

**Разработка и использование региональных
алгоритмов для расчета биооптических
характеристик морей России по данным
спутниковых сканеров цвета**

Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В.

**Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, Москва 117997,
e-mail: oleg@sio.rssi.ru; тел. (095) 124-7583.**

Биоптические параметры, определяемые по данным сканера цвета

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости водной толщи	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя
Оптическая толщина атмосферного аэрозоля	Характеризует содержание аэрозоля в атмосфере, влияет на пропускание солнечной и уходящей радиации, микрофизику облаков.
Концентрация хлорофилла	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для расчета первичной биопродукции
Показатель диффузного ослабления подводной облученности	Ключевая характеристика для расчета светового режима в водной толще, альбедо океана и объемного поглощения солнечного излучения в поверхностном слое
Показатель поглощения окрашенного органического вещества	Определяет поглощение света в воде; характеризует содержание окрашенной органики и качество воды в прибрежной зоне; один из параметров мониторинга
Показатель рассеяния назад взвешенными частицами	Определяет альбедо водной толщи; характеризует содержание взвеси в воде; один из параметров мониторинга

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
SeaWiFS	15.8	9.4	4.9	4.6	11.1	0.78	4.38
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
SeaWiFS	28.2	22.6	6.1	20.9	1.34	1.85	4.6

Два главных этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

1. Атмосферная коррекция – определение спектральных значений яркости $L_w(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости $L_r(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком:

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

где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;

$L_g(\lambda_i)$ и $L_{wc}(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной; $T(\lambda_i)$ и $t(\lambda_i)$ – направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

$L_w(\lambda_i)$ – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_w(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи.

Атмосферная коррекция

Алгоритм атмосферной коррекции для сканеров цвета SeaWiFS и MODIS далек от совершенства и может давать большие ошибки для коротковолновых спектральных каналов. Неудовлетворительная атмосферная коррекция – на данный момент одно из главных препятствий для успешного использования спутниковых данных о цвете вод в высоких широтах и мутных прибрежных водах.

Два пути решения проблемы:

- Разработка усовершенствованных алгоритмов;
- Использование в биооптических алгоритмах значения $L_w(\lambda_i)$ лишь для тех спектральных каналов, где ошибки атмосферной коррекции минимальны. Для SeaWiFS это каналы 510 и 555 нм, для MODIS - 488, 531, 551 нм.

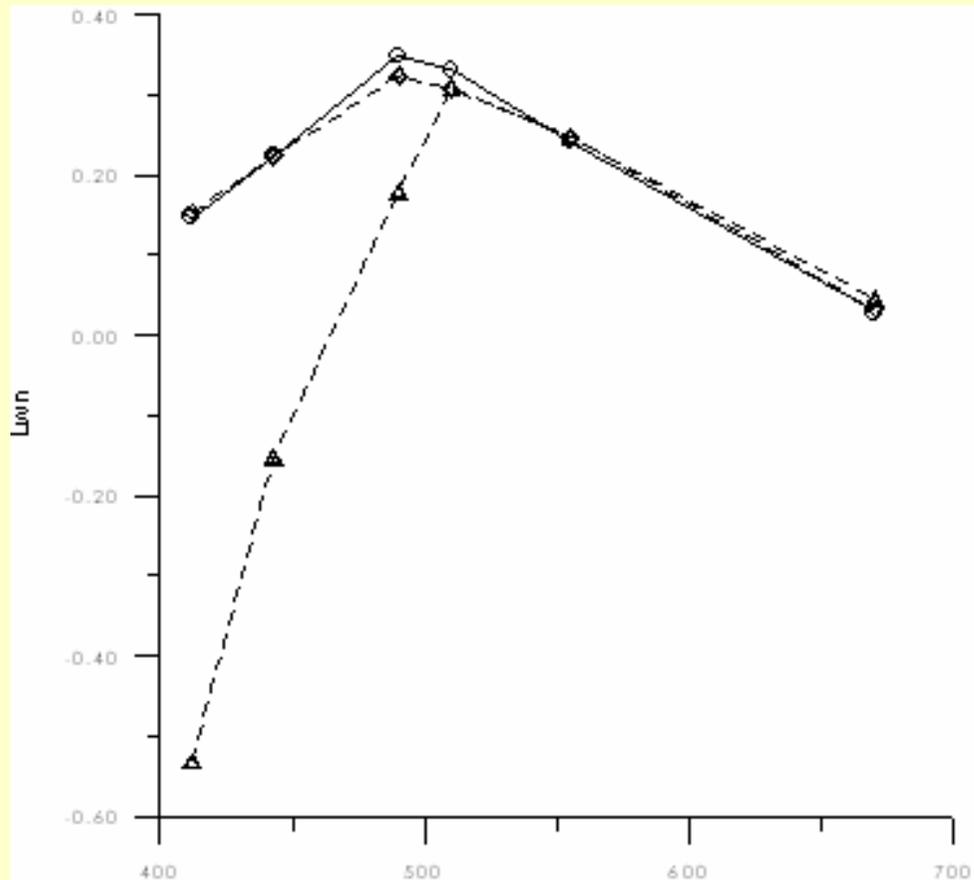
В тех случаях, когда необходимо использовать все спектральные значения $L_w(\lambda_i)$ для видимой области, возможна коррекция ошибок атмосферной коррекции на основе данных натуральных измерений.

Плавающий спектрорадиометр – основной прибор для верификации алгоритмов обработки спутниковых данных при подспутниковых экспериментах



Измеряет абсолютные величины спектральной облученности над поверхностью моря и яркости излучения, выходящего из водной толщи, непосредственно под поверхностью. Измерения проводятся на расстоянии порядка 50 м от судна, чтобы избежать влияния корпуса судна на измерения. Спектральный диапазон - 390-700 нм; спектральное разрешение - 2.5 нм; точность измерений - 5%.

Региональный алгоритм коррекции ошибок атмосферной коррекции для Баренцева моря (Korelevich et al. 2003)



Ст. 1131 в Баренцевом море (69.77N,56.28E):
кружочки – данные измерений *in situ*;
треугольники – атмосферная коррекция
посредством алгоритма SeaWiFS; ромбики –
коррекция ошибок атмосферной коррекции.

Алгоритм основан на данных измерений в Баренцевом море спектрального коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$ посредством плавающего спектрорадиометра.

Для массива измеренных спектров рассчитано разложение по собственным векторам их ковариационной матрицы и построена система функций, позволяющая рассчитывать спектральные значения $L_{wc}(\lambda_i)$ по спутниковым значениям этой величины лишь для двух каналов (у сканера SeaWiFS - 510 и 555 нм).

Усовершенствованный алгоритм атмосферной коррекции ИОРАН

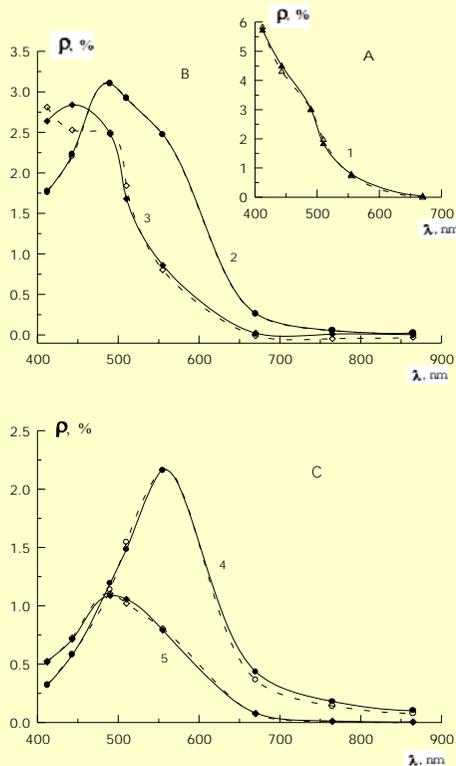
Разработанный в ИОРАН усовершенствованный алгоритм атмосферной коррекции основан на одновременном определении аэрозольного вклада $\rho_a(\lambda_i)$ и искомого спектрального коэффициента яркости моря $\rho_w(\lambda_i)$ по измеренным значениям коэффициента яркости $\rho_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$$\rho_t(\lambda_i) = [\rho_r(\lambda_i) + T(\lambda_i)\rho_g(\lambda_i) + t(\lambda_i)\rho_{wc}(\lambda_i)] + \rho_a(\lambda_i) + t(\lambda_i)\rho_w(\lambda_i)$$

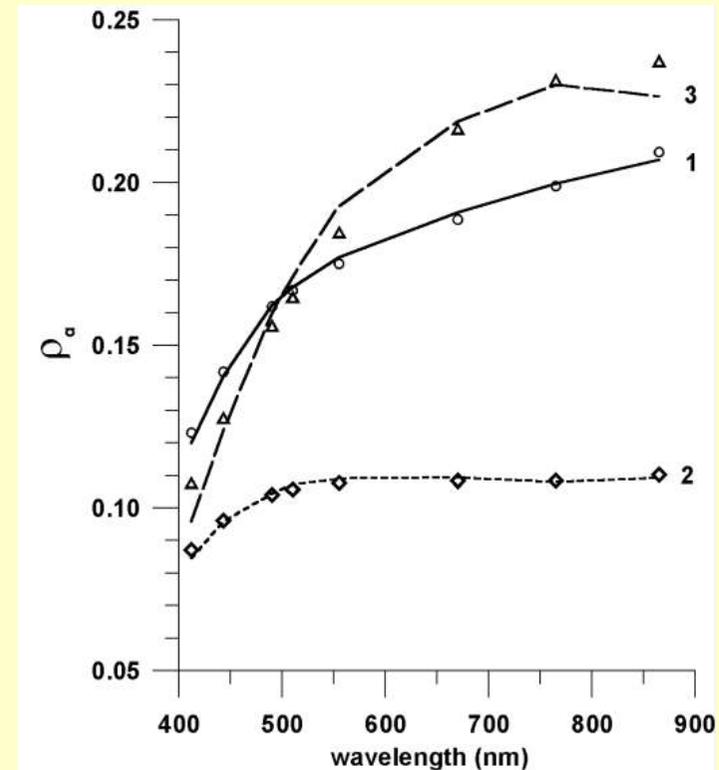
Используется параметризация спектральных функций $\rho_a(\lambda_i)$ и $\rho_w(\lambda_i)$ посредством нескольких базовых функций. Благодаря этому проблема сводится к нахождению нескольких весовых коэффициентов при этих базовых функциях, исходя из наилучшего соответствия измеренных и рассчитанных спектральных значений $\rho_t(\lambda_i)$. В качестве окончательного решения выбирается наиболее вероятное решение, рассчитанное как среднее по всему ансамблю приемлемых решений (Kopelevich et al. 2003, 2005).

Разложение $\rho_w(\lambda)$ и $\rho_a(\lambda)$ по базовым функциям

Разложение $\rho_w(\lambda)$



Разложение $\rho_a(\lambda)$

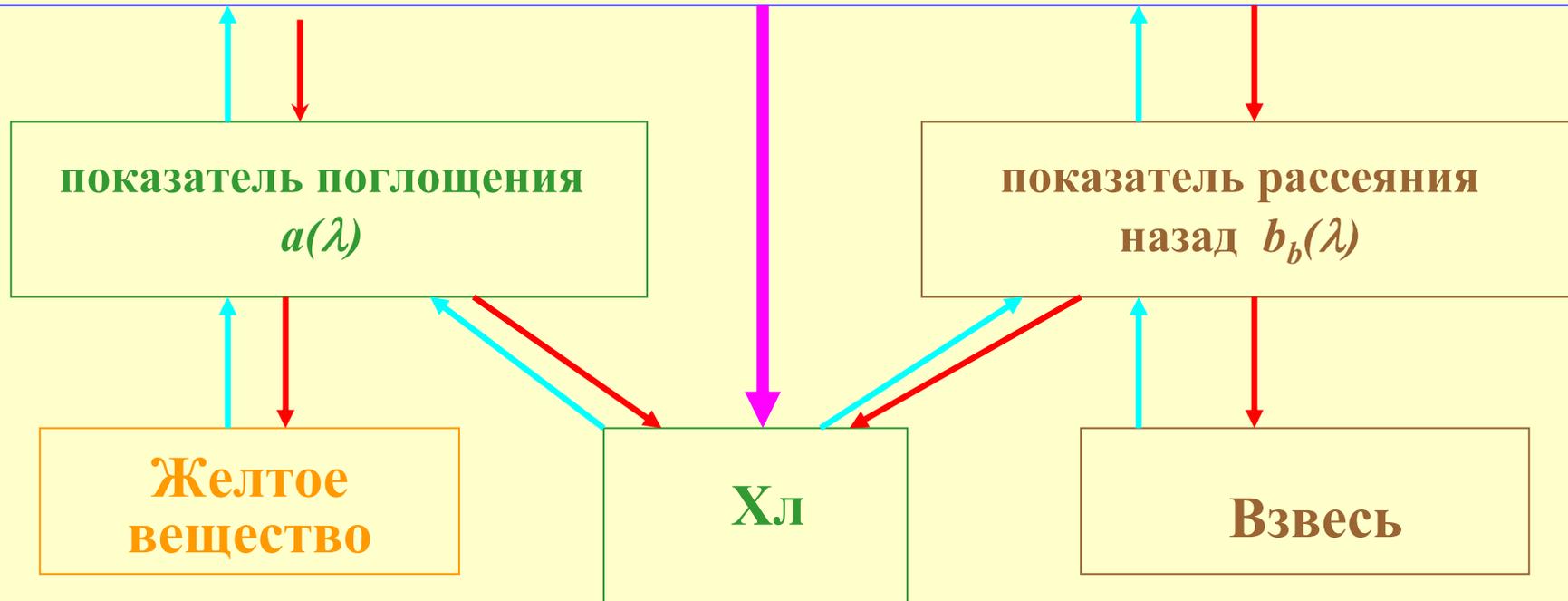


$\rho(\lambda) = c_1 \rho_1(\lambda) + c_2 \rho_2(\lambda) + c_3 \rho_3(\lambda)$,
где $\rho_1(\lambda)$, $\rho_2(\lambda)$, $\rho_3(\lambda)$ – базовые функции, c_1 , c_2 , c_3 – коэффициенты разложения

$\rho_a(\lambda_i) = c_{af} \rho_{af}(\lambda_i) + c_{ac} \rho_{ac}(\lambda_i)$,
где $\rho_{af}(\lambda)$, $\rho_2(\lambda)$, $\rho_{ac}(\lambda)$ – базовые функции, c_{af} , c_{ac} – коэффициенты разложения
(1, $\theta_0=60^\circ$, $\theta=45^\circ$, $\varphi=0^\circ$, 2, $\theta_0=60^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\varphi=90^\circ$;
3, $\theta_0=60^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\varphi=180^\circ$).

Биооптические алгоритмы

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



Полуаналитический алгоритм:

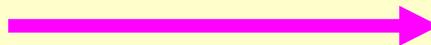


- прямая задача



- обратная задача

Регрессионный алгоритм:



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 .

Оценка параметров S и n

Для параметров S и n использовались их региональные значения, рассчитанные по данным измерений плавающим спектрорадиометром, а также измеренным значениям концентрации хлорофилла.

Для параметра S было выведено соотношение:

$$S = 0.0192 - 0.0049 \rho(412)/\rho(490);$$

для параметра n использовалось соотношение (Carder et al. 1999):

$$n = -1.13 + 2.57 \rho(443)/\rho(490).$$

Среднеквадратическая погрешность определения S составляет 0.001 нм^{-1} ; примерная оценка погрешности определения параметра n - 0.3.

Результаты наших оценок показывают, что погрешности определения концентрации хлорофилла, обусловленные неопределенностью значений S и n , существенно зависят от величины параметра β , характеризующего вклад пигментов в поглощение веществом; при этом чувствительность к ошибкам S существенно выше, чем к ошибкам n .

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 .

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

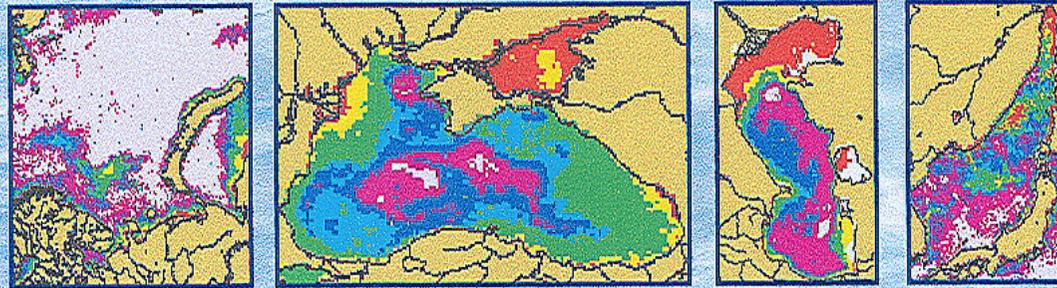
$$Chl = 0.88 [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-2.26}.$$

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

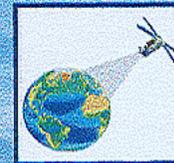
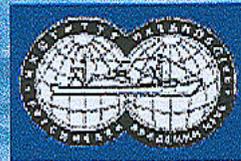
Год	2003						
№ станции	3	5	6	7	8	9	12
<i>In situ</i>	9.0	1.5	0.72	0.76	0.52	0.22	0.42
новый алгоритм	3.8	2.9	1.7	1.3	0.64	0.46	1.0
Год	2004						
№ станции	4	6	7	8	14	15	17
<i>In situ</i>	15.9	11.2	1.30	8.35	0.78	1.15	1.95
новый алгоритм	8.8	8.7	1.9	8.35	0.41	0.52	0.55

P.P.Shirshov Institute of Oceanology
Russian Academy of Sciences



BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE SEAS OF RUSSIA FROM DATA OF THE SEAWIFS SATELLITE OCEAN COLOR SCANNER

O.V.Kopelevich, V.I.Burenkov, S.V. Sheberstov,
E.A. Lukyanova, O.V. Prokhorenko



Moscow 2005

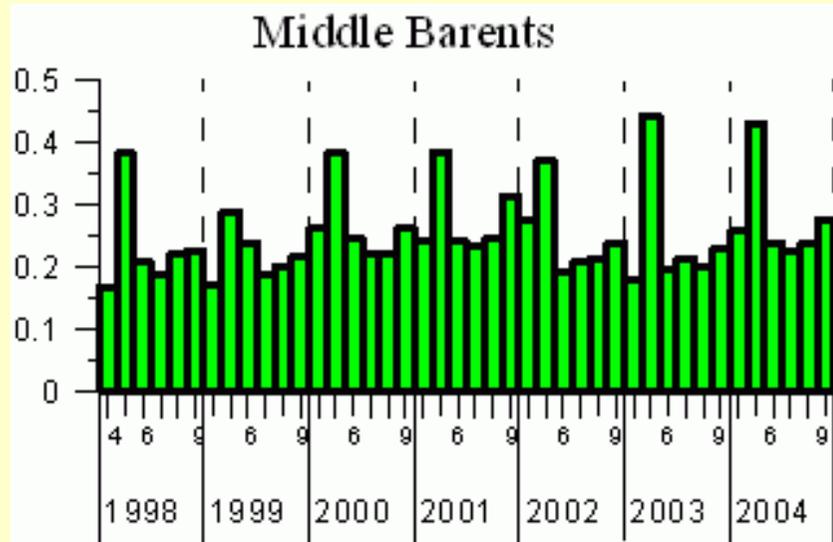
CD-ROM содержит среднемесячные распределения концентрации хлорофилла "а", показателей рассеяния назад взвешенными частицами и поглощения желтым веществом в Баренцевом, Белом, Черном, Каспийском и Японском морях по данным сканера цвета SeaWiFS с 1998 to 2004 гг. (742 цветные карты).

Дан краткий анализ полученных результатов.

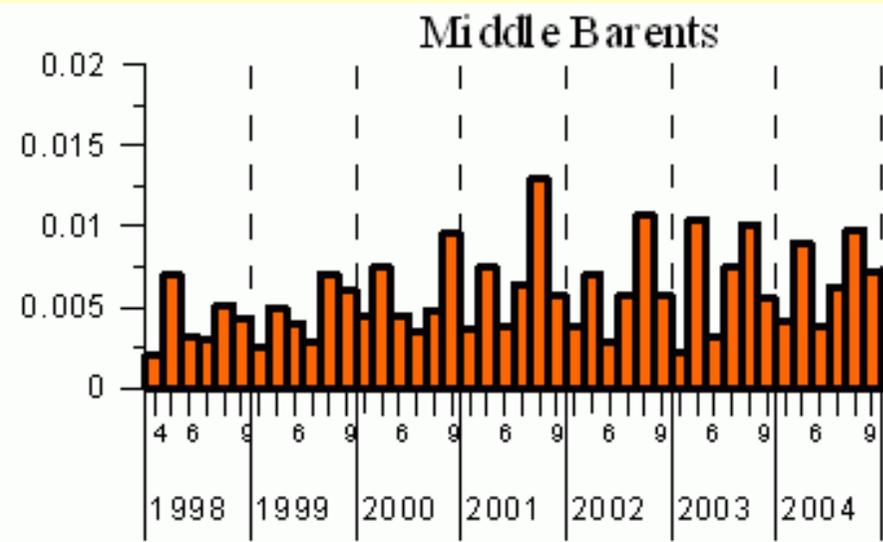
Материалы, представленные на CD, доступны на сайте:

<http://manta.sio.rssi.ru/>

Цветение кокколитофорид в Баренцевом море



Chl

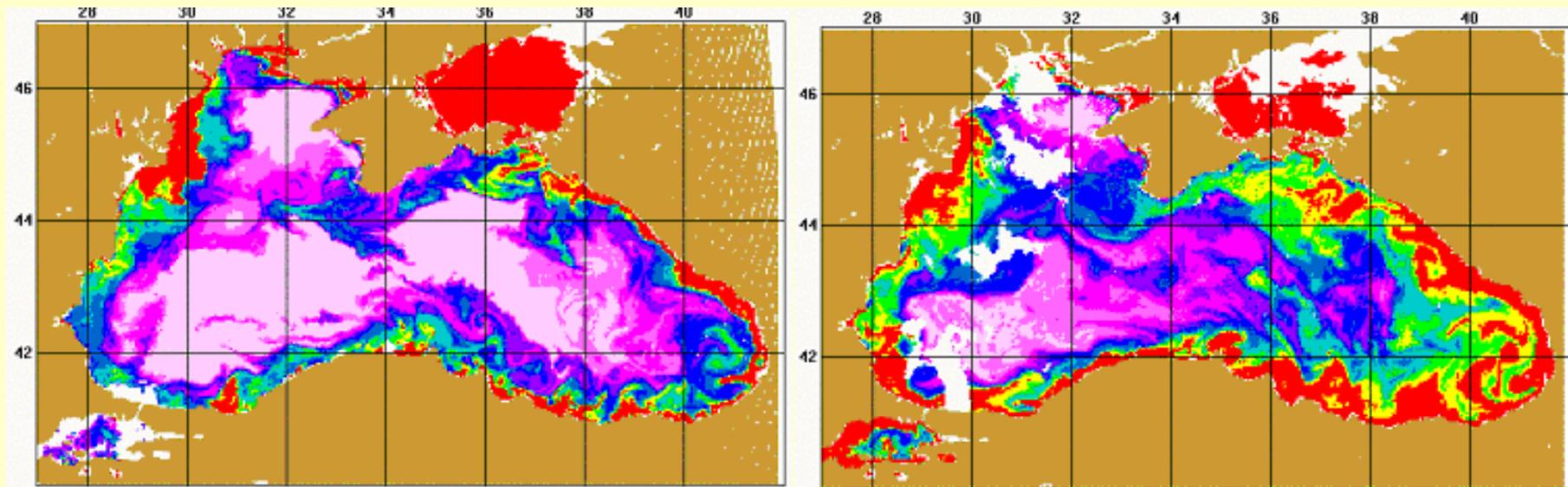


b_{bp}

годы	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
b_{bp} , $m^{-1} \times 10^3$	5.1	7.0	9.5	12.9	10.7	10.0	9.7

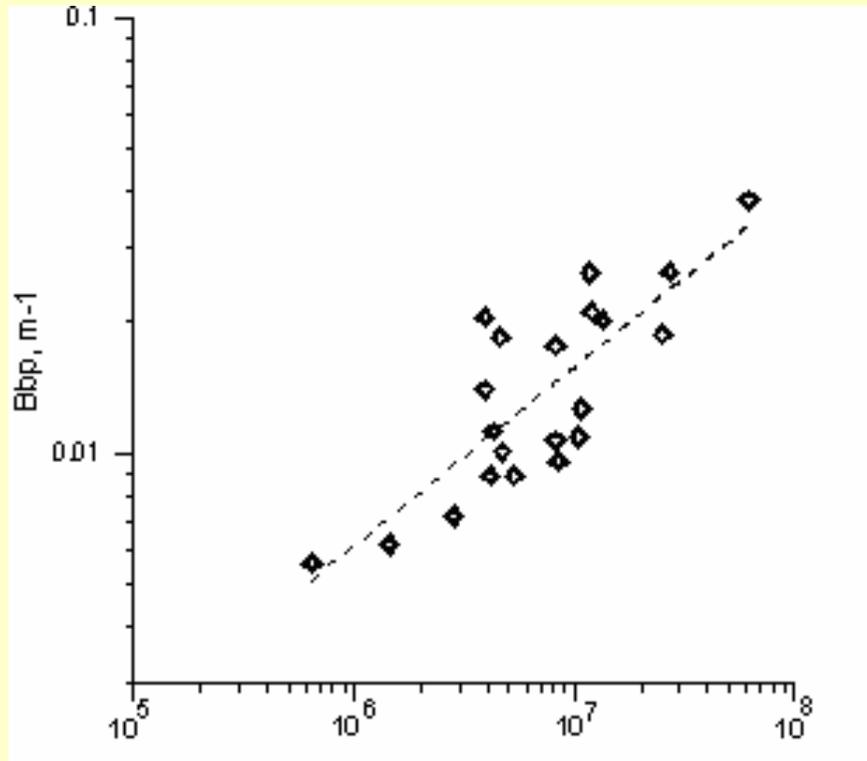
Прямые определения, проведенные в рейсе НИС «Профессор Штокман» в августе 2004 г. подтвердили, что наблюдаемое возрастание b_{bp} обусловлено цветением кокколитофорид (концентрация кокколитофор – 10^6 - 10^7 кл/л).

Июньское возрастание показателя рассеяния назад взвешенными частицами в Черном море



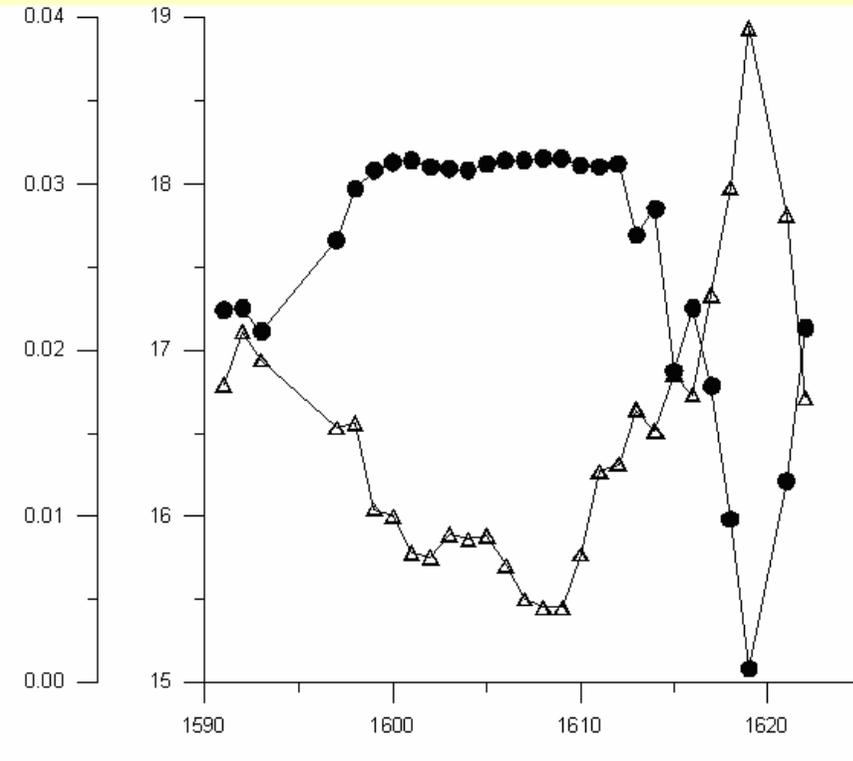
Распределение значений b_{bp} в Черном море 22 мая (слева) и 12 июня 2004 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua.

Исследование причин наблюдаемого возрастания по данным судовых измерений



Связь между концентрацией кокколитофорид и b_{bp} ($R^2 = 0.65$, $n=21$).

Возрастание может быть обусловлено как кокколитофоридным цветением, так и влиянием речного стока.



Изменение поверхностной солености $S_{\text{‰}}$ (кружки) и величины b_{bp} m^{-1} (треугольники) по маршруту судна.