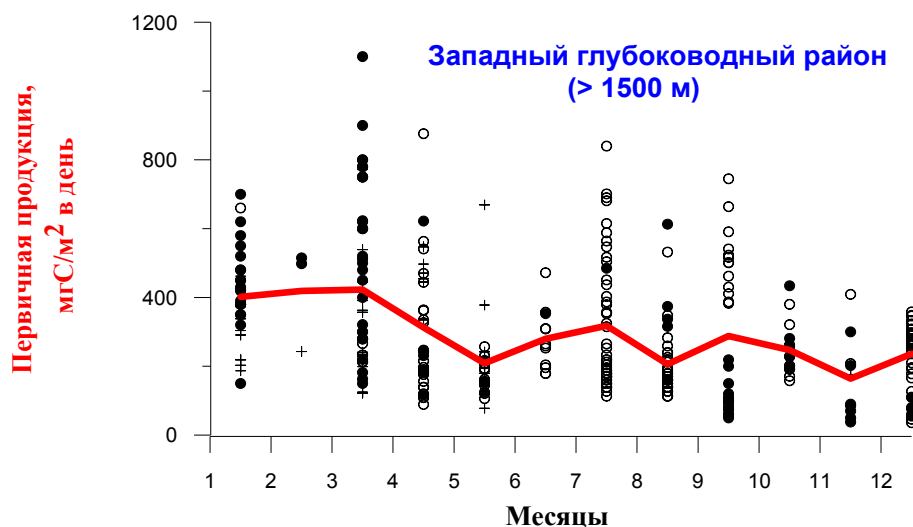
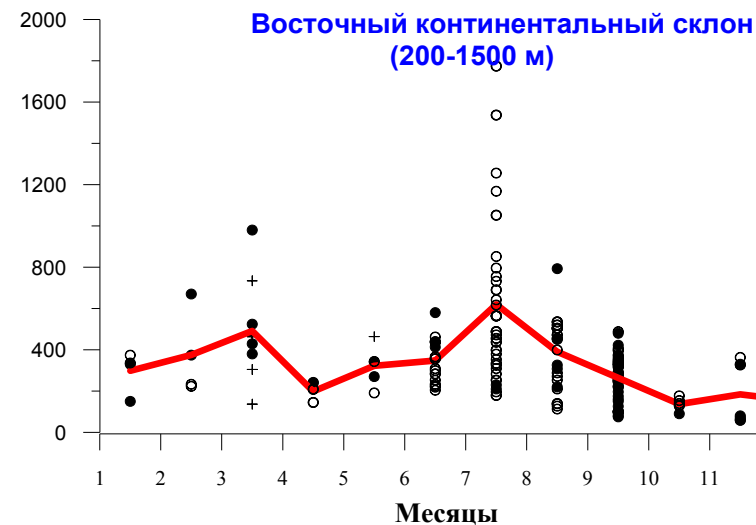
# Среднегодовая первичная продукция Мирового океана (Berger, 1989)



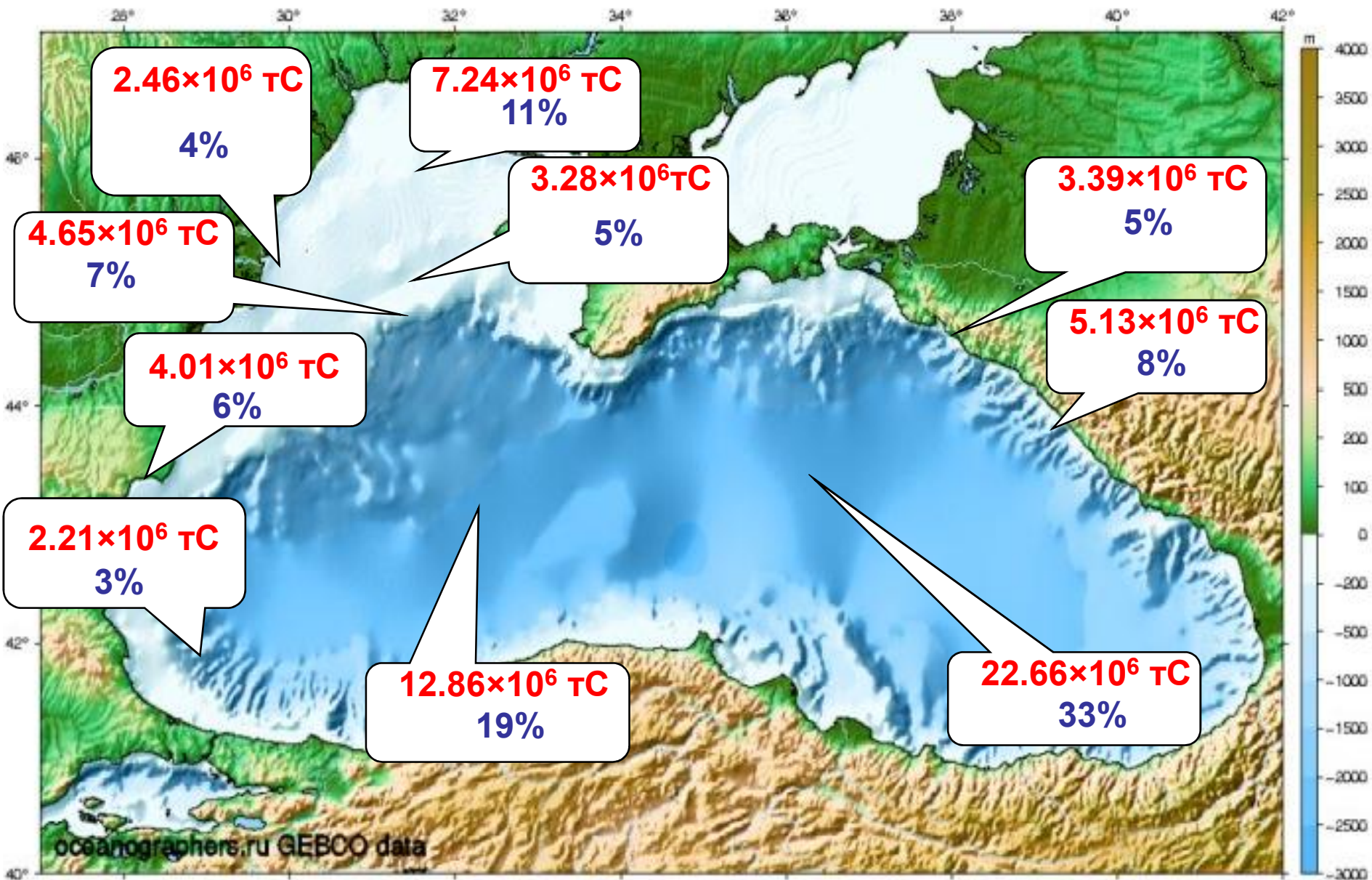
# Сезонные изменения первичной продукции в столбе воды на шельфе Черного моря

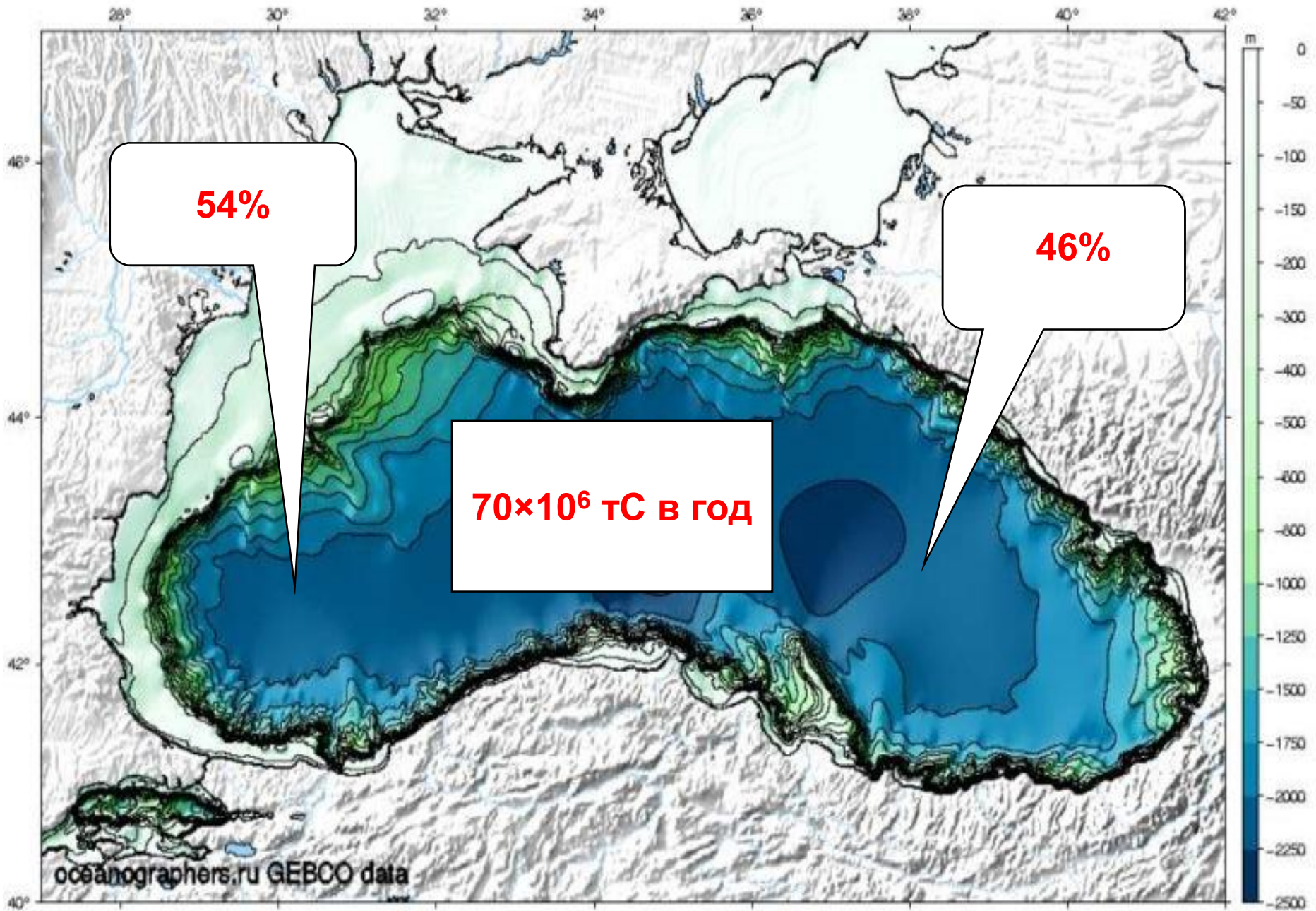


# Сезонные изменения первичной продукции над континентальным склоном и в глубоководных районах Черного моря



# Годовая первичная продукция Черного моря





# Эволюция величины первичной продукции Мирового океана

По мере накопления новых данных и совершенствования методов

**От** 20 – 25 x 10<sup>9</sup> т С в год (Steemann Nielsen, Jensen, 1957;

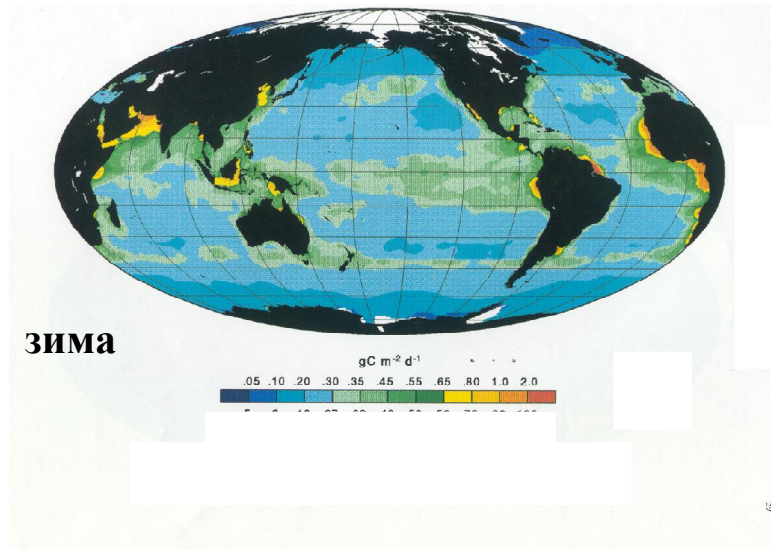
Кобленц-Мишке и др., 1968; Ryther, 1969)

**До** 55 – 65 x 10<sup>9</sup> т С в год (Виноградов, Шушкина, 1987)

или даже до 70 – 90 x 10<sup>9</sup> т С в год (Сорокин, 1973, 1975)



# Первичная продукция фитопланктона в разные сезоны (Antoine et al., 1996)



весна

лето

осень

# Преимущества и трудности использования спутниковой информации

Несомненное достоинство – пространственно-временной охват

Долговременную изменчивость продукционных характеристик фитопланктона на современном уровне невозможно оценить без спутниковых данных

Без спутниковой информации невозможно провести оценку глобальной величины первичной продукции

Для оценки первичной продукции приходится использовать среднемесячные величины, как наиболее репрезентативные

Это приводит к недооценке первичной продукции из-за отсутствия данных, недоступных из-за облачности, в наиболее продуктивный период месяца

Необходимость разработки моделей оценки как хлорофилла, так и первичной продукции

## Некоторые источники ошибок оценки первичной продукции

### Ошибки, связанные с использованием спутниковой информации

Недооценка из-за пропуска периодов повышенной продуктивности (напр.: «цветение» фитопланктона, кратковременное увеличение продукции во время прохождения циклонов и др.)

Трудности определения особенностей вертикального распределения фитопланктона

Несовершенство алгоритмов расчета содержания хлорофилла и биомассы фитопланктона

Недостаток данных для разработки региональных алгоритмов расчета биооптических показателей

### Ошибки, связанные с несовершенством моделей расчета первичной продукции

Недостаток экспериментальных данных для понимания закономерностей формирования первичной продукции в океане (напр.: связь параметров адаптации: ассимиляционного числа, отношения хлорофилл/углерод фитопланктона с абиотическими и биотическими факторами среды)

Ограниченность базы данных об особенностях вертикального распределения хлорофилла и удельного содержания хлорофилла в клетках фитопланктона

Отсутствие региональных моделей расчета первичной продукции

# Классификации моделей первичной продукции

По принципу использования входящих параметров модели (хлорофилл, входящая радиация) – 4 типа (Carr et al., 2006):

- 1. Интегрированные по глубине и длинам волн (WIDI – wavelength- and depth-integrated)
- 2. С вертикальным разрешением по глубине и интегрированные по длинам волн (WIDR – wavelength-integrated and depth-resolved)
- 3. С вертикальным разрешением как по глубине, так и по длинам волн (WRDR – wavelength- and depth-resolved)
- 4. Модели, использующие расчеты глобальной циркуляции (GCM-based models)
- В настоящее время существует более 30-ти моделей расчета первичной продукции, использующихся для оценки ее годовой величины

По основному биотическому компоненту, из которого рассчитывается первичная продукция (Behrenfeld, Falkowski, 1997; Behrenfeld et al., 2005):

Хлорофилл (Chl-based models)

$$\Sigma PP = Chl_0 \times Z_{eu} \times AN_{max} \times DL \times f(E_0)$$

Углерод (C-based models)

$$\Sigma PP = C \times \mu \times Z_{eu} \times f(E_0), \text{ где}$$

$\Sigma PP$  – первичная продукция в столбе воды;

$Chl_0$  – концентрация хлорофилла «а» на поверхности;

$AN_{max}$  – максимальная удельная скорость фотосинтеза (ассимиляционное число);

$C$  – биомасса фитопланктона;

$\mu$  - скорость роста фитопланктона;

$DL$  – длительность светового дня;

$Z_{eu}$  – толщина эвфотического слоя (1%  $E_0$ );

$f(E_0)$  – параметр фотоадаптации

# **Классификация по характеру использования света при фотосинтезе**

## **Входящие параметры по солнечной радиации**

- 1. Данные по приходящей ФАР**
- 2. Данные по поглощенной ФАР**
- 3. Данные по спектральному составу света**

# Спутниковые данные для модельных расчетов первичной продукции

## Для Chl-based models

- Концентрация хлорофилла на поверхности
- Приходящая фотосинтетически активная солнечная радиация
- Поверхностная температура ( $T_0$ ) для расчета  $AN_{\max}$  и  $\mu$ :

$$AN_{\max} = 0.118 \times T_0 + 1.25 \text{ (Megard, 1972)}$$

$$\mu = 10^{0.0275 \times T_0 - 0.07} \text{ (Erppley, 1972)}$$

- Глубина эвфотического слоя

## Для C-based models

- Коэффициент обратного рассеивания ( $b_{br}$ ) для расчета биомассы фитопланктона:

$b_{br}$   РОС (взвешенный орг. углерод)  C/РОС (лит. данные) 

 C фито.

**Годовые величины первичной продукции Мирового океана,  
рассчитанные по разным моделям**

	$\Sigma$ PP (Gt C)	Тип модели
CbPM	52	C-based
VGPM	44	Chl-based, WIDI
<i>Behrenfeld et al., 2005</i>	67	C-based, WIDI
<i>Antoine, Morel, 1996</i>	46	Chl-based, WRDR
<i>Longhurst et al., 1995</i>	50	Chl-based
<i>Moore et al., 2001</i>	48	GCM
<i>Carr et al., 2006</i>	51	Средняя из 31 модели



# Точность оценки первичной продукции Мирового океана

Величина годовой первичной продукции Мирового океана, рассчитанная по разным моделям варьирует от 44 до 67 Gt C

Разница составляет 23 Gt C, что приблизительно равняется годовой первичной продукции Тихого океана

Таким образом, точность оценки составляет  $\pm$  океан

Модельные величины первичной продукции отличаются от измеренных *in situ* в 2 раза в большую или меньшую сторону

Большинство моделей занижает величину первичной продукции

Точность расчета не зависит от сложности или типа модели

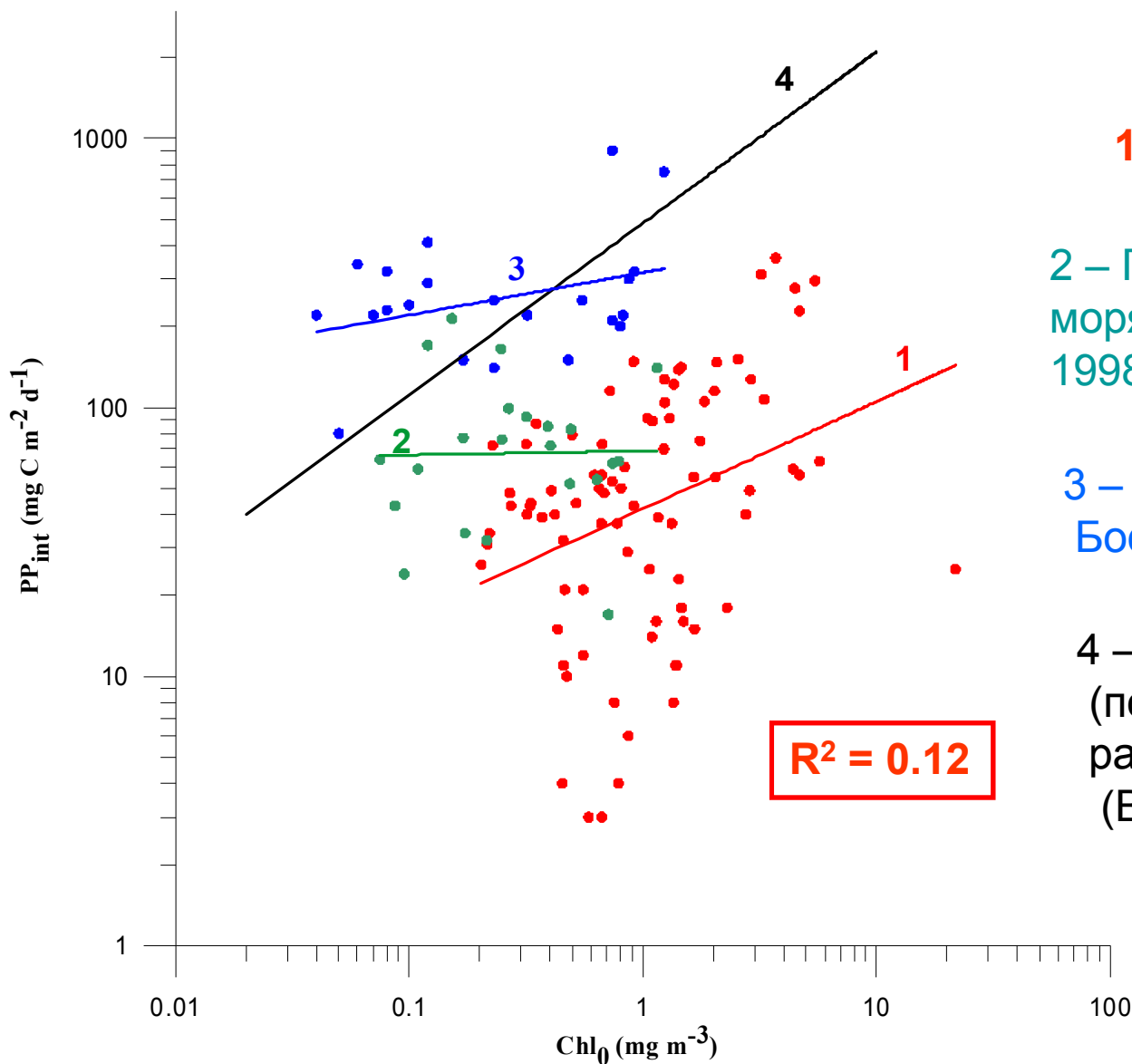
# Первичная продукция в столбе воды в Карском море в сентябре (мгС/м<sup>2</sup> в день)

Регион	Экспедиционные данные	Модельные расчеты		
		Pabi et al., 2008 (средние по Арктическому бассейну)	Ветров, Романкевич, 2011	Arrigo, Van Dijken, 2011 (средние по морю)
Эстуарии	38–145	300	200–1000	280–730
Шельф	69–82	175–300	100–500	
Северные районы (>200 м)	32	150	<100	

**Для эстуариев модельные расчеты выше в 3–7 раз, для шельфа – в 3–4 раза, для северных районов – в 3–5 раз.**

**Модельные расчеты средние по морю выше в 7 раз!**

# Зависимость интегральной первичной продукции от содержания поверхностного хлорофилла



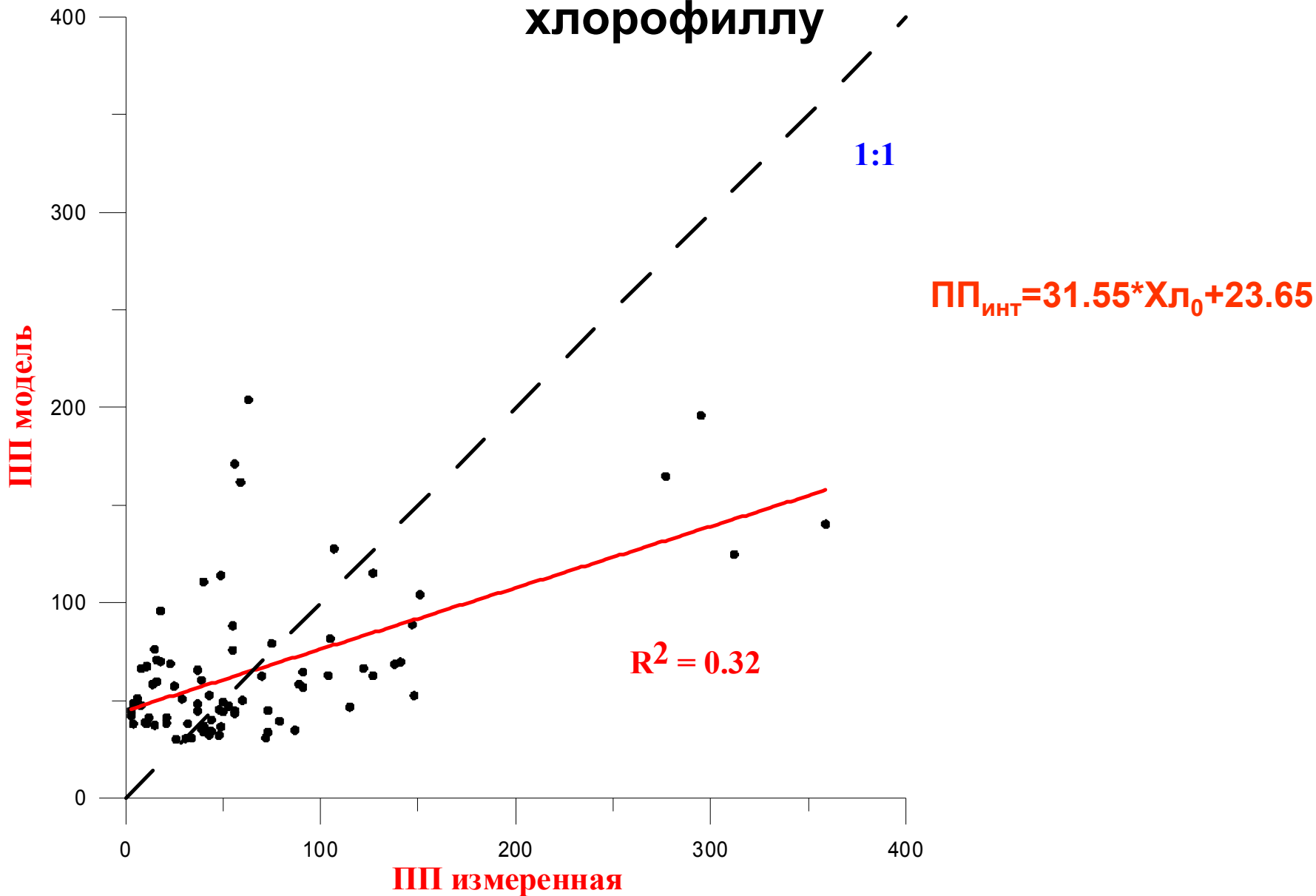
1 – Карское море

2 – Печорское и Баренцево моря (Ведерников, Гагарин, 1998; Ведерников и др., 2001)

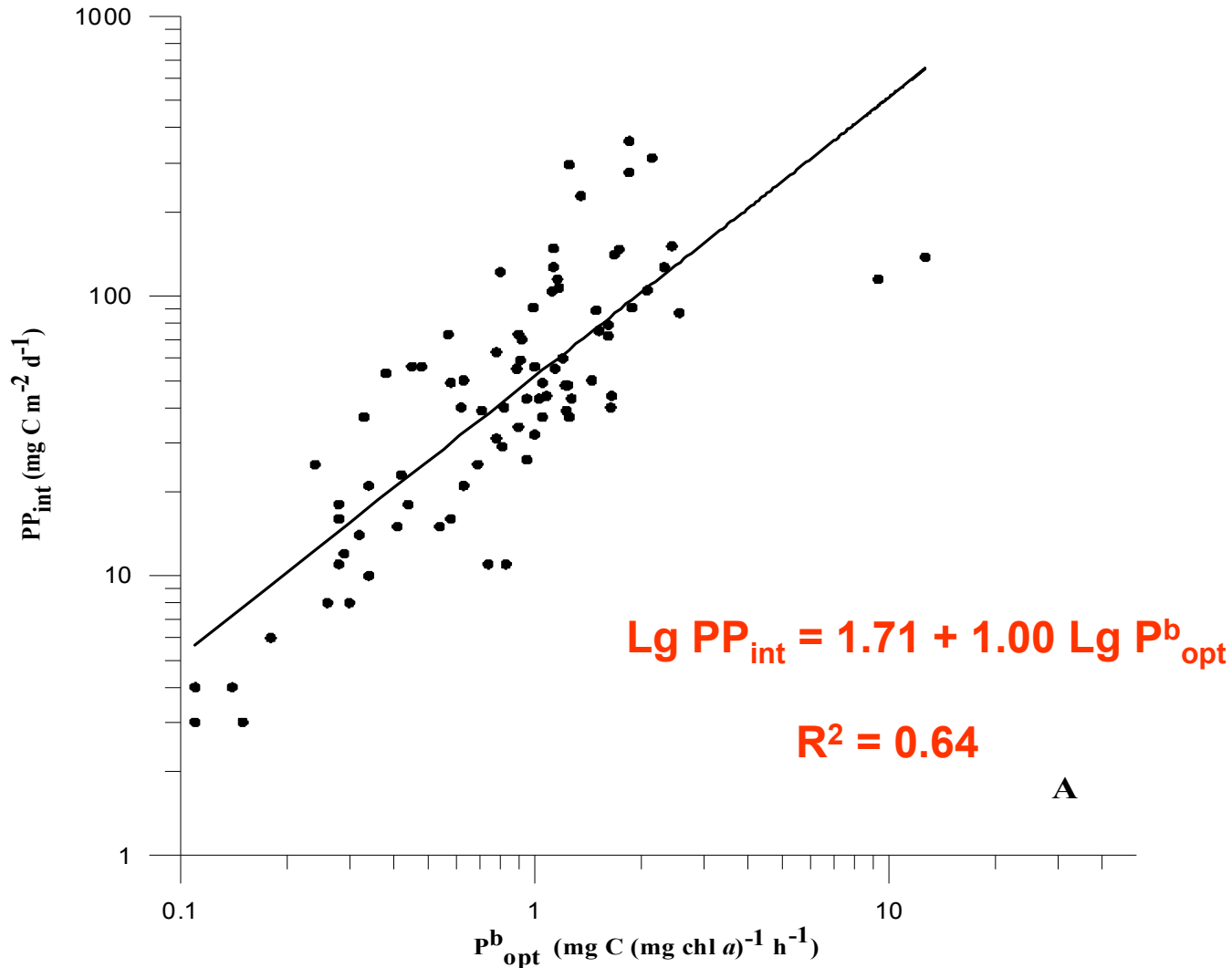
3 – Моря Чукотское и Бофорта (Pabi et al., 2008)

4 – Холодноводные (полярнее  $40^\circ$  широты) районы Мирового океана (Виноградов и др., 1999)

# Регрессионная модель интегральной первичной продукции Карского моря по поверхностному хлорофиллу



# Зависимость первичной продукции в столбе воды от $AЧ_{max}$ в Карском море



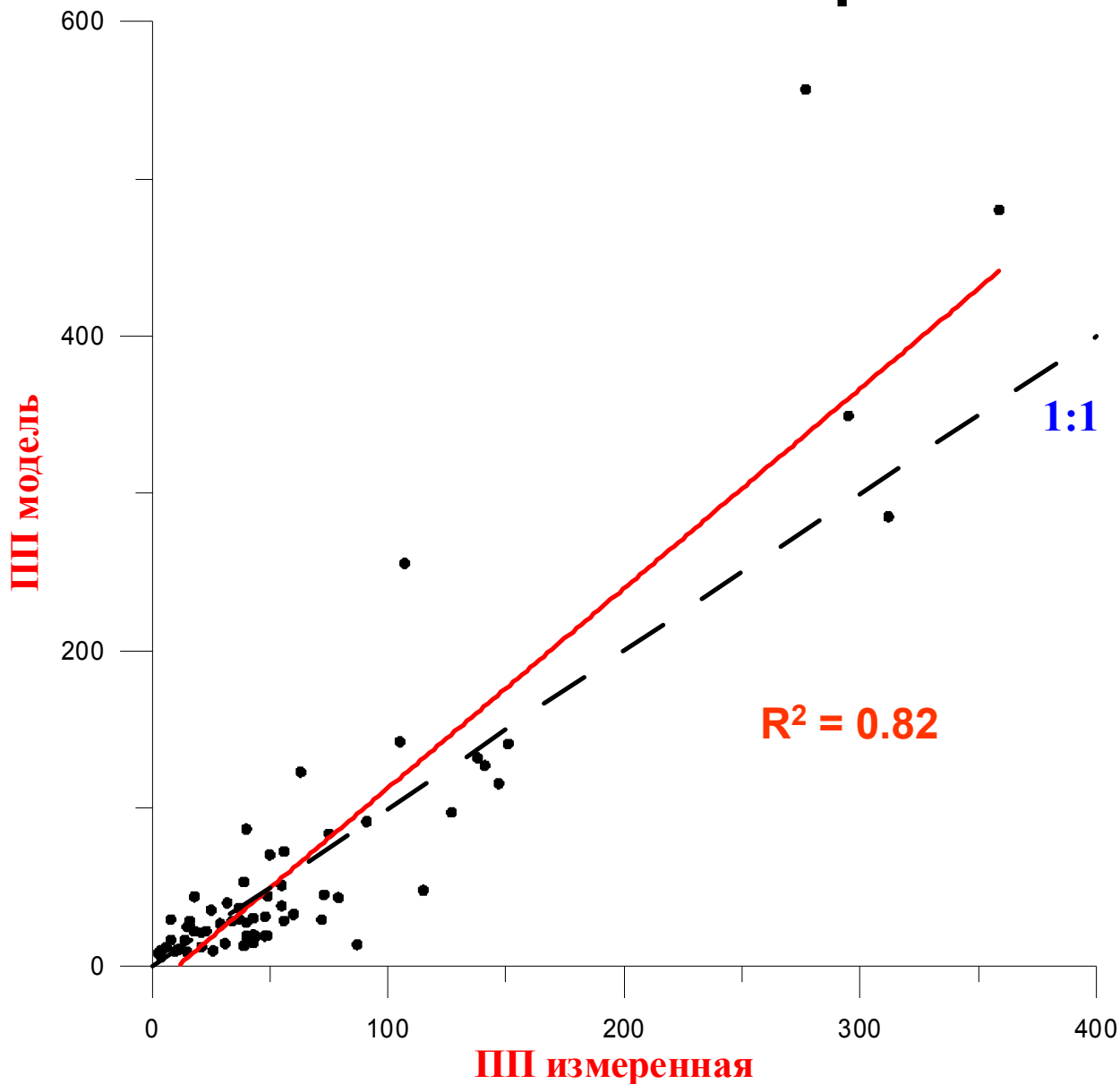
## Малопараметрическая диагностическая модель первичной продукции в столбе воды ( $\psi$ – алгоритм)

- Интегрирована по спектру и глубине (WIDI)
- Входящие параметры – концентрация поверхностного хлорофилла ( $Chl_0$ ) и приходящая солнечная радиация ( $I_0$ ).
- *Расчетная формула  $\Sigma PP = k \times \psi \times Chl_0 \times I_0$ ,*
- где  $\Sigma PP$  – первичная продукция в столбе воды
- $k = Chl_{ph} / Chl_0$
- $\psi$  (индекс продуктивности) – отношение среднего для слоя фотосинтеза суточного ассимиляционного числа (САЧ) и приходящей подповерхностной облученности в диапазоне ФАР ( $I_0$ )
- $\psi = САЧ / I_0$

$\psi$  - эффективность утилизации света фитопланктоном в столбе воды.

$k$  - поправочный коэффициент для  $Chl_0$ . Значения  $\psi$  и  $k$  рассчитаны, как средние величины для массива данных.

# Ψ – алгоритм, адаптированный для Карского моря



$$PP_{\text{ИНТ}} = K * \psi * X_{L_0} * E_0$$

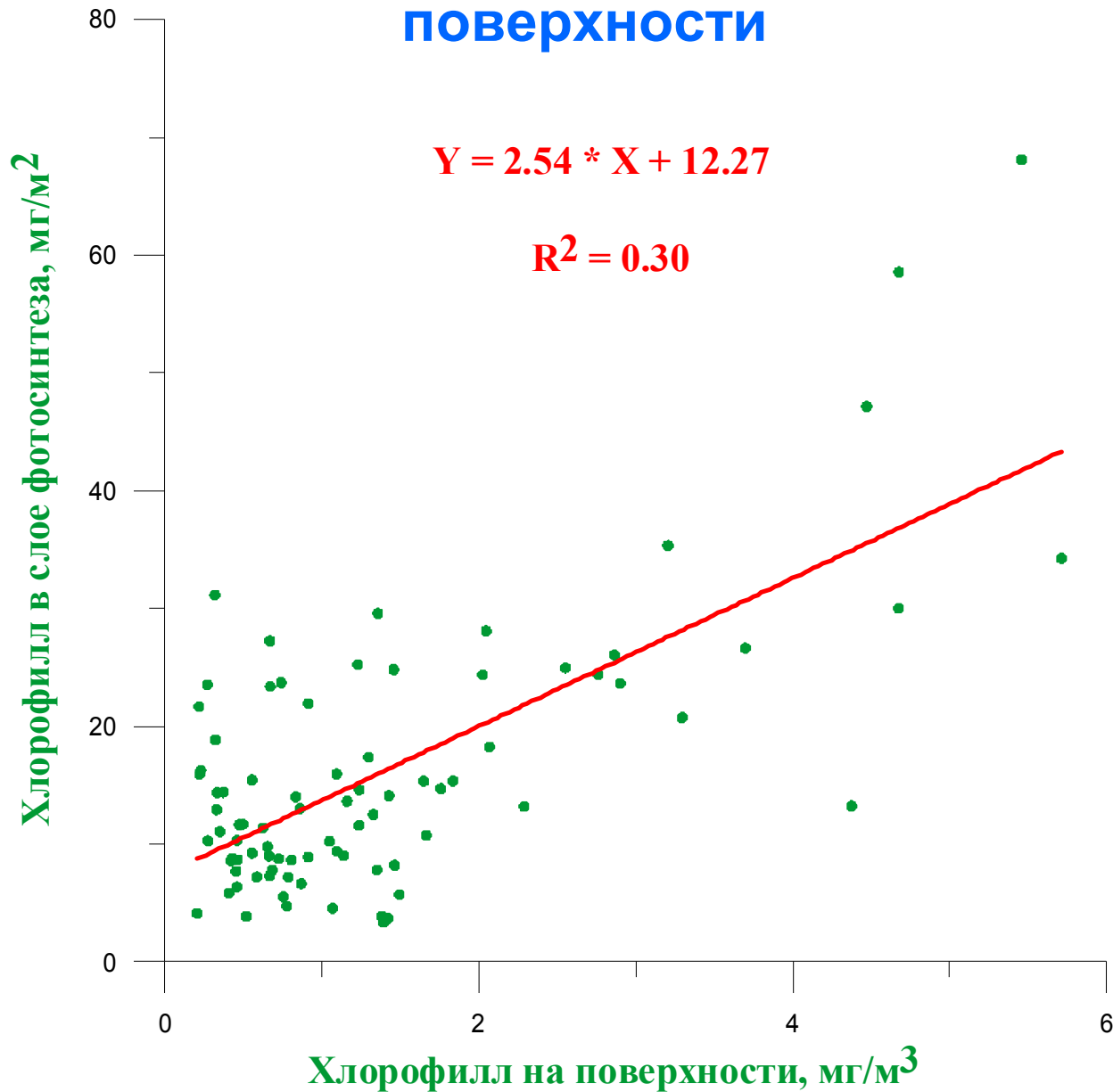


$$PP_{\text{ИНТ}} = 13.51 * 0.61 * X_{L_0} * E_0$$



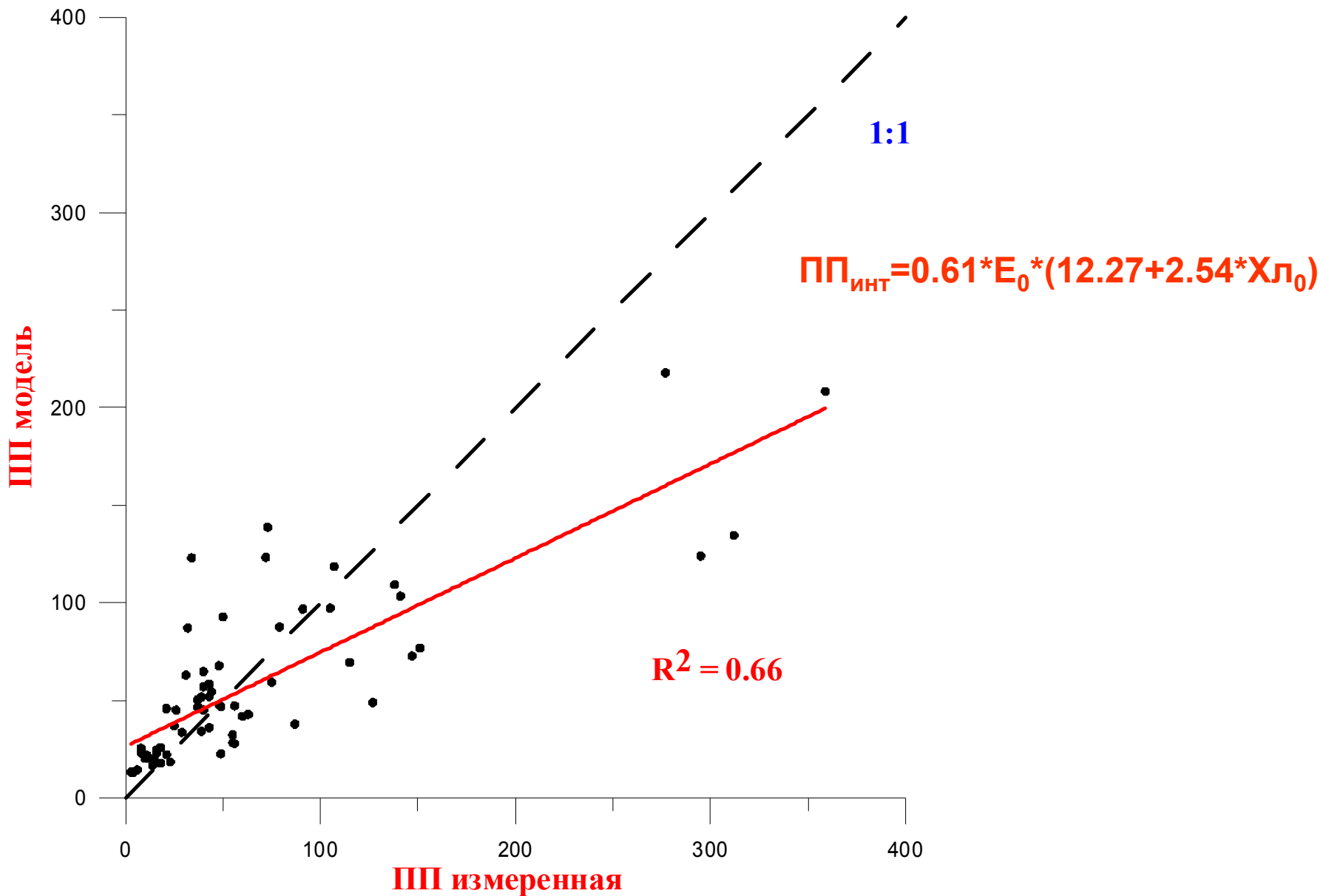
$$PP_{\text{ИНТ}} = 8.23 * X_{L_0} * E_0$$

# Зависимость величин хлорофилла в слое фотосинтеза от содержания хлорофилла на поверхности

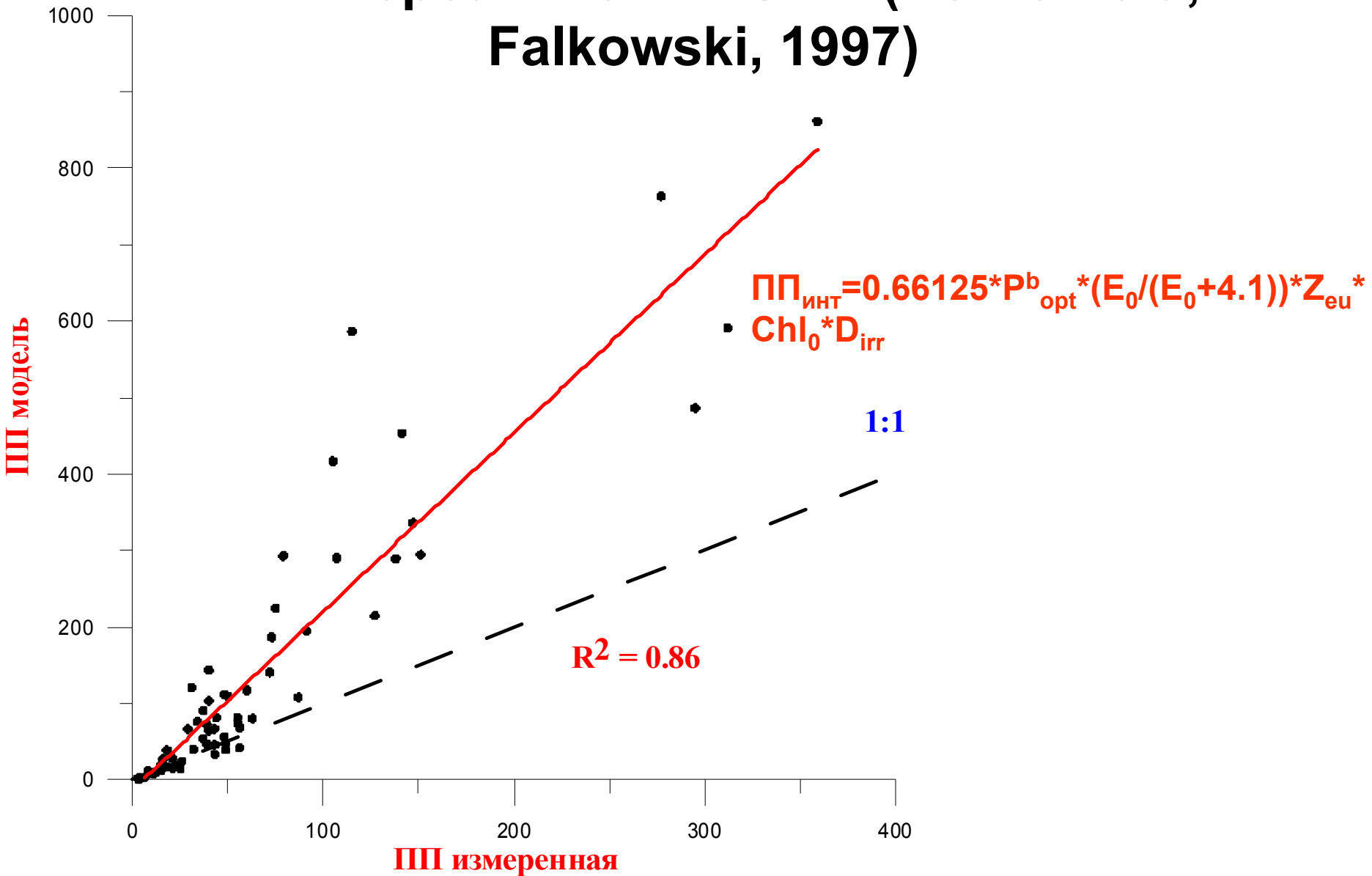




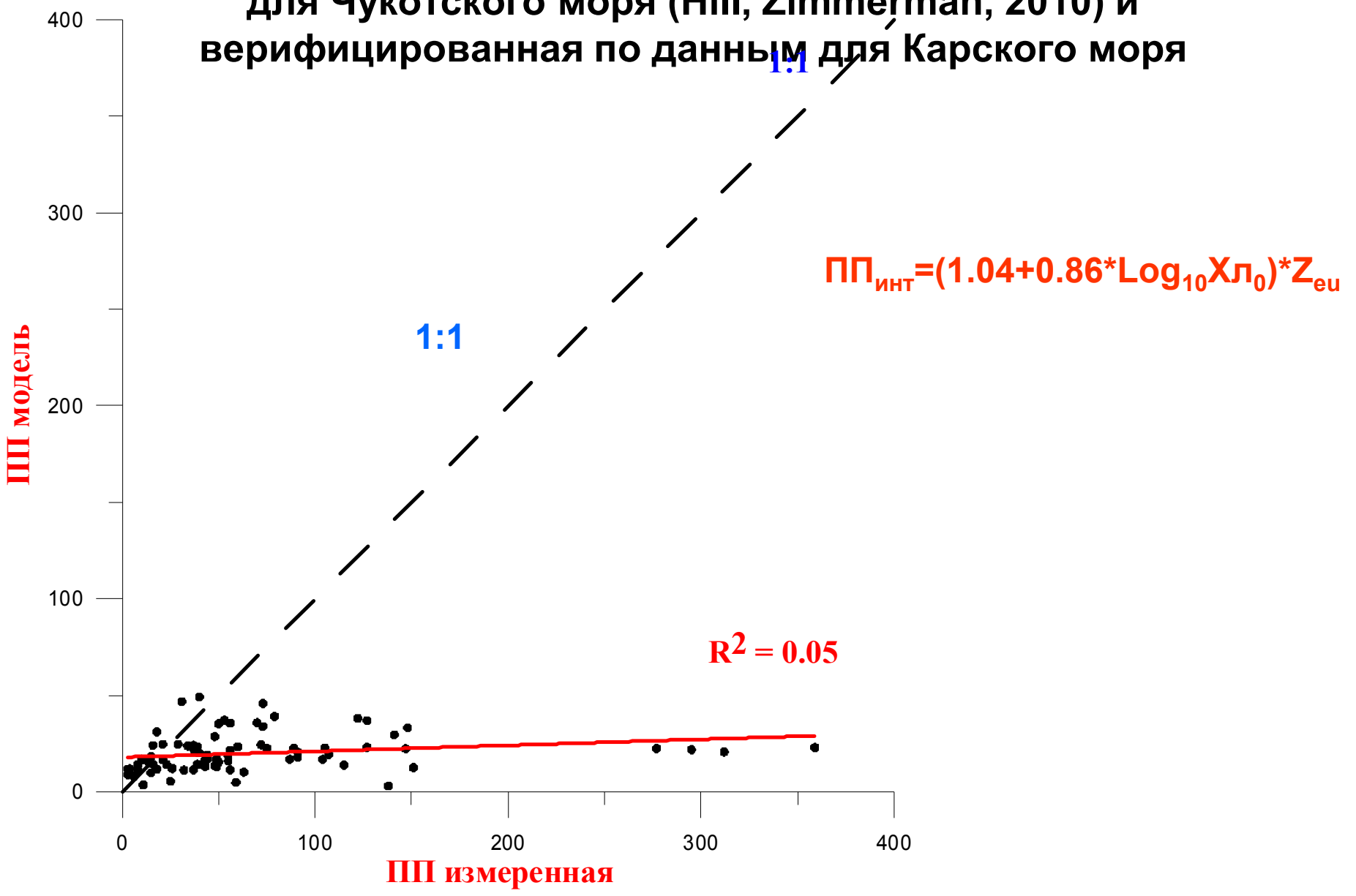
# Ψ-алгоритм с зависимостью $X_{л0}$ - $X_{лфот}$ вместо К



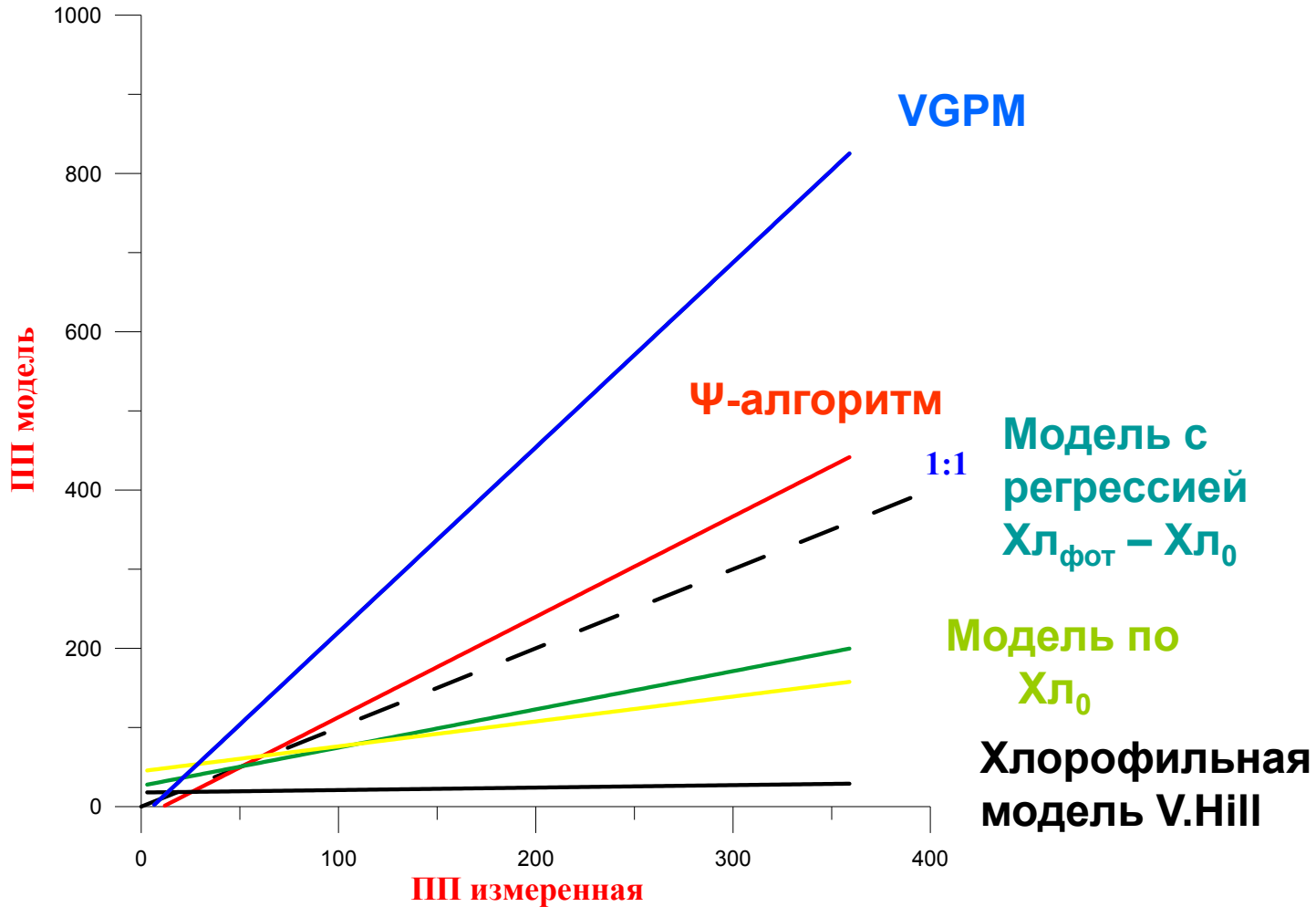
# «Универсальная» VGPM (Behrenfeld, Falkowski, 1997)



# Модель интегральной первичной продукции, разработанная для Чукотского моря (Hill, Zimmerman, 2010) и верифицированная по данным для Карского моря



# Сравнение верификационных линий регрессии различных моделей для Карского моря



# Некоторые параметры эффективности различных моделей применительно для Карского моря

Модель	RMSD	ME	R <sup>2</sup>	b	a
<b>Адаптированные для Карского моря модели</b>					
<b>Ψ-алгоритм</b>	<b>0.27</b>	<b>0.67</b>	<b>0.82</b>	<b>1.24</b>	<b>-13.59</b>
Ψ+регрессия X <sub>л0</sub> -X <sub>лфот</sub>	0.27	0.67	0.66	0.48	26.32
X <sub>л0</sub> -ПП <sub>инт</sub>	0.49	0.05	0.32	0.32	44.75
<b>«Универсальные модели»</b>					
VGPM (Behrenfeld, Falkowski, 1997)	0.30	0.60	0.86	2.33	-13.01
Chl-model для Чукотского моря (Hill, Zimmerman, 2010)	0.63	-0.56	0.05	0.03	17.86

## **Совершенствование моделей - два пути:**

**Улучшение качества входящих параметров и коэффициентов, основанных на совершенствовании знаний экологии и физиологии фитопланктона.**

**Усложнение формул расчетных алгоритмов за счет увеличения входящих параметров.**

# Выводы

**Количественные оценки первичной продукции мало изменились при использовании спутниковой информации по сравнению с доспутниковой эрой**

**Оценки первичной продукции Мирового океана неточны**

## **Пути совершенствования оценок первичной продукции**

**Увеличение количества натуральных измерений скорости фотосинтеза параллельно с абиотическими и биотическими факторами среды**

**Расширение баз данных по физиологическим показателям фитопланктонных сообществ (напр.: параметры световых кривых фотосинтеза, эффективность фотосинтеза, коэффициент поглощения света пигментной системой, удельное содержание хлорофилла в клетках)**

**Разработка региональных алгоритмов расчета хлорофилла и первичной продукции**



*СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ*