Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета

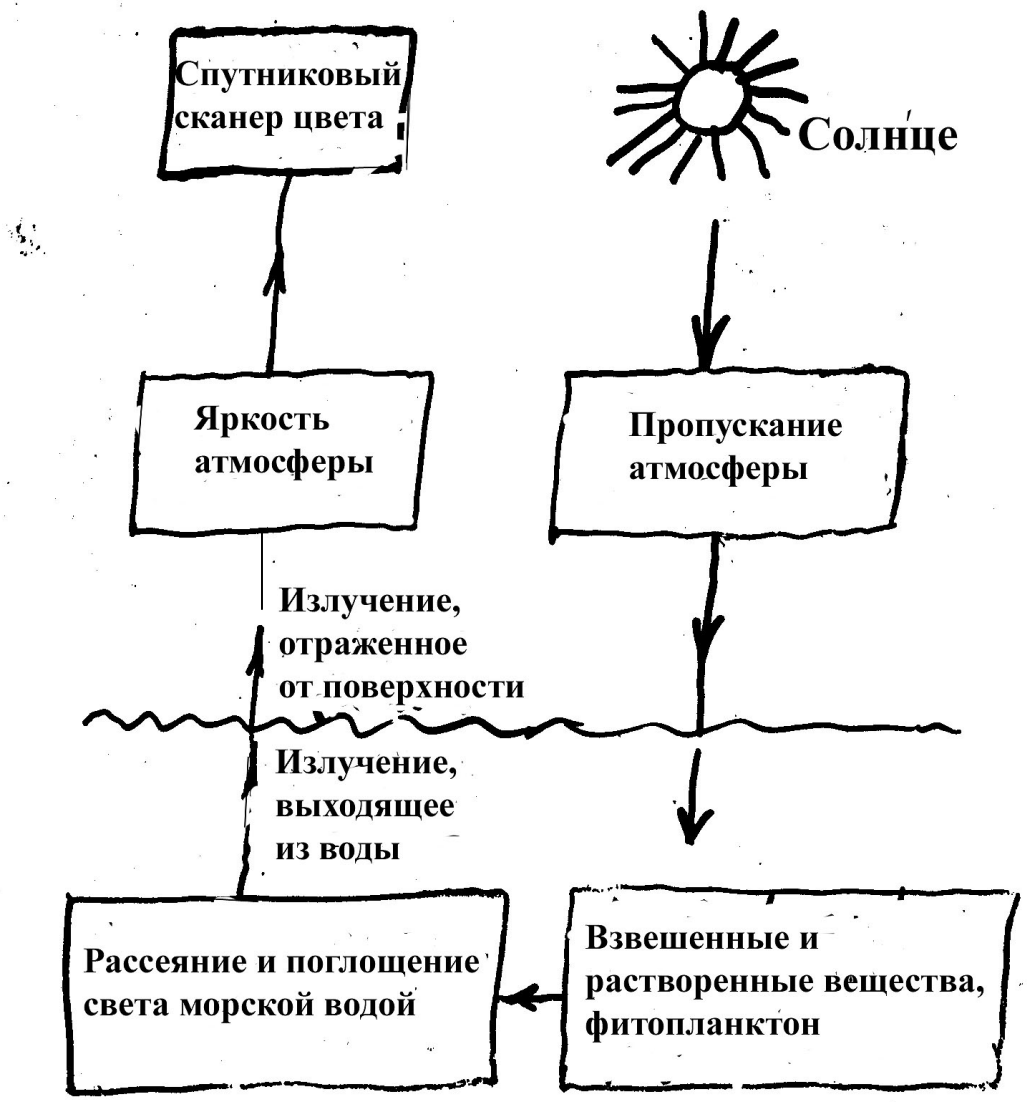
Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
г. Москва

Содержание

1. Задача атмосферной коррекции. Алгоритм ИОРАН.
2. Статистический анализ информационного содержания спутниковых данных.
3. Анализ временных зависимостей.
4. Спектральные зависимости.
5. Собственные значения и собственные векторы ковариационных матриц.
6. Системы базовых функций для спектральных коэффициентов яркости водной толщи и аэрозольной атмосферы.
7. Применение регионального алгоритма для мелководных и глубоководных районов.
8. Заключение.

Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



Спектральная яркость $L_t(\lambda_l)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемая спутниковым датчиком, представляется как суперпозиция составляющих яркостей:

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

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.

Случай мелкого моря

Яркость вышедшего из воды излучения в случае мелкого моря, когда нельзя пренебрегать вкладом излучения, отраженного ото дна, можно представить в виде:

$$L_w(\lambda_i) = L_{wH}(\lambda_i) + L_B(\lambda_i) \cdot t_{wH}(\lambda_i),$$

где H – глубина, $L_{wH}(\lambda_i)$ – яркость, создаваемая слоем воды над дном, $L_B(\lambda_i)$ – яркость излучения, отраженного ото дна, $t_{wH}(\lambda_i)$ – пропускание слоя воды над дном.

Соответствующие формулы можно найти в статье Копелевича и др. в Сборнике «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса», т.2, 2008. С.117-127.

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 $L_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком.

$$\boldsymbol{L_a(\lambda_i) + t(\lambda_i)\cdot L_w(\lambda_i)} + T(\lambda_i)\cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i)\cdot L_{wc}(\lambda_i) = \boldsymbol{L_t(\lambda_i) - L_r(\lambda_i)}.$$

2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_W(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи. В случае мелкого моря с учетом отражения ото дна.

Алгоритм атмосферной коррекции ИОРАН

Алгоритм атмосферной коррекции ИОРАН 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

$$\rho_a(\lambda_i) + t(\lambda_i)\,\rho_w(\lambda_i) = \rho_t(\lambda_i) - \rho_r(\lambda_i) - T(\lambda_i)\,\rho_g(\lambda_i) - t(\lambda_i)\,\rho_{wc}(\lambda_i); \quad \rho = \pi L / F_o \cos\theta_o ,$$

где $F_o \cdot \cos\theta_o$ – облученность, создаваемая солнечным излучением на верхней границе атмосферы, θ_o – зенитный угол Солнца.

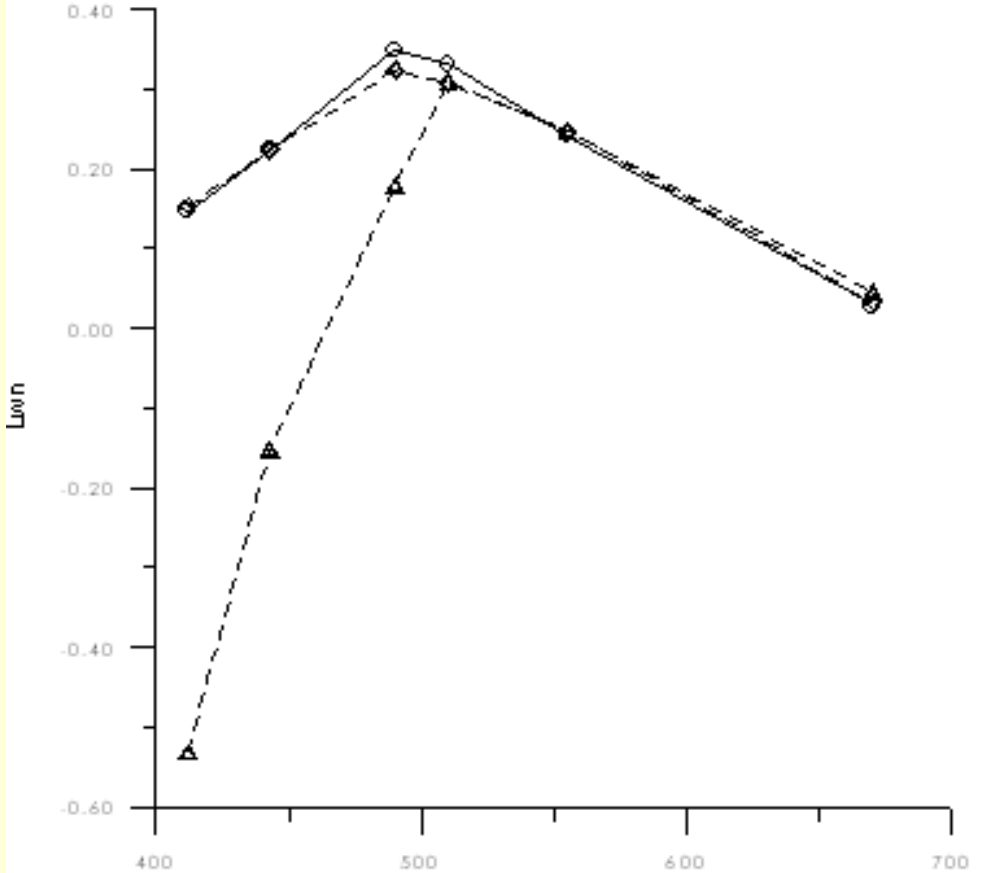
Используется параметризация спектральных функций $\rho_a(\lambda_i)$ и $\rho_w(\lambda_i)$ посредством нескольких базовых функций. Благодаря этому проблема сводится к нахождению нескольких весовых коэффициентов при этих базовых функциях, исходя из наилучшего соответствия измеренных и рассчитанных спектральных значений $\rho_t(\lambda_i)$.

Спектральный коэффициент яркости моря $\rho_w(\lambda_i)$ представляется в виде разложения по разработанной ранее системе базовых функций $\rho_{w1}(\lambda_i)$, $\rho_{w2}(\lambda_i)$, $\rho_{w3}(\lambda_i)$

$$\rho_w(\lambda_i) = c_1\,\rho_{w1}(\lambda_i) + c_2\,\rho_{w2}(\lambda_i) + c_3\,\rho_{w3}(\lambda_i),$$

где c_1, c_2, c_3 – соответствующие коэффициенты разложения (Kopelevich et al. 2007).

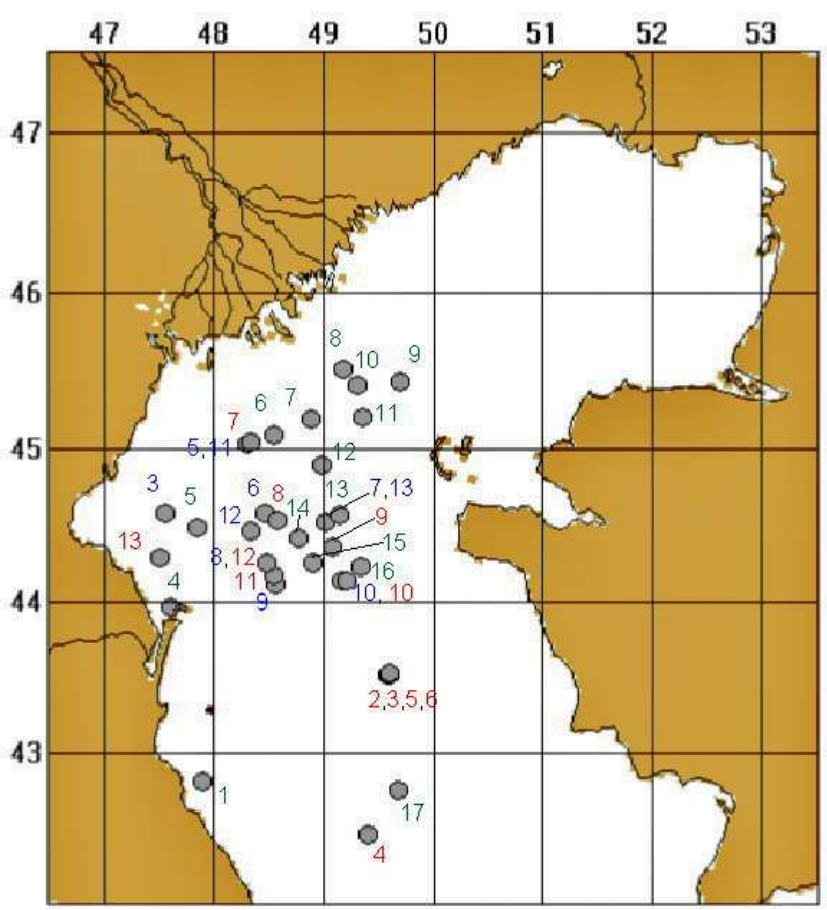
Региональный алгоритм коррекции ошибок атмосферной коррекции для Баренцева моря (Kopelevich et al. 2003)



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).

Статистический анализ информационного содержания спутниковых данных сканера цвета SeaWiFS



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

Анализ проводился по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS за 2006 и 2007 гг. в период с июня по октябрь для трех точек в северной половине Каспийского моря:

1. 45.1N, 48.55E;

2. 44.25N, 48.92E;

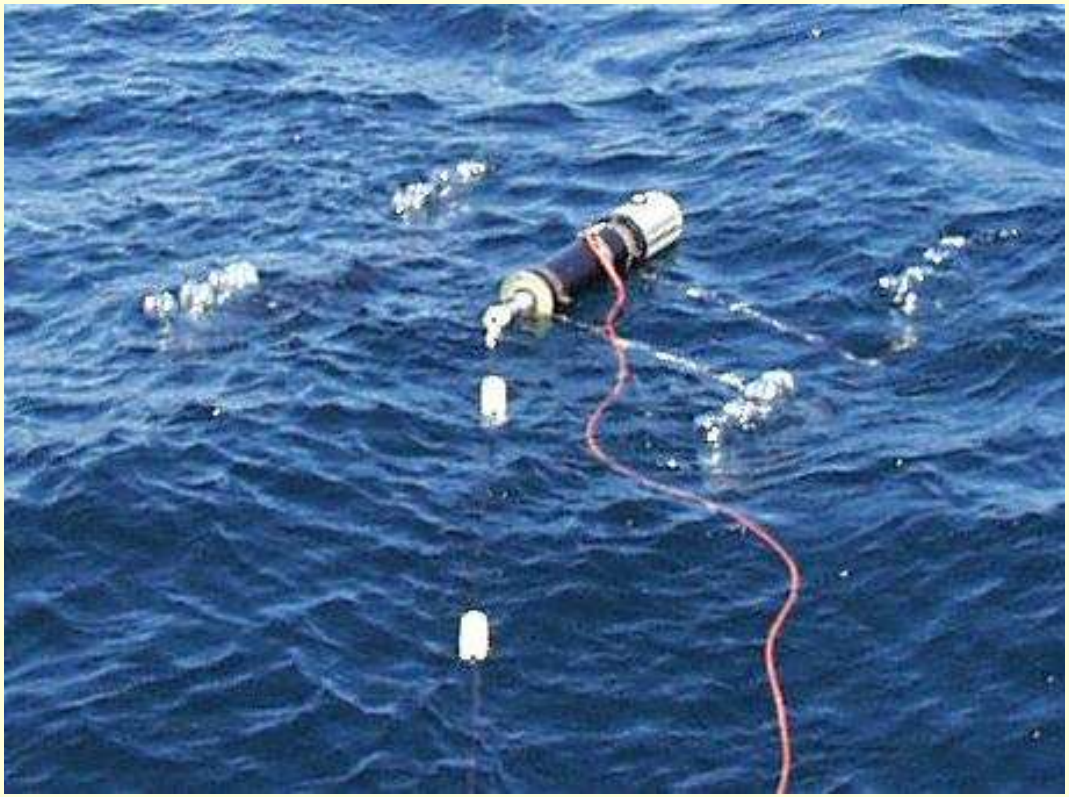
3. 43.88N, 50.00E.

Первая точка – мелководье (глубина ≈7м),

вторая – вблизи границы между Северным и Средним Каспием (глубина ≈ 25 м),

третья – в Среднем Каспии (глубина ≈ 60 м).

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%.

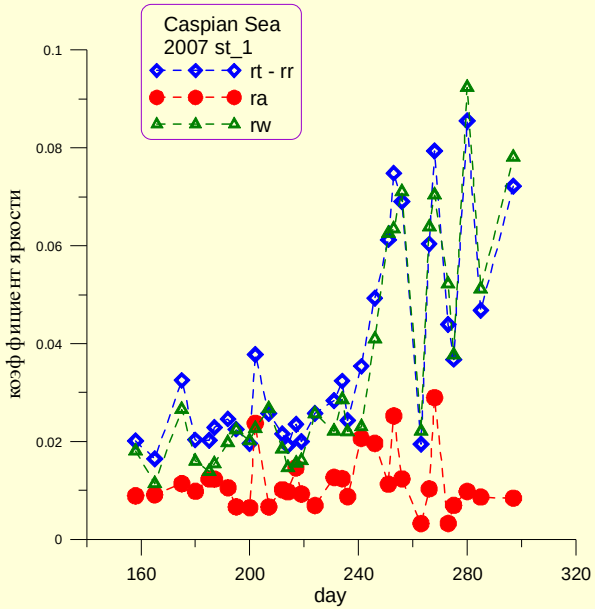
Для указанных точек были отобраны данные SeaWiFS, для которых углы наблюдения не превышали 45°, а область вокруг рассматриваемой точки была свободна от облаков в радиусе не менее 12 км от этой точки.

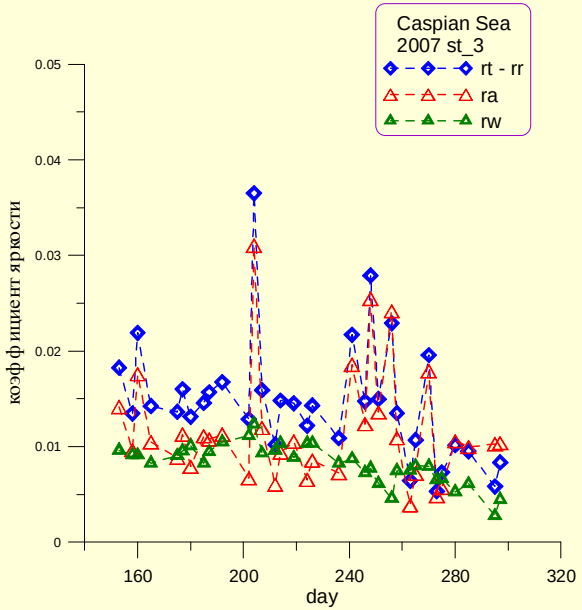
Для каждого отобранного изображения рассчитывались значения $\rho_t - \rho_r$, ρ_a и ρ_w для 8 спектральных каналов сканера SeaWiFS: 412, 443, 490, 510, 555, 670, 765 и 865нм.

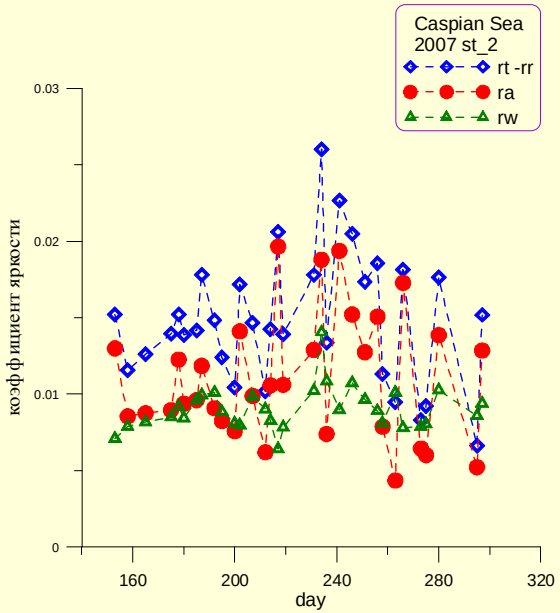
Затем для каждой из выборок данных $\rho_t - \rho_r$, ρ_a и ρ_w за 2006 и 2007 гг. рассчитывались средние спектральные величины, среднеквадратические отклонения, ковариационные и корреляционные матрицы, собственные числа и собственные векторы ковариационных матриц, факторные нагрузки.

Анализировались временные зависимости всех указанных параметров за весь период наблюдений (июнь – октябрь) для каждой из точек и каждого года наблюдений. Заметных отличий между годами обнаружено не было.

Анализ временных зависимостей





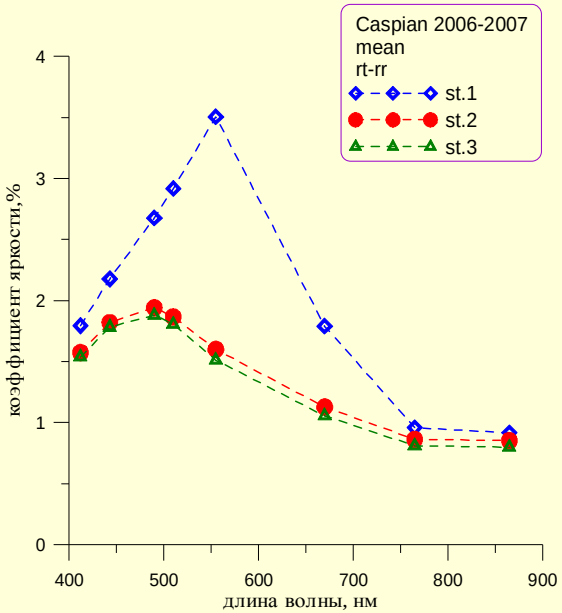


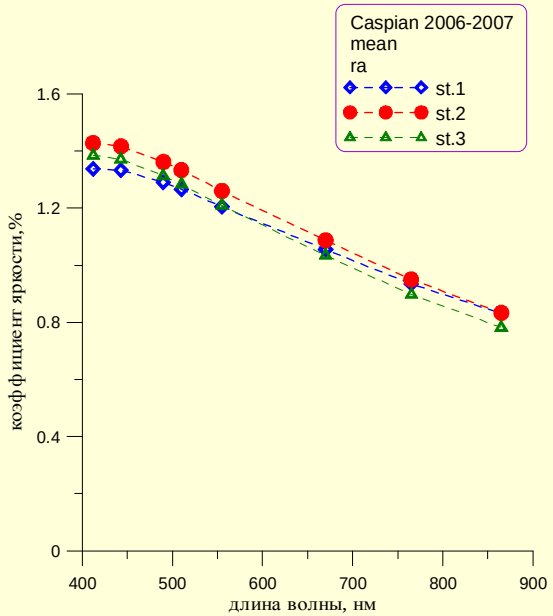
Временные зависимости $\rho_t - \rho_r$, ρ_a и ρ_w в 2007 г. для спектрального канала 555 нм в трех выбранных точках.

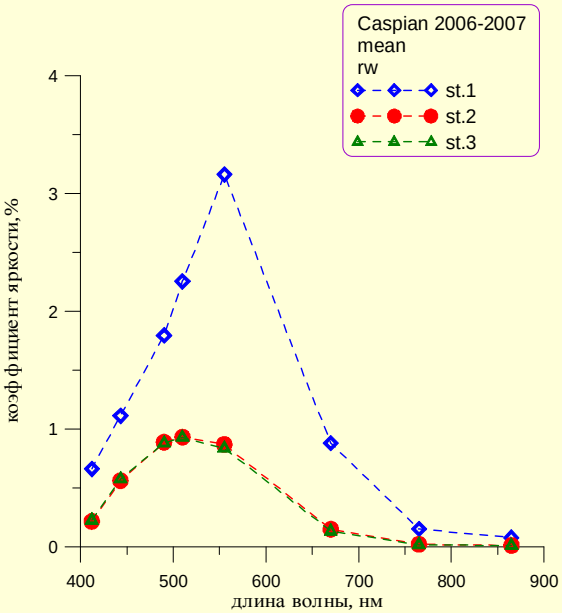
В точке 1 преобладающий вклад в суммарную яркость $\rho_t - \rho_r$ вносит яркость водной толщи ρ_w ; наблюдается существенное возрастание ρ_w и $\rho_t - \rho_r$ в осенний период, что может быть связано со штормовыми условиями, вызывающими взмучивание донных осадков, и/или с проникновением в этот район более мутных волжских вод.

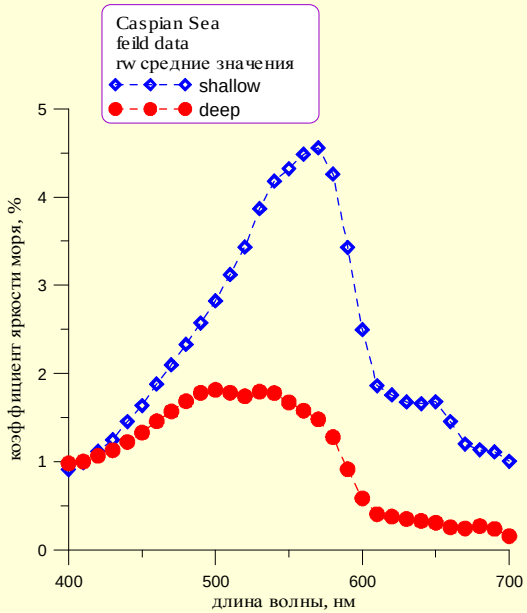
В точках 2 и 3 преобладает вклад атмосферной дымки.

Средние спектральные величины









Верхний ряд - $\rho_t - \rho_r$ (слева) И ρ_a (справа).

Нижний ряд - ρ_w слева по данным спутниковых измерений, справа – судовых.

Анализ собственных значений ковариационных матриц и факторных нагрузок

Величины	$\rho_t - \rho_r$			ρ_a			ρ_w		
Собствен. векторы	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й

Точка 1

Суммарная дисперсия	10.838			2.743			11.468		
Собствен. знач., %	94.0	4.0	1.6	98.2	1.8	<0.1	97.3	2.1	0.4

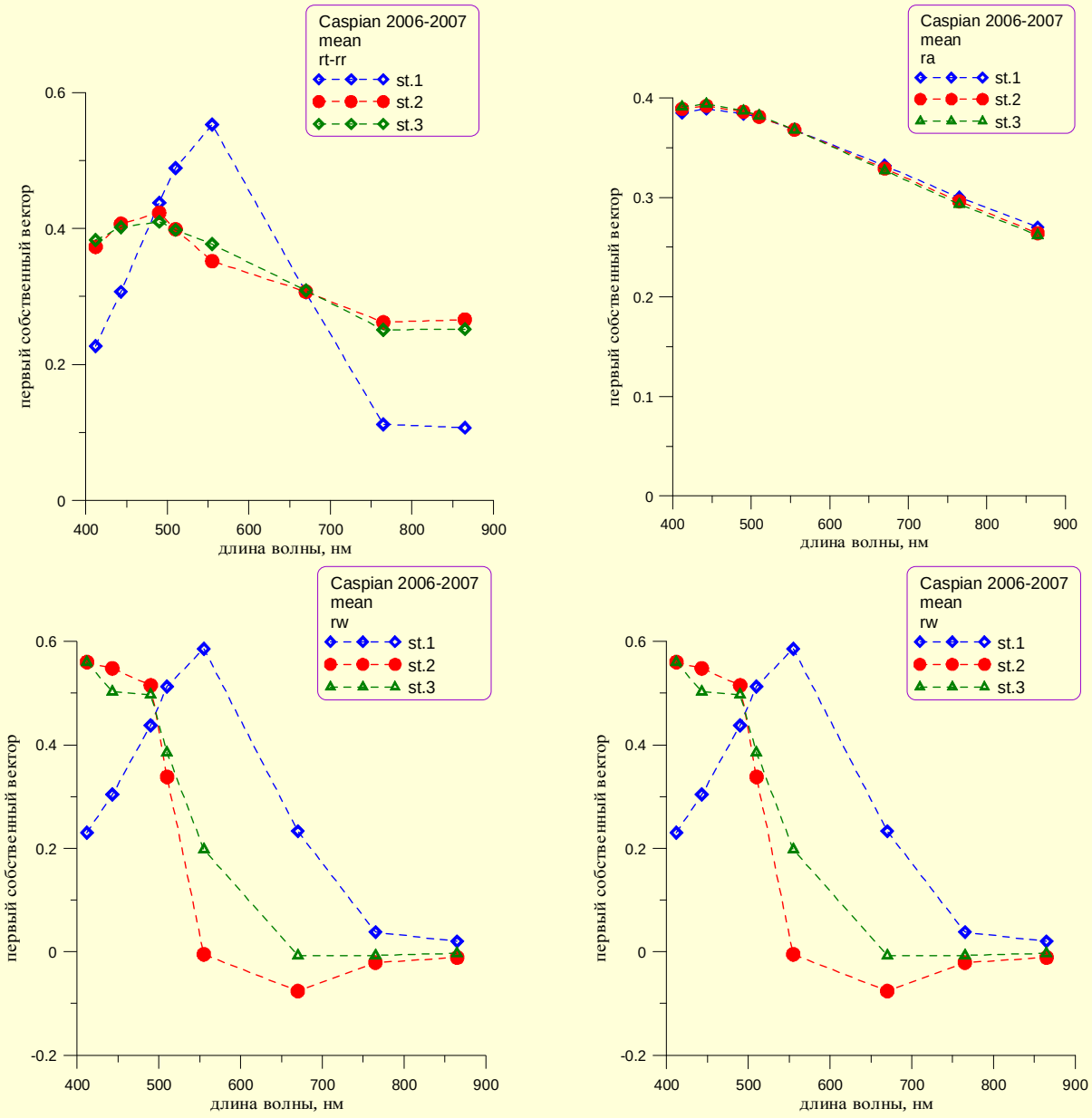
Точка 2

Суммарная дисперсия	2.252			2.282			0.286		
Собствен. знач., %	95.5	3.4	0.7	97.5	2.5	<0.1	87.1	8.7	3.5

Точка 3

Суммарная дисперсия	2.231			2.224			0.523		
Собствен. знач., %	94.2	4.4	0.8	98.5	1.5	<0.1	93.7	3.6	2.5

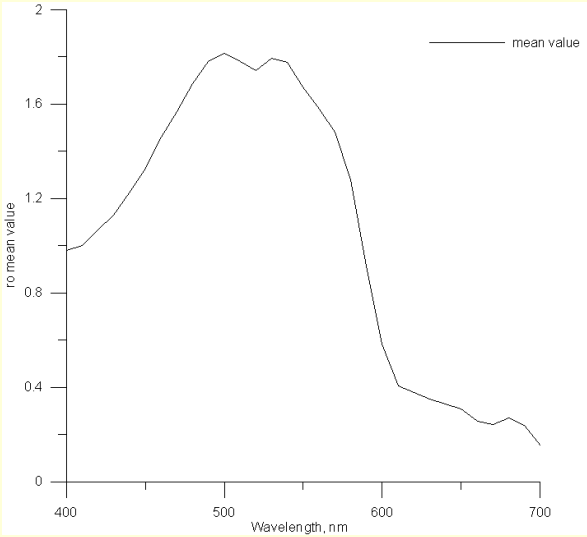
1-й собственный вектор

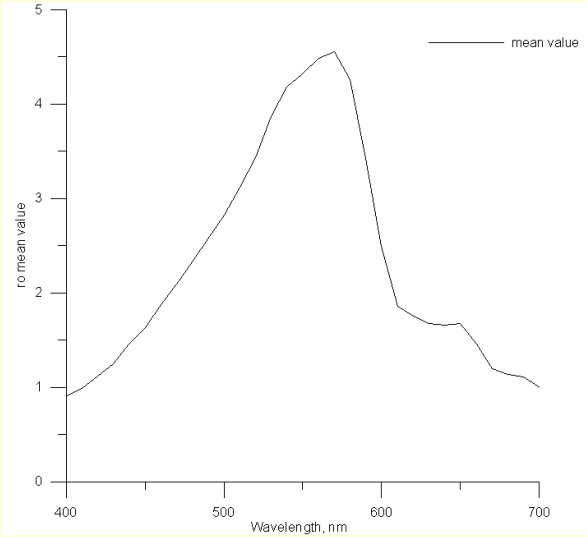


Верхний ряд - $\rho_t - \rho_r$ (слева) и ρ_a (справа).

Нижний ряд - ρ_w слева по данным спутниковых измерений, справа – судовых.

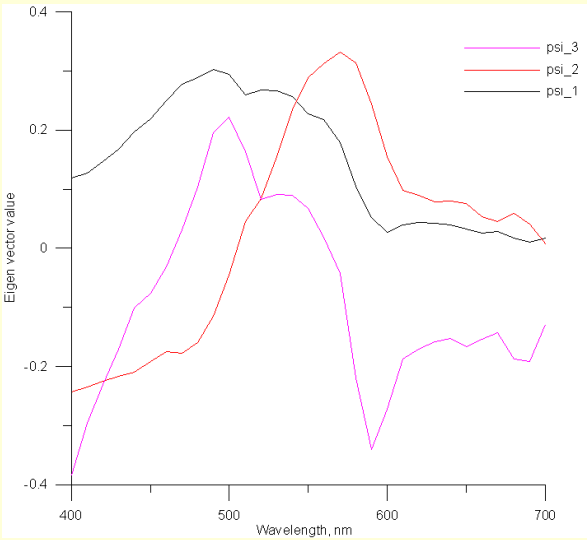
Две системы базовых функций для спектрального коэффициента яркости $\rho_w(\lambda_i)$

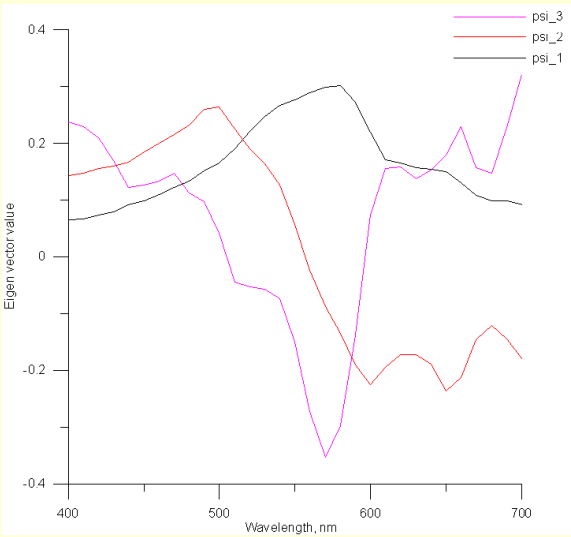




$$\rho_w(\lambda_i) = \\ = \langle \rho_w(\lambda_i) \rangle + \Sigma\, c_k \cdot \Psi_k(\lambda_i), \\ k = 1, 2, 3.$$

Спектральные ошибки аппроксимации не превышают 0.002.

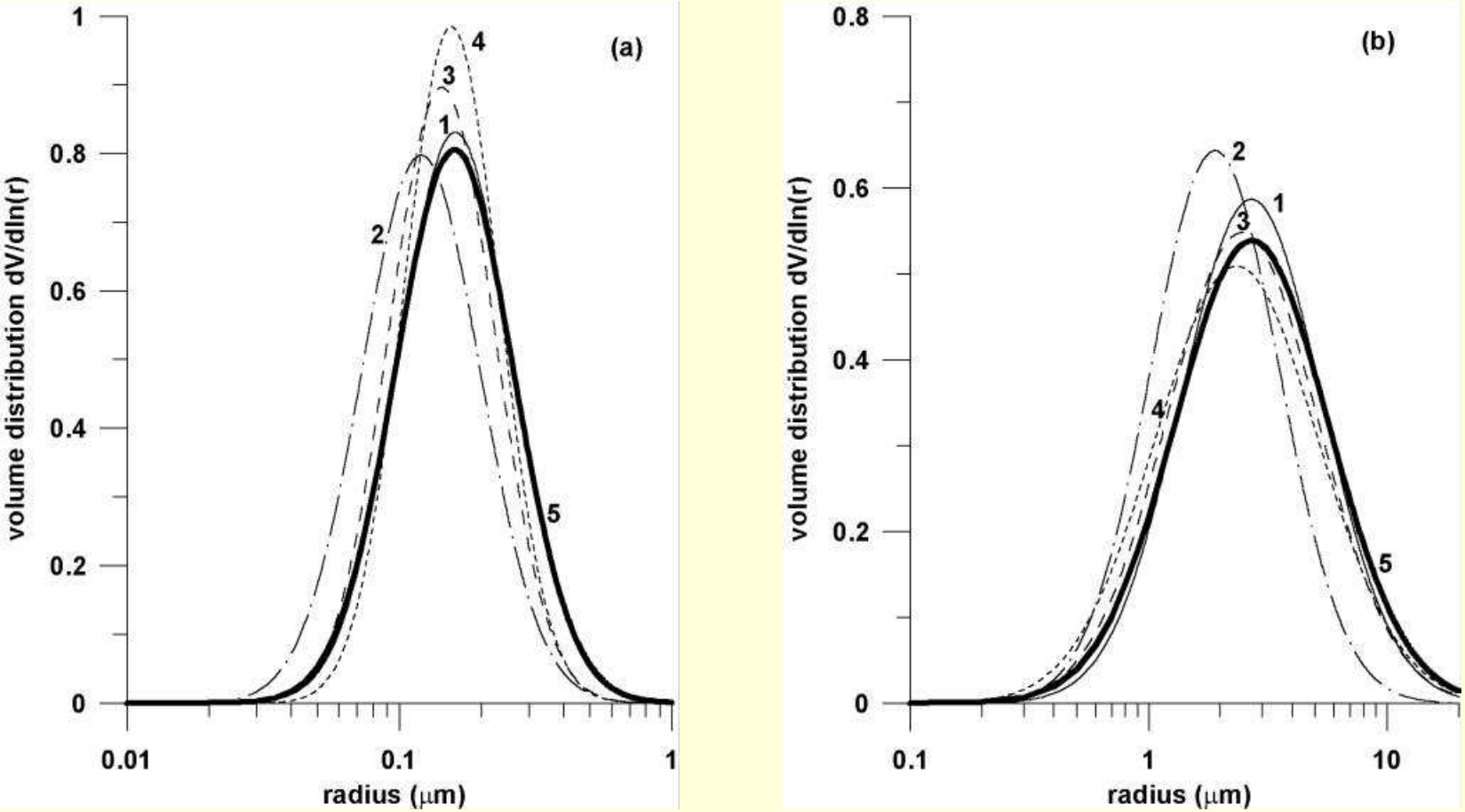




Глубокое море

Мелкое море

Оптическая модель атмосферного аэрозоля



Объемные распределения аэрозольных частиц мелкой (a) и крупной (b) фракций, нормированные на общую объемную концентрацию каждой из фракций.
1 – Ланаи (Гавайские о-ва); 2 – острова Зеленого мыса; 3 – Бермудские острова, 4 – Каасиджу (Мальдивские о-ва), 5 – средние распределения.

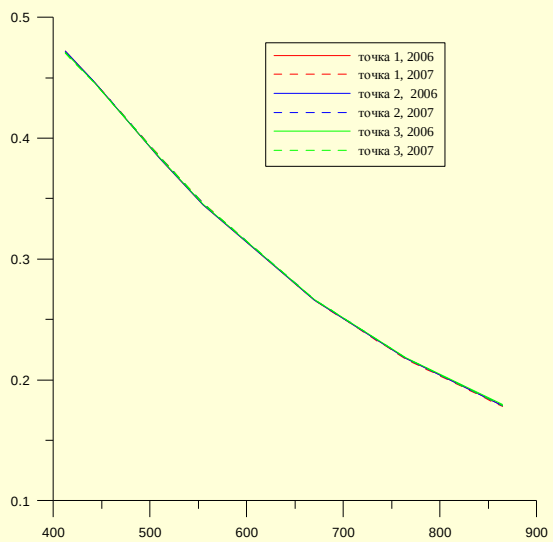
Аэрозольная яркость

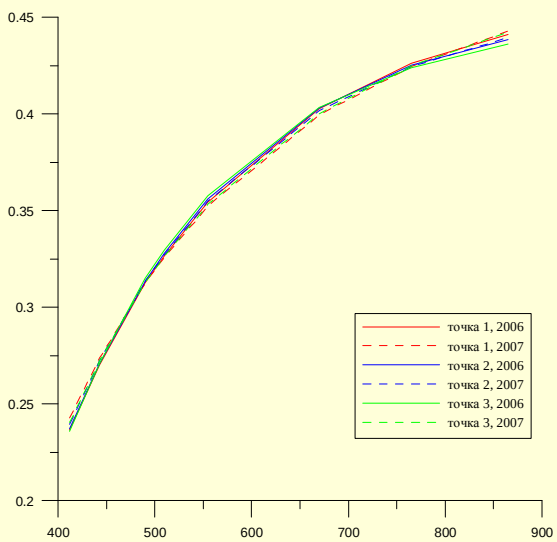
Для коэффициента аэрозольной яркости $\rho_a(\lambda_i)$ используется следующая двухпараметрическая модель:

$$\rho_a(\lambda_i) = c_{af}\,\rho_{af}(\lambda_i) + c_{ac}\,\rho_{ac}(\lambda_i),$$

где $\rho_{af}(\lambda_i)$ и $\rho_{ac}(\lambda_i)$ – базовые функции, соответствующие удельным коэффициентам мелкой (“fine”) и крупной (“coarse”) фракциям аэрозоля, c_{af} *и* c_{ac} - весовые коэффициенты.

Модель разработана на основе данных AERONET и верифицирована по данным SeaWiFS (Kopelevich et al. 2007). Величины $\rho_{af}(\lambda_i)$ и $\rho_{ac}(\lambda_i)$ для различных геометрий наблюдения рассчитаны точным методом и представлены в виде так называемых «*look-up-tables*».

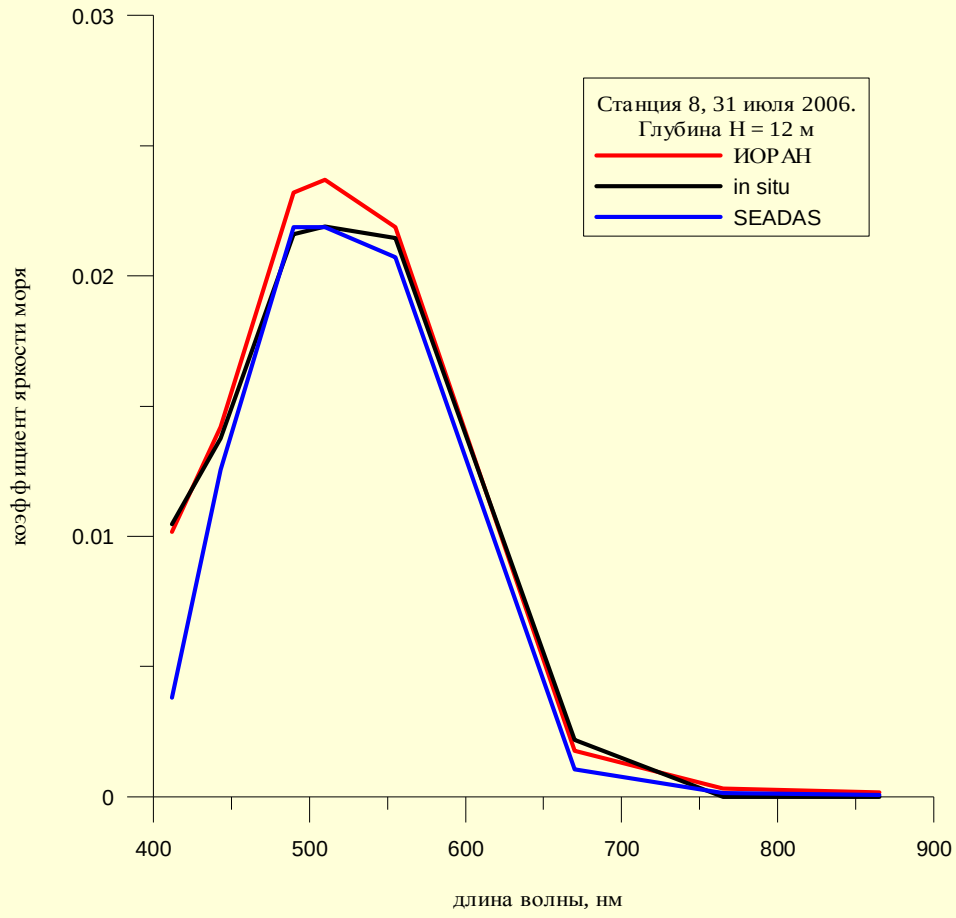




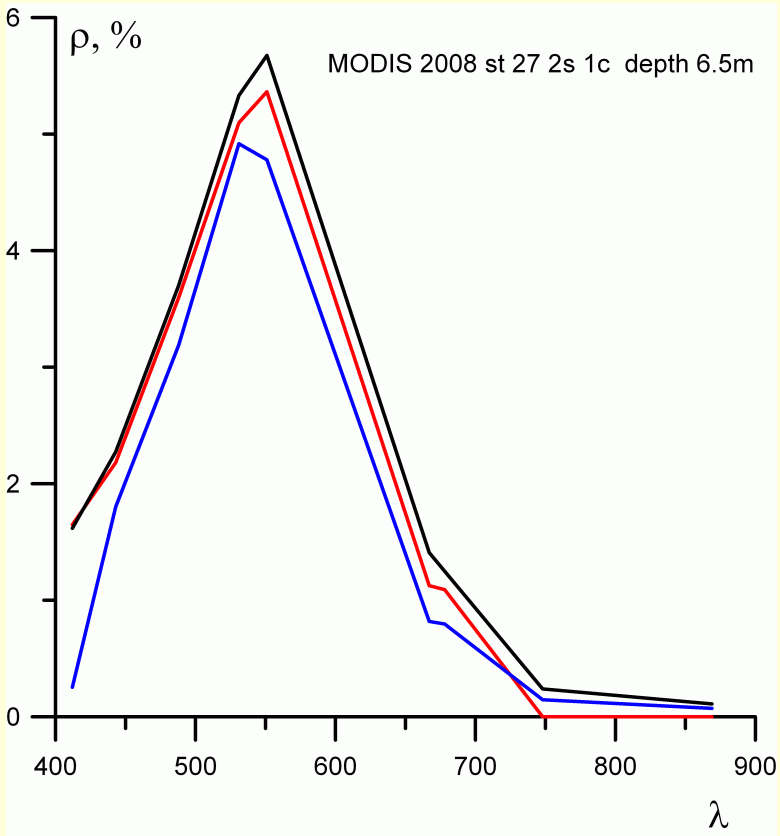
Средние нормированные спектры коэффициента аэрозольной яркости для мелкой (слева) и крупной (справа) фракций.

Модель хорошо аппроксимирует рассчитанные спектры аэрозольной яркости как для мелководных, так и глубоководных Станций.

Применение нового алгоритма с использованием системы базовых функций для мелководных станций

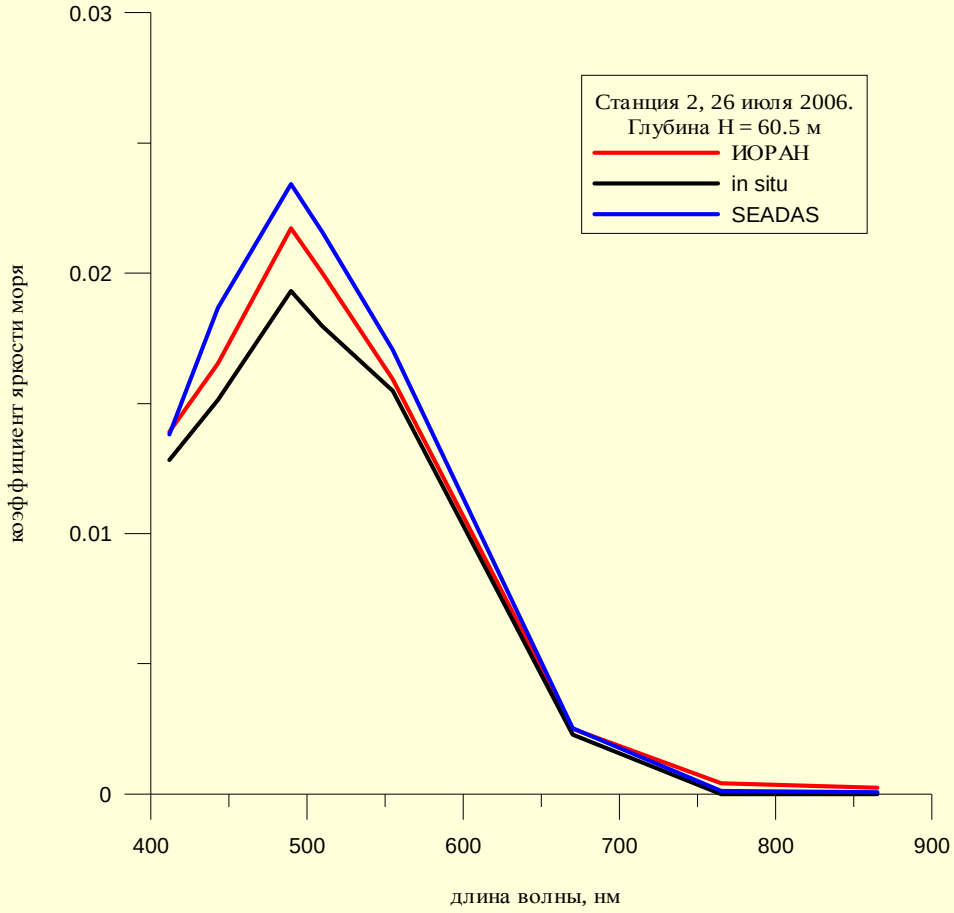


Ст.8, 31 июля 2006 г. Глубина 12 м.

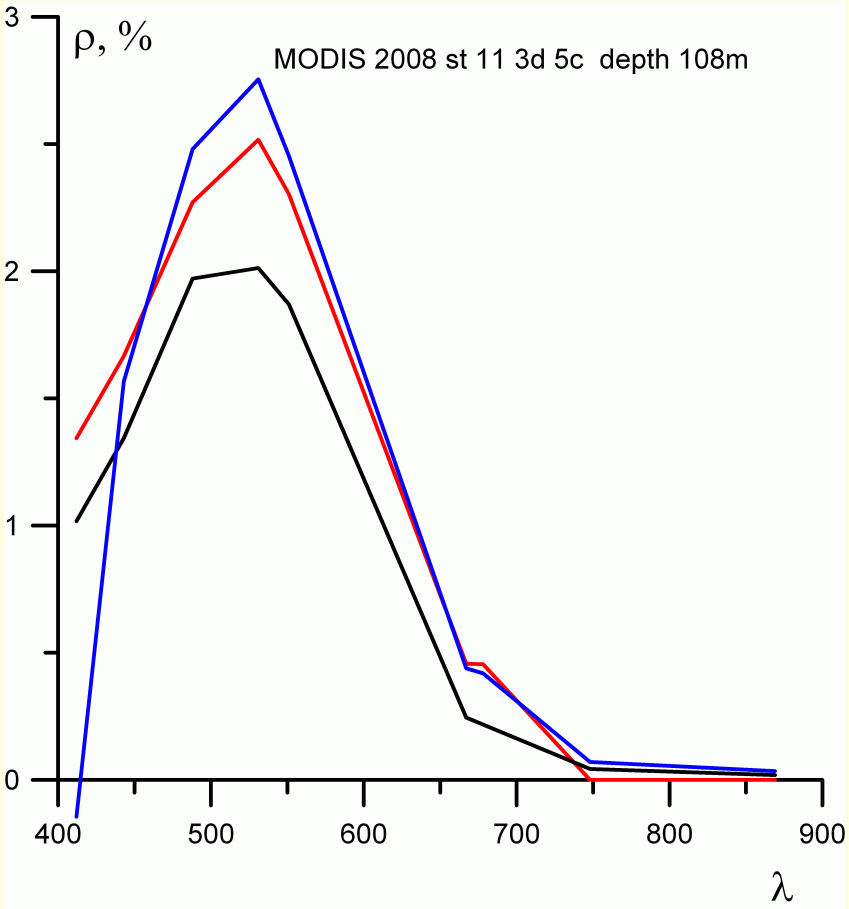


Ст.27, 3 августа 2008 г. Глубина 6.5 м.

Применение нового алгоритма с использованием системы базовых функций для глубоководных станций



Ст.2, 26 июля 2006 г. Глубина 60.5 м.



Ст.11, 25 июля 2008 г. Глубина 108 м.

Заключение

1. Предложен новый подход к решению задачи атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета, основанный на использовании региональных алгоритмов, учитывающих особенности изучаемых акваторий.

2. Такие алгоритмы могут быть разработаны на основе статистического анализа спутниковых данных для рассматриваемой акватории и анализа имеющихся данных натурных измерений.

3. Применимость предлагаемого подхода показана на примере мелководных и глубоководных районов северной половины Каспийского моря. Рассчитаны системы базовых функций для мелководной части Северного Каспия и глубоководной

4. Поскольку расчеты проводились по данным натурных измерений, система базовых функций для мелководья учитывает вклад отражения ото дна.

Спасибо за внимание.

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