

Учет отражения солнечного излучения от дна на мелководье при обработке данных спутниковых сканеров цвета

**Копелевич О.В., Буренков В.И., Терехова А.А.,
Шеберстов С.В., Шибалкова А.П., Вазюля С.В.**

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

Коэффициент яркости водной толщи на мелководье:

$$\rho_{sh}(\lambda) = \rho_{dp}(\lambda) + [\rho_{dp}(\lambda) - \rho_B(\lambda)] \exp(-2K(\lambda) H),$$

где $\rho_{dp}(\lambda)$ – спектральный коэффициент яркости водной толщи для глубокого моря; $\rho_{dp}(\lambda) = f_\rho(b_b/a)$;

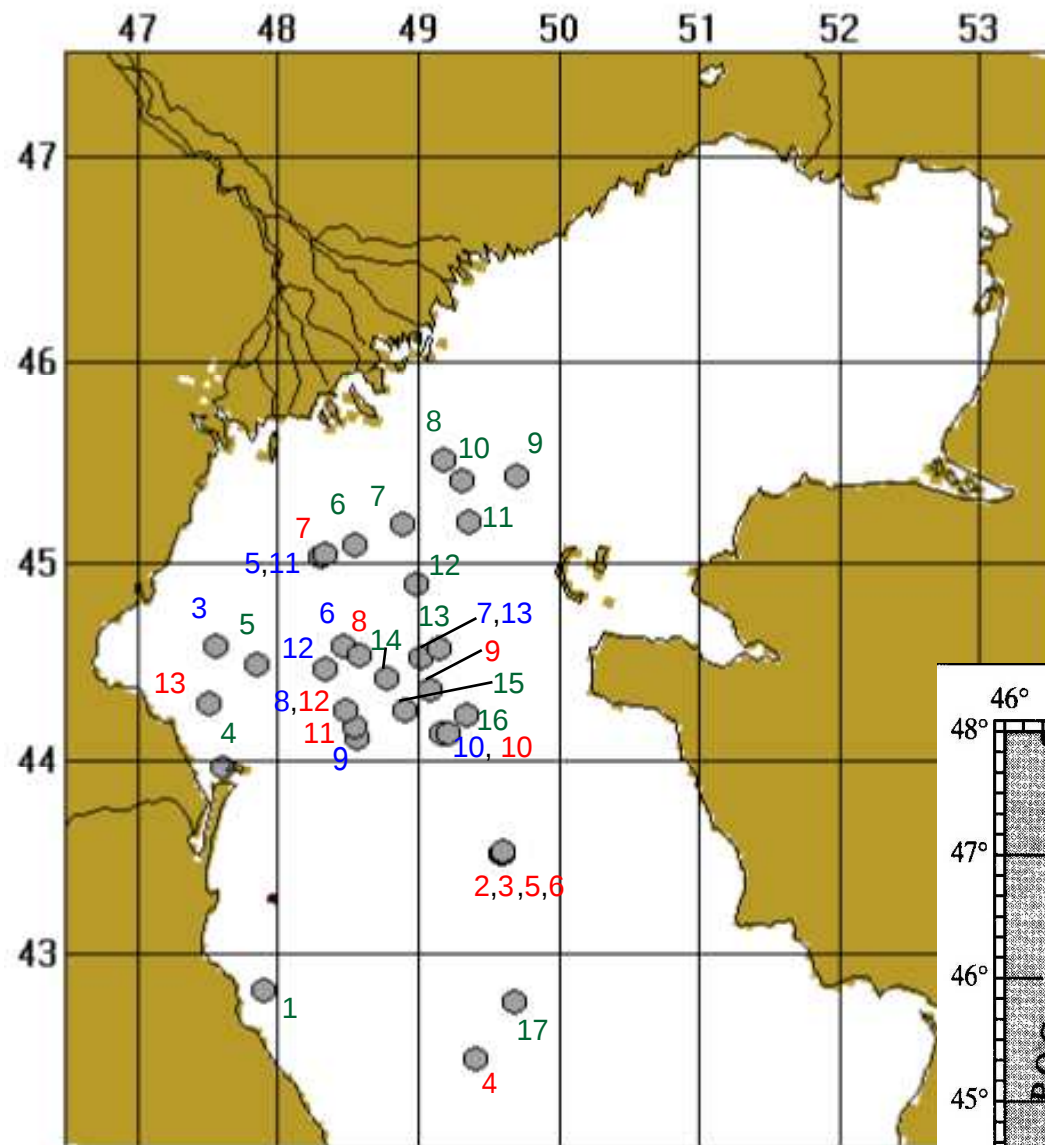
a и b_b – спектральные показатели поглощения и рассеяния назад морской воды; $a = f_a(Chl, c_g)$, $b_b = f_b(c_s)$;

$K(\lambda)$ – спектральный диффузный коэффициент ослабления подводной облученности с глубиной; $K(\lambda) = k(a+b_b)$;

H – глубина; $\rho_B(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения дна.

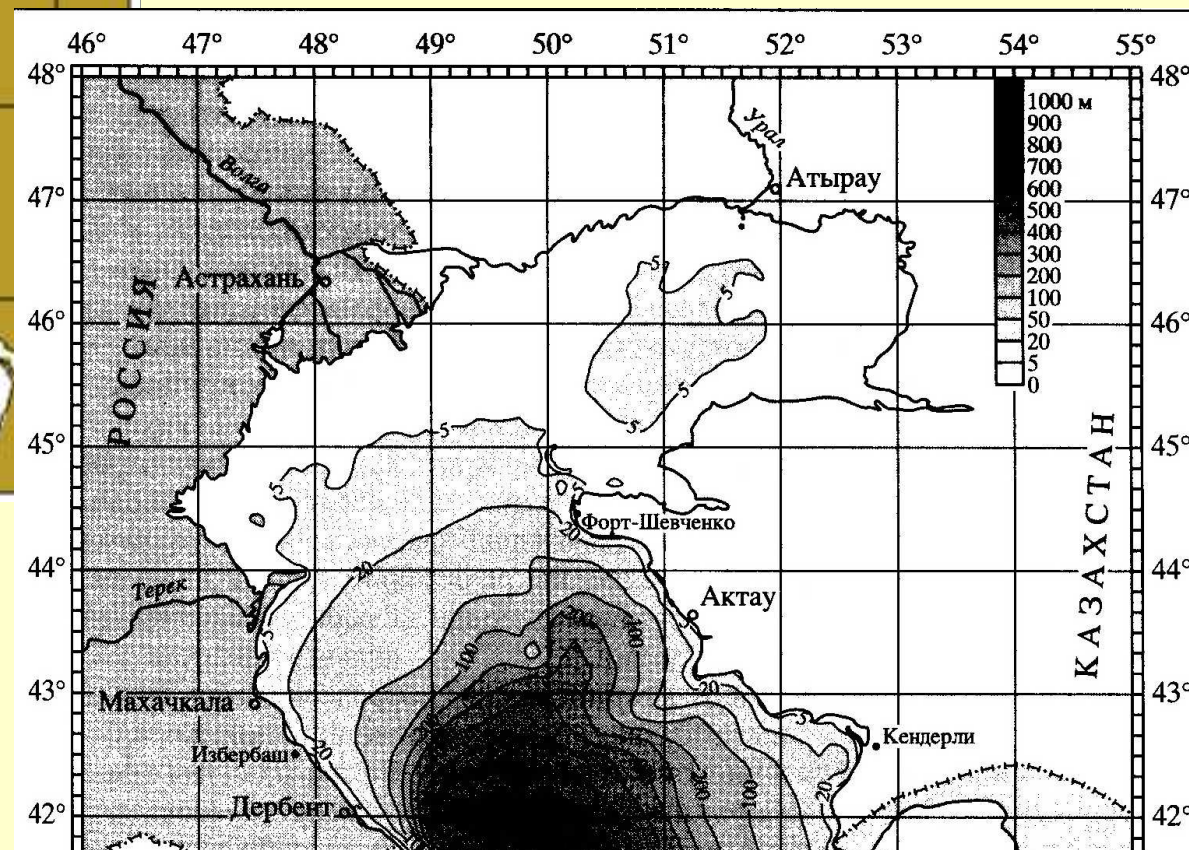
Содержание

- Введение
- Аппаратура и методика проведения измерений
- Выбор аналитической формулы, обеспечивающей приемлемую точность
- Коррекция на вклад излучения, отраженного ото дна
- Регрессионные алгоритмы для расчета концентрации хлорофилла и взвеси
- Заключение



Расположение станций,
где проводились измерения.
Синим цветом обозначены
номера станций в 2003 г.,
зеленым – в 2004 г.,
красным – в 2006 г.

Батиметрическая карта
северной половины
Каспийского моря



Аппаратура и оборудование

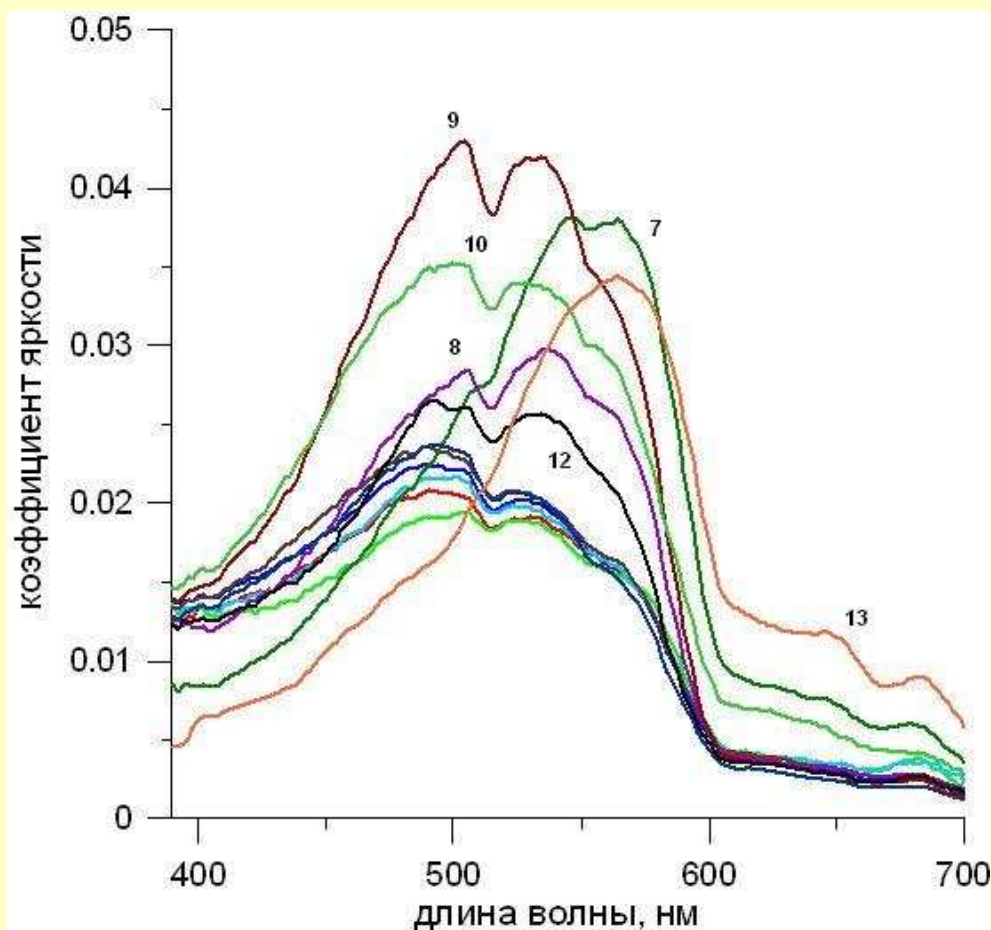
- Плавающий спектрорадиометр
- Погружаемый зонд-прозрачномер
- Измеритель светового режима на поверхности и в водной толще (в 2006 г.)
- Оборудование для определения концентрации хлорофилла (спектрофотометрический метод)
- Оборудование для определения концентрации взвеси (фильтрация и взвешивание)

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%.

Изменчивость биоптических характеристик морской воды



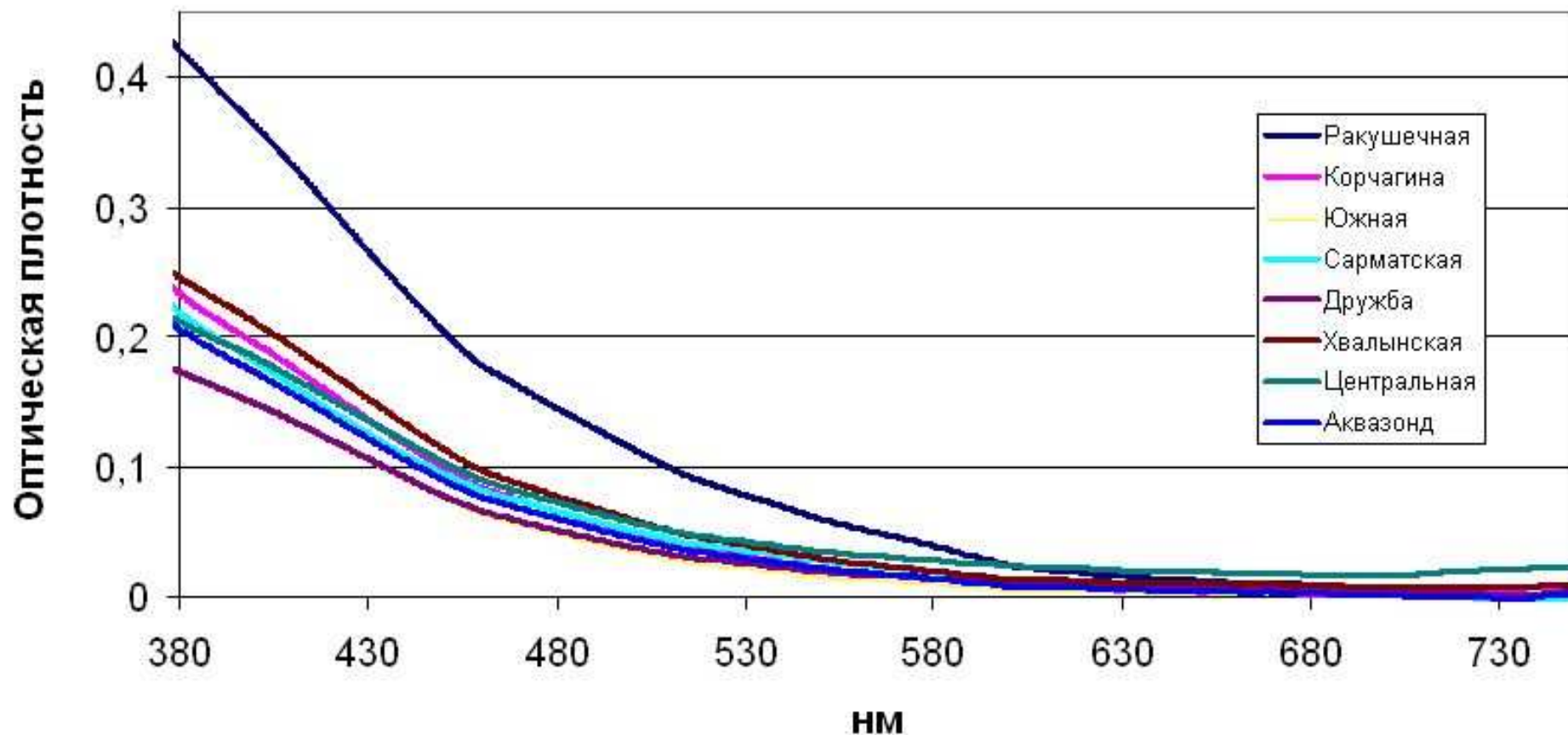
Наименьшие значения глубины видимости белого диска Z_{ϕ} и наибольшие значения показателя ослабления c в подповерхностном слое наблюдались на станциях 7 и 13: $Z_{\phi} = 3.5$ и 3.3 м, $c = 1.6$ и 3.7 м⁻¹; наибольшие Z_{ϕ} и наименьшие c на ст. 8: >12 м (диск был хорошо виден на дне) и 0.43 м⁻¹.

Наибольшие концентрации хлорофилла также наблюдались на ст. 7 и 13: 0.8 и ~ 2 мг/л, наименьшая на ст.12 – 0.18 мг/л.

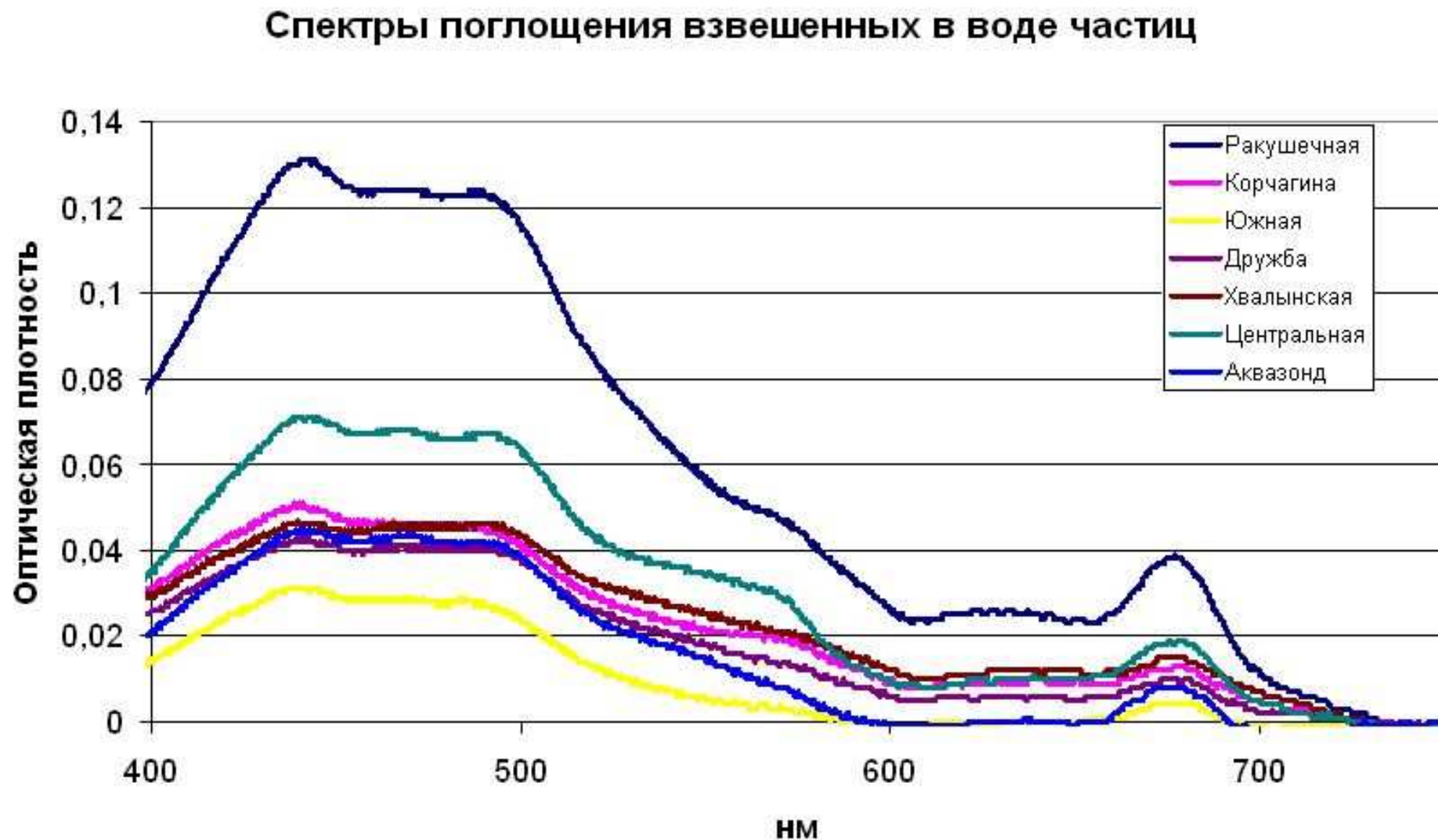
Спектры коэффициента яркости $\rho(\lambda)$ (определяющие цвет моря) на разных станциях: 7 – Ракушечная, 8 - Корчагина, 9 – Южная, 10 - Хвалынская, 12 –Сарматская, 13 – около о.Тюлений.

Спектры поглощения «желтого» вещества на разных станциях по данным измерений лабораторным измерителем поглощения

Спектры поглощения морской воды, профильтрованной через фильтр GF/F (0,7мкм)



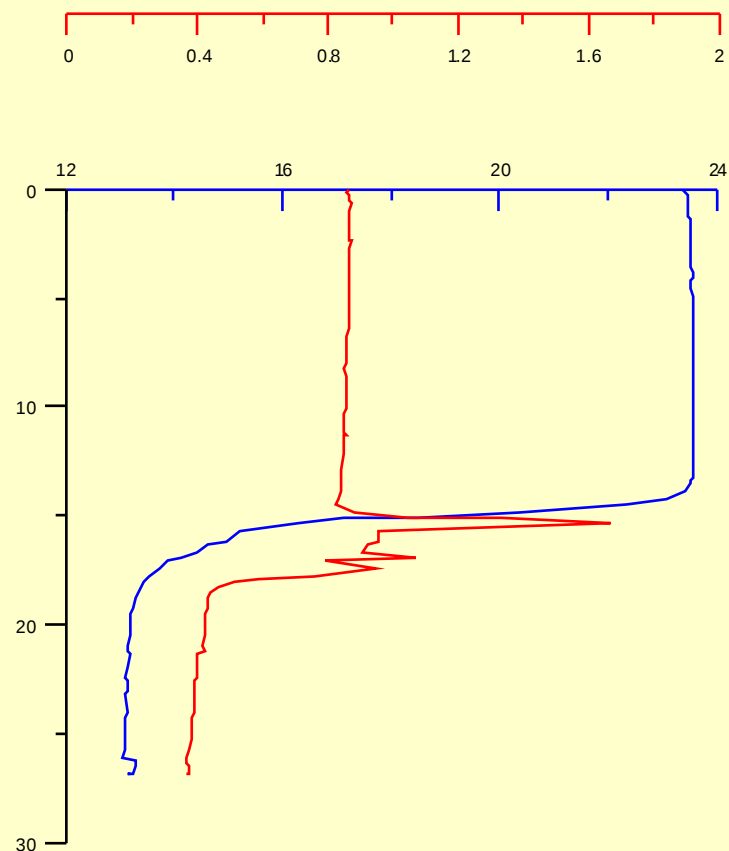
Спектры поглощения взвешенного вещества на разных станциях по данным измерений лабораторным измерителем поглощения



Судовой измерительный комплекс

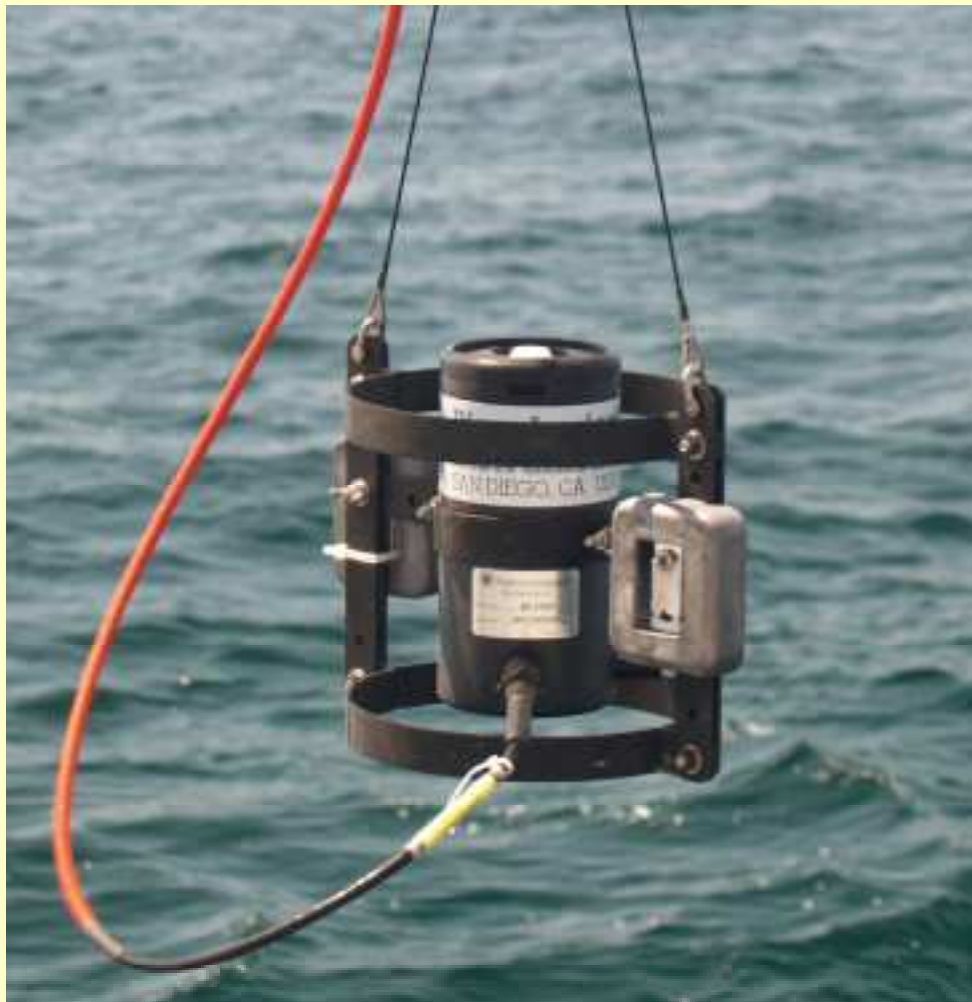


Погружаемый зонд-прозрачномер измеряет прозрачность (показатель ослабления света) и температуру морской воды до глубины 200 м.



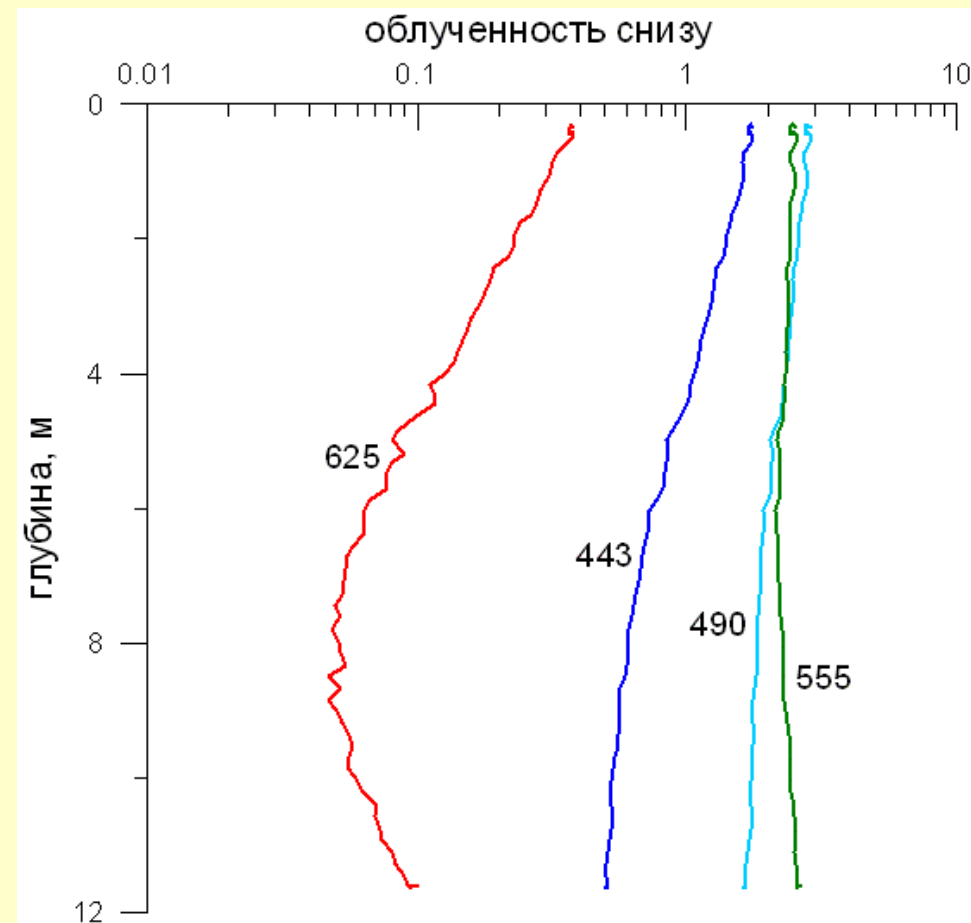
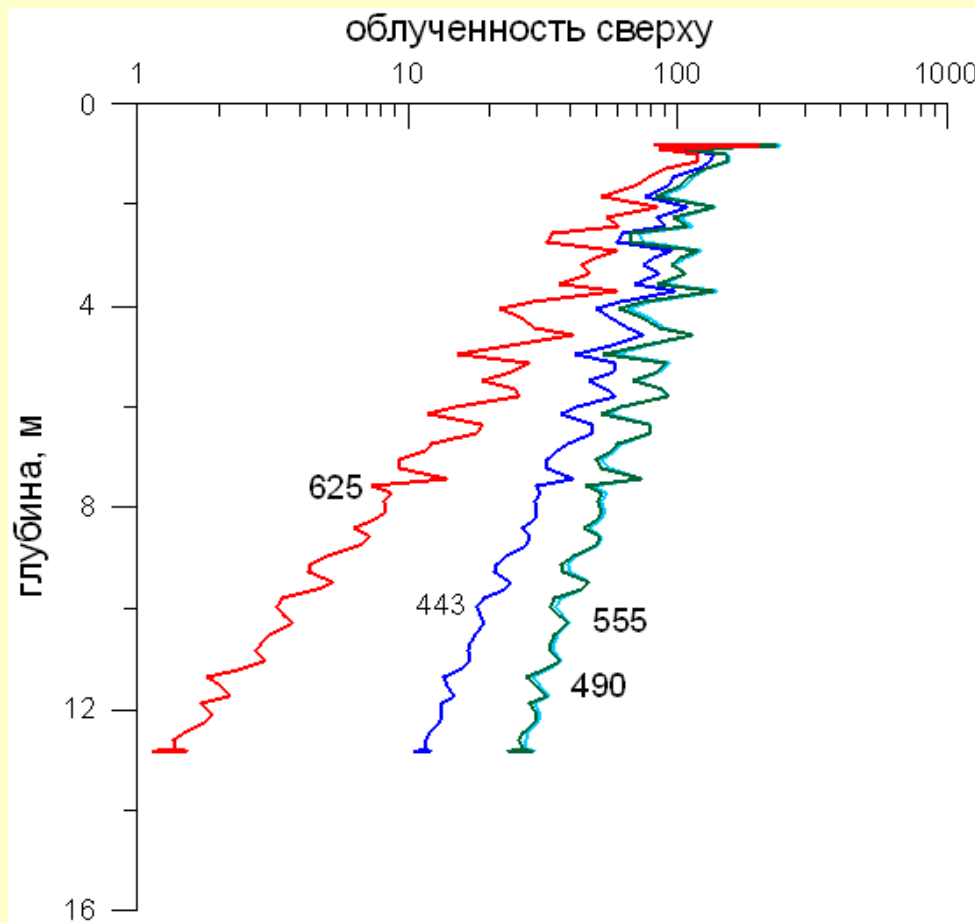
Пример вертикальных профилей показателя ослабления (красный) и температуры (синий), измеренных на станции в центральной части района исследований.

Судовой измерительный комплекс



Измеритель светового режима (ИСР) на поверхности моря и в водной толще включает подводный радиометр для измерения ослабления солнечного излучения с глубиной в верхнем 100-метровом слое и палубный радиометр для непрерывных измерений облученности поверхности моря. Спектральные каналы: 443, 490, 55, 625 нм.

Пример измерения подводной облученности сверху (левый рисунок) и снизу (правый) посредством прибора ИСР



Измерения выполнены на Корчагина, где глубина ~12 м и относительно чистая вода. Видны резкие различия вертикальных профилей подводной облученности сверху (создаваемой нисходящим потоком солнечного излучения) и снизу (восходящим), обусловленные влиянием отражения ото дна.

Приближенные формулы, учитывающие отражение ото дна

1. Maritorena et al. 1994

Ошибки оценивались для 67 ситуаций;

$$R_{sh} = E_u/E_d = R_{dp} + (A - R_{dp}) \exp(-2KH).$$

средняя относительная ошибка – 13%.

2. Буренков, Васильков, Романов 1997

Ошибки не оценивались.

$$\rho_{RSsh}(\lambda) = \rho_{RSdp}(\lambda) [1 - \exp(-2K_d H)] + R_B \exp(-2K_d H).$$

3. Lee et al. 1998:

$$r_{RS}(\lambda, \theta, \varphi, 0-) = L_u(\lambda, \theta, \varphi, 0-) / E_d(\lambda, 0-) = \rho_{RSsh}(\lambda) 1/\pi$$

$$r_{RSsh} = r_{RSdp} \cdot \{1 - A_o \exp[-(K_d + K_{uc}) \cdot H] + A_1 R_B \cdot \exp[-(K_d + K_{uB}) \cdot H]\};$$

$$K_d = \alpha \cdot D_d; \quad K_{uc} = \alpha \cdot D_{uc}; \quad K_{uB} = \alpha \cdot D_{uB}; \quad \alpha = a + b_b;$$

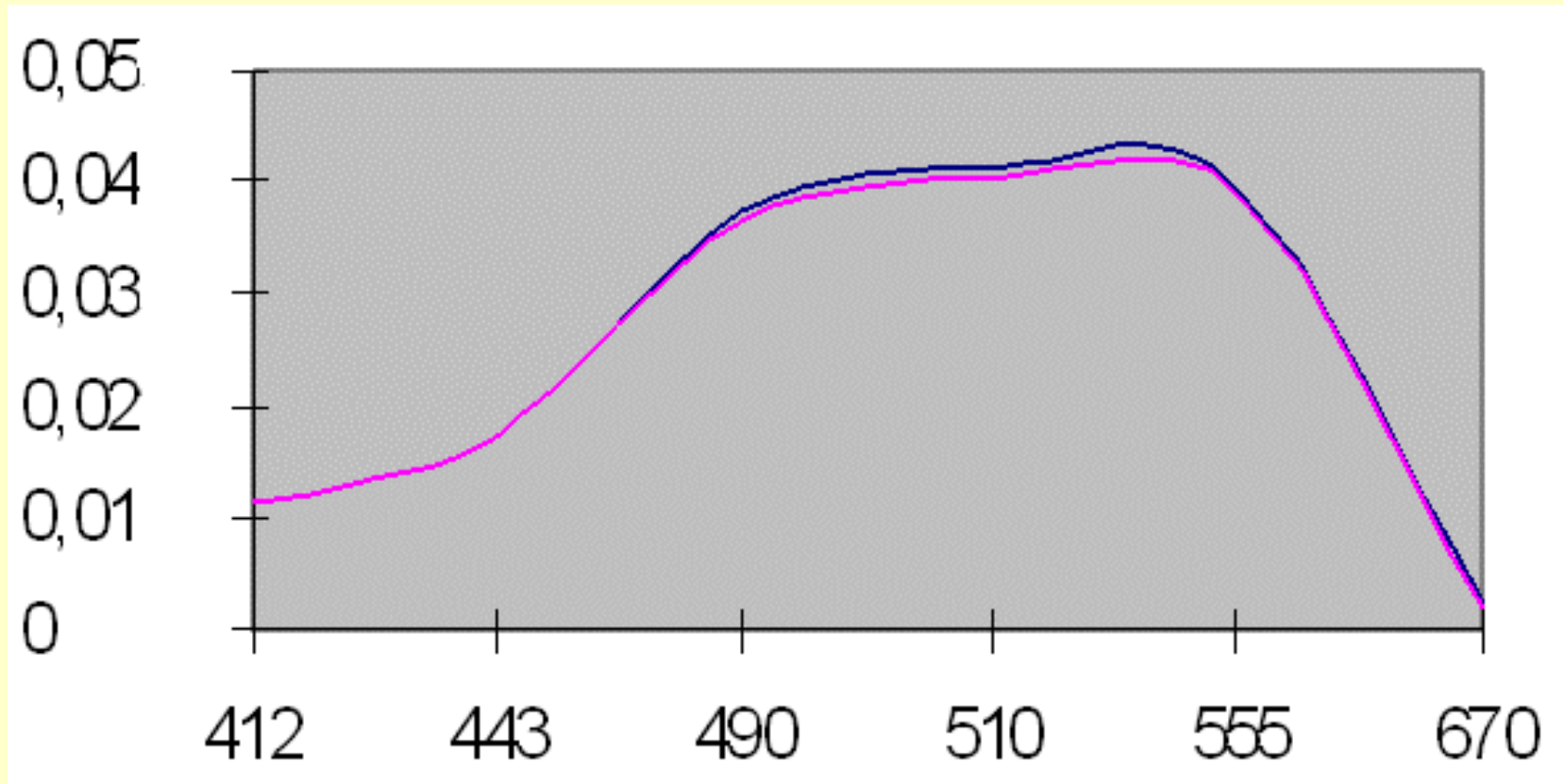
$$D_d = 1/\cos \theta_w; \quad D_u = D_0 (1 + D_1 X)^{0.5} \quad \text{Kirk 1991.}$$

From Hydrolight simulations:

$$A_o = 1.03; \quad A_1 = 0.31; \quad D_{uc} = 1.2 (1 + 2.0 X)^{0.5}; \quad \text{Средняя относительная ошибка}$$

$$D_{uB} = 1.1 (1 + 4.9 X)^{0.5}. \quad \text{около 3\%.}$$

Оценка точности приближенной формулы (красная) путем сравнения с расчетами точным методом (черная)



Расчеты выполнены для оптических характеристик воды на ст.13 экспедиции 2004 г., глубина 10м. Значение альбедо дна взято для белого песка $R_B = 0.22$. Точность приближенной формулы зависит от оптических характеристик воды: для относительно чистых вод ошибка не превышает 2 %, для более мутных — увеличивается (на краях спектра) до 15 %;

Коррекция спектрального коэффициента яркости на отражение ото дна на мелководье

$$\rho_{sh}(\lambda) = \rho_{dp} [1 - \exp(-2K_d(\lambda) H)] + \rho_B(\lambda) \exp(-2K_d(\lambda) H),$$

где $K_d(\lambda)$ — спектральный показатель диффузного ослабления подводной облученности, H — глубина, $\rho_B(\lambda)$ — спектральный коэффициент отражения ото дна.

$$\rho_{dp} = 0.0922 \pi X / (1 - X), \quad \text{где } X = b_b / (a + b_b), \quad \text{Morel, Gentili 1993}$$

a и b_b — показатели поглощения и рассеяния назад морской воды.

$$K_d = 1.04 D_o (a + b_b), \quad D_o = 1 / \cos \theta_w \quad \text{Gordon 1989}$$

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda), \quad b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda),$$

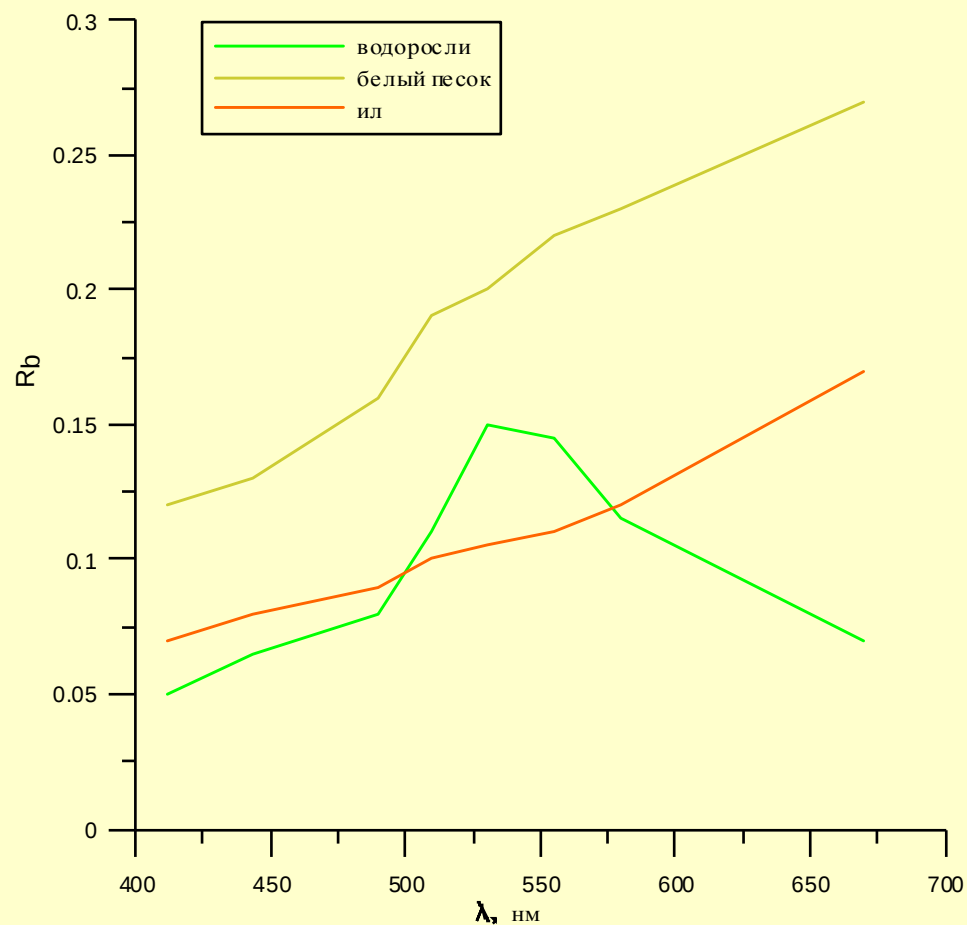
$$a_p(\lambda) = C_a F_{ph}(\lambda), \quad a_g(\lambda) = a_g \exp(-S(\lambda - 440)), \quad b_{bp}(\lambda) = b_{bp} (\lambda/550)^{-n},$$

$$\rho_B(\lambda) = A f(\lambda), \quad A = \rho_B(\lambda).$$

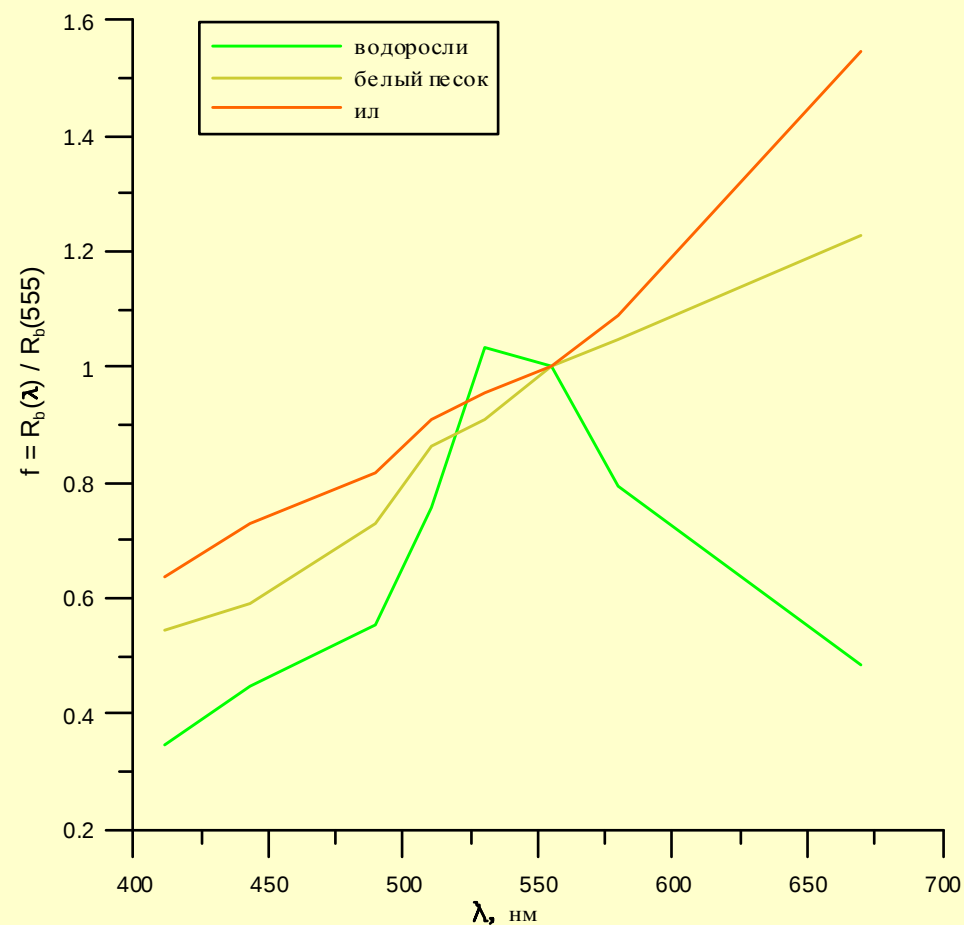
Четыре неизвестных параметра:

$$C_a, \quad a_g, \quad b_{bp}, \quad A.$$

Спектральные зависимости коэффициента отражения ото дна



Средние спектральные величины
коэффициента отражения ото дна

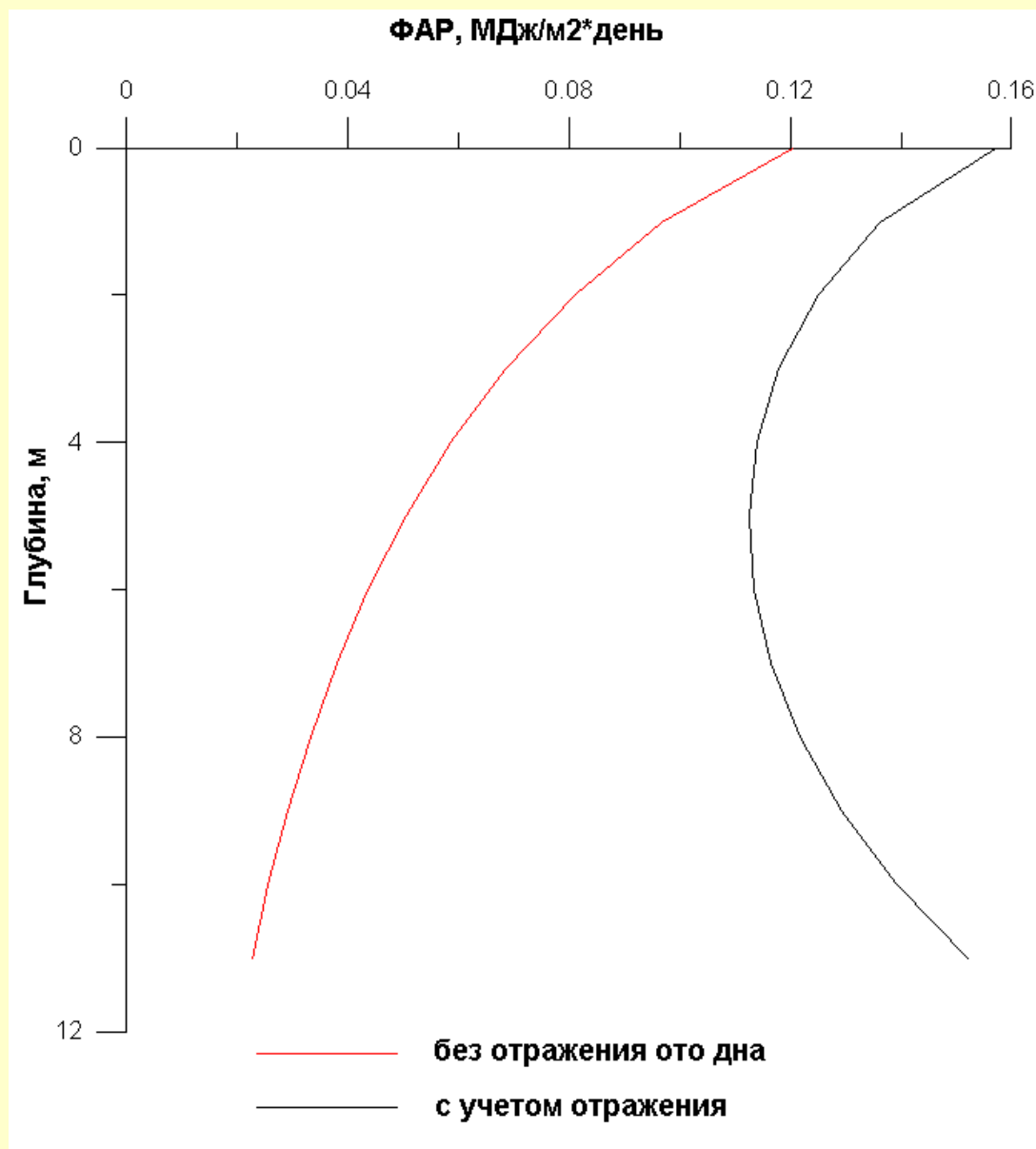


Спектральные зависимости $f(\lambda)$
для разных типов дна

Результаты решения обратной задачи для мелководных станций экспедиции 2006 г.

№ Ст. / (глубина, м)	Длина волны, нм						Средняя невязка	
	412	443	490	510	555	670	Абс.	Отн., %
7 / (7)	0.0087 0.0087	0.0115 0.0112	0.0201 0.0168	0.0254 0.0189	0.0332 0.0208	0.0057 0.0056	0.0004	2.8
8 / (12)	0.0105 0.0104	0.0134 0.0128	0.0214 0.0182	0.0225 0.0179	0.0210 0.0155	0.0026 0.0026	0.0004	7.4
9 / (10.5)	0.0133 0.0111	0.0184 0.0121	0.0322 0.0133	0.0323 0.0098	0.0273 0.0052	0.0021 0.0021	0.0002	5.8
10 / (30)	0.0148 0.0148	0.0194 0.0194	0.0294 0.0288	0.0288 0.0280	0.0249 0.0242	0.0039 0.0039	0.0004	2.6
12 / (15)	0.0098 0.0097	0.0124 0.0115	0.0197 0.0142	0.0196 0.0126	0.0167 0.0096	0.0020 0.0020	0.0004	3.2
13 / (9)	0.0068 0.0068	0.0088 0.0088	0.0147 0.0146	0.0193 0.0187	0.0303 0.0258	0.0081 0.0081	0.0002	1.5

Изменение влияния отраженного ото дна излучения с глубиной



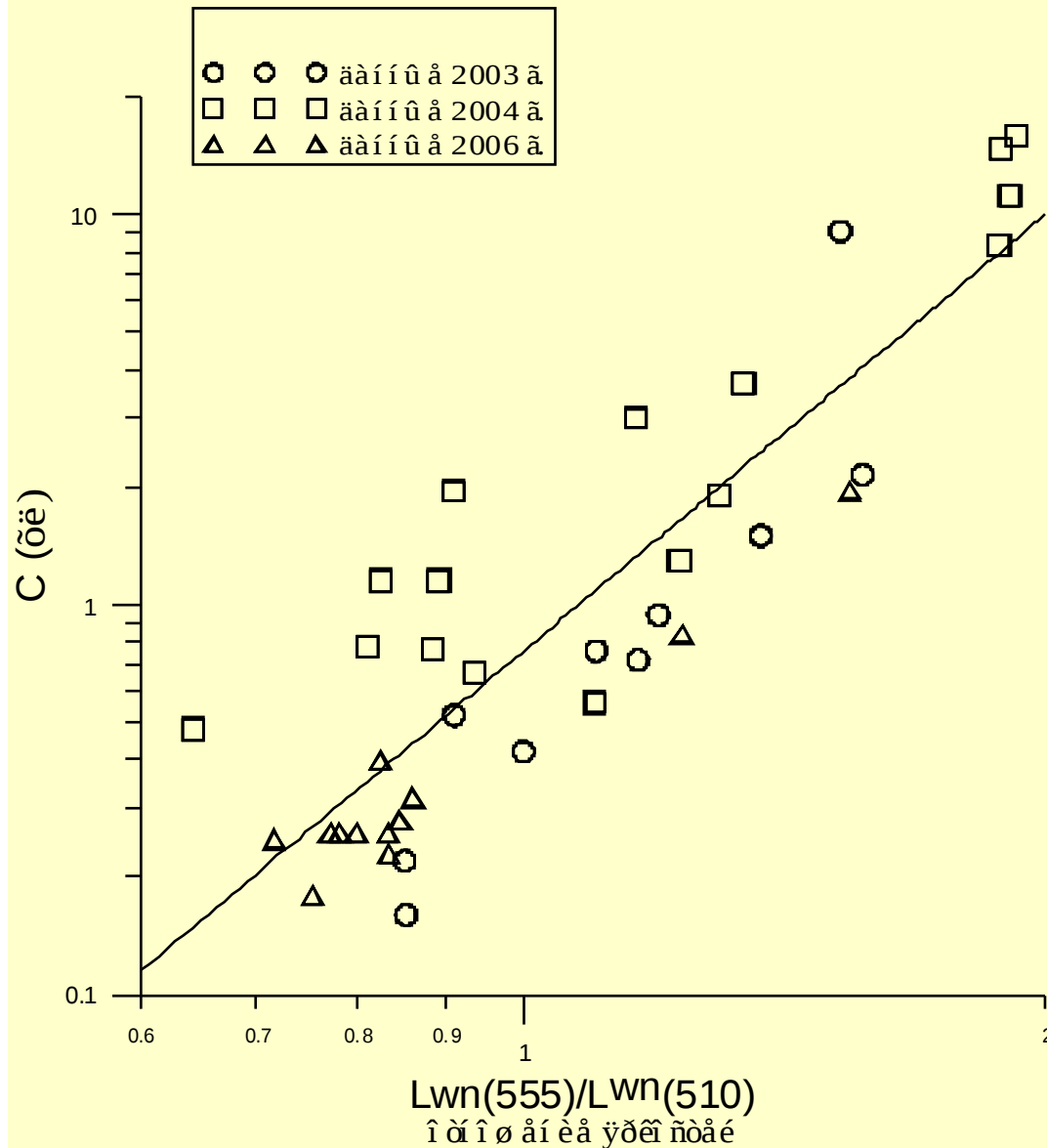
Ст.9 экспедиции 2006 г.,
глубина 10.5 м.

Черная кривая показывает
изменение восходящей ФАР
для реальной ситуации;
красная - в предположении,
что $H \rightarrow \infty$.

$$E_u(z) = E_d(z) R_{sh}(z) = E_d(0) R_{sh}(z) \exp(-Kz)$$

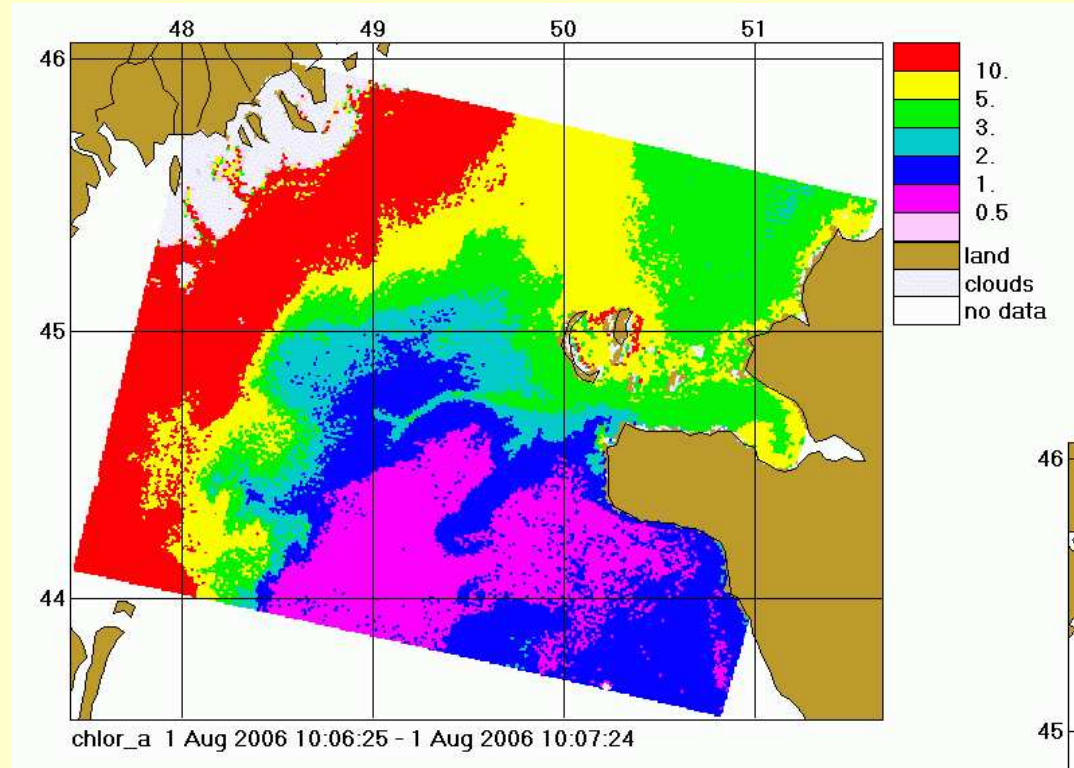
$$R_{sh}(z) = R_{dp} + (A - R_{dp}) \exp[-2K(H-z)].$$

Регрессионный алгоритм для расчета концентрации хлорофилла с учетом коррекции на отражение ото дна



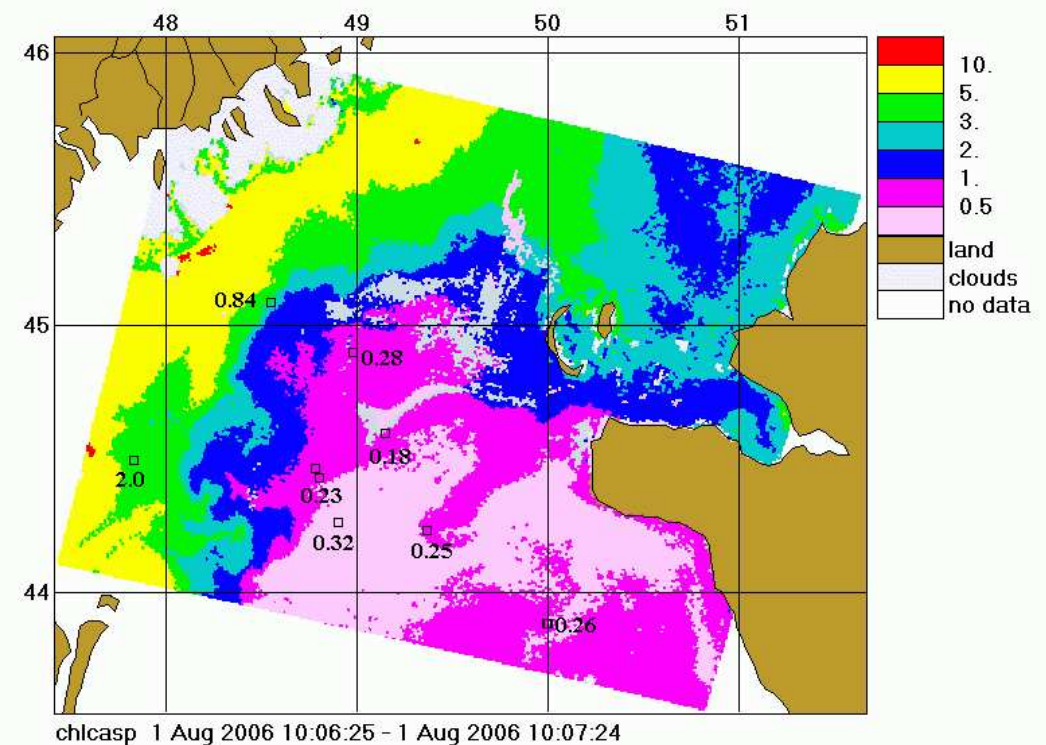
$Chl = 0.766 \cdot [L_{wn}(555)/L_{wn}(510)]^{3.71}$,
 где $L_{wn}(555)$ and $L_{wn}(510)$ –
 нормализованная яркость восходящего
 излучения при 555 и 510 нм
 (n=38, $R^2 = 0.77$).
 Относительная ошибка порядка 50%.

Сравнение распределений концентрации хлорофилла по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS, рассчитанных посредством стандартного и нового регионального алгоритмов.



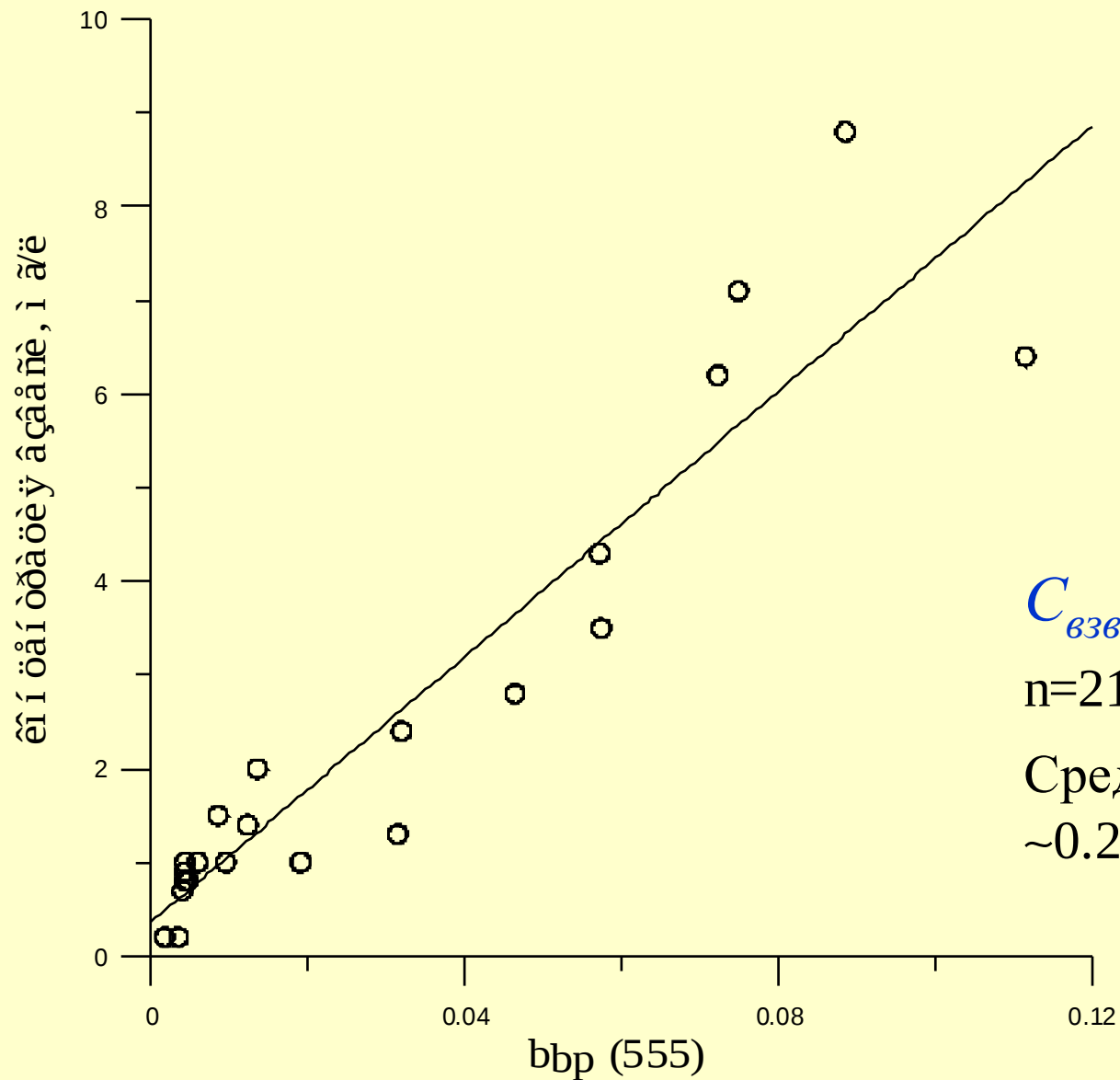
01.08.2006

Стандартный алгоритм
обработки данных SeaWiFS



Региональный алгоритм

Регрессионный алгоритм для расчета концентрации взвеси с учетом коррекции на отражение ото дна



$$C_{vzv} = 70.8 b_{bp}(555) + 0.365,$$

$n=21$, $R^2=0.878$.

Среднеквадратичная ошибка
~0.2 mg/l

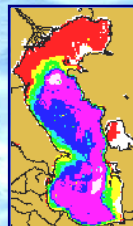
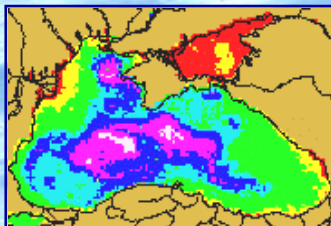
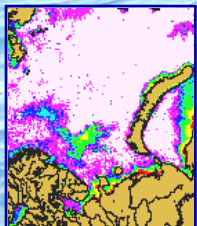
Заключение

- Выполненные исследования могут рассматриваться лишь как первый шаг на пути к разработке алгоритма обработки данных спутниковых сканеров цвета с учетом отражения ото дна на мелководье.
- Одна из главных задач дальнейших исследований – оценка влияния ошибок атмосферной коррекции и их уменьшения.
- Другая задача – исследование региональных спектральных зависимостей показателей поглощения желтым веществом, пигментов фитопланктона, рассеяния взвесью, а также спектральных величин отражения ото дна с учетом возможного наличия придонных нефелоидных слоев.
- Для решения этих задач требуется проведение дальнейших натурных комплексных исследований в сочетании с одновременными спутниковыми наблюдениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 07-05-00799 и Программы фундаментальных исследований №17 Президиума РАН.

Авторы выражают благодарность В.А. Артемьеву, А.В. Григорьеву и В.Р. Таскаеву за помощь в проведении натурных оптических исследований, а также Б.В. Коновалову, А.Н. Плишкину, В. Русакову и С.И. Погосяну за предоставление данных по концентрациям хлорофилла и взвеси.

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



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

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



Moscow 2007

This CD-ROM presents the mean monthly distributions of chlorophyll "a" concentration, the particle backscattering coefficient, and the yellow substance absorption coefficient in the Barents, White, Black and Caspian Seas derived from data of the satellite ocean color scanners from 1998 to 2006.

A brief analysis of the obtained results is given.

CD-ROM viewing

Internet Explorer, Netscape Navigator or other Internet Browser is needed to view this CD-ROM. It is opened automatically; if not so, please click index.htm in your Internet browser .

Attention!!!

All maps are given with two scales. To look at a map with better resolution, please click this map by the left mouse button.

Contact:

Laboratory of Ocean Optics,
P.P.Shirshov Institute of Oceanology,
36, Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997 Russia.
Phone (495)-129-2781
e-mail: oceanoptics@manta.sio.rssi.ru