

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

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

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997 Москва, Нахимовский пр., 36
E-mail: oleg@sio.rssi.ru*

Данные спутниковых сканеров цвета позволяют рассчитать оптические характеристики воды в поверхностном слое моря, важные биогеохимические параметры, такие как концентрация хлорофилла и взвеси, содержание окрашенного органического вещества, оценить баланс фотосинтетически активной солнечной радиации и первичную биопroduкцию. Однако использование стандартных алгоритмов обработки спутниковых данных может приводить к значительным ошибкам для большинства морей России, поскольку эти алгоритмы не учитывают региональную специфику изучаемых морей. Для каждого региона требуется специальная верификация используемых алгоритмов обработки по данным натурных измерений; последние являются основой для разработки региональных алгоритмов. В Институте океанологии РАН такая работа проведена для Баренцева, Белого, Черного, Каспийского и Японского морей.

В статье рассматриваются проблемы разработки региональных алгоритмов, включая требования к измеряемым *in situ* характеристикам, уменьшение влияния ошибок атмосферной коррекции, определение региональных значений параметров малопараметрических моделей, оценка ошибок. Даны примеры полученных результатов.

Введение

Спутниковые измерения цвета океана относятся к числу наиболее широко используемых в настоящее время видов спутниковых наблюдений, они экономически эффективны и обеспечивают большой объем полезной информации о подповерхностном слое вод морей и океанов.

В настоящее время наиболее широко используются данные спутниковых сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), а наиболее затребованная характеристика, определяемая по данным этих сканеров, - концентрация хлорофилла. Этот параметр характеризует биомассу фитопланктона и является ключевой характеристикой для расчета первичной продукции океанов и морей; это единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Однако возникает естественный вопрос о точности получаемых данных, о том, насколько они адекватны реальным значениям, в частности для морей России.

Наиболее простой путь исследования этой проблемы - прямое сопоставление результатов расчета различных характеристик по спутниковым данным и по данным измерений. Такое сравнение, выполненное для концентраций хлорофилла a , рассчитанных по данным спутниковых сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua, с данными измерений на пробах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии HPLC (http://seabass.gsfc.nasa.gov/matchup_results.html), показало, что во многих случаях расхождения между рассчитанными и измеренными значениями концентрации довольно велики - для данных SeaWiFS (где число сравниваемых пар данных почти в 5 раз больше, чем для данных MODIS) нередки расхождения на порядок и даже больше.

Для морей России наши данные показывают существенное завышение значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по спутниковым данным, по сравнению с измеренными. Для Баренцева моря обнаружено завышение в 4-23 раза, для Черного моря - в 1.7-2.1 раза [1]; в северной половине Каспийского моря - в 1.6-21 раз.

Возможные причины ошибок и их оценка по данным измерений *in situ*

Спутниковые сканеры цвета измеряют спектральную яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы $L_t(\lambda_i)$, и первый этап обработки спутниковых данных – их атмосферная коррекция. Задача атмосферной коррекции – определение спектральных значений яркости излучения, вышедшего из водной толщи, $L_w(\lambda_i)$ по измеренным значениям $L_t(\lambda_i)$, которые обусловлены совокупностью нескольких факторов:

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i), \quad (1)$$

где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, молекулярным рассеянием в атмосфере (рэлеевское рассеяние) и многократным рассеянием аэрозолем, включая взаимодействие рэлеевского и аэрозольного рассеяния (оба члена включают отражение от морской поверхности); $L_g(\lambda_i)$ и $L_{wc}(\lambda_i)$ – яркости, обусловленные, соответственно, зеркальным отражением прямых солнечных лучей (солнечные блики) 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.

Второй этап обработки – расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_w(\lambda_i)$, найденным в результате атмосферной коррекции, посредством так называемых «биооптических» алгоритмов. Очевидно, что успешное решение задачи второго этапа возможно лишь при условии хорошо выполненной атмосферной коррекции, поскольку ее ошибки могут существенно исказить или даже сделать невозможным расчет биооптических параметров воды.

Контроль ошибок атмосферной коррекции выполняется посредством измерений значений яркости $L_w(\lambda_i)$ *in situ* и их последующего сравнения со значениями, рассчитанными по спутниковым данным. В Институте океанологии РАН (ИОРАН) для этой цели используется плавающий спектрорадиометр (рис. 1).

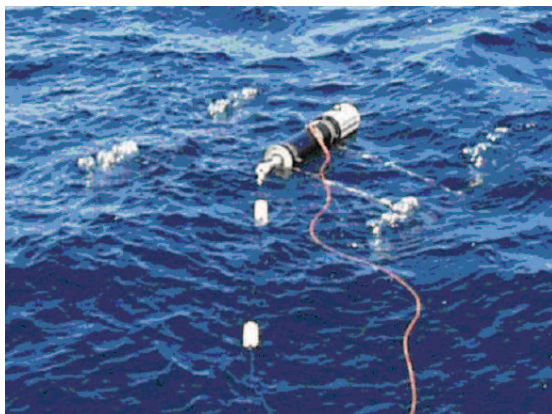


Рис. 1. Плавающий спектрорадиометр, используемый для подспутниковых измерений [2]

Прибор 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%.

Результирующие ошибки расчета биооптических параметров воды по спутниковым данным складываются как из ошибок атмосферной коррекции, так и из ошибок биооптических алгоритмов. Данные измерений, полученные плавающим спектрорадиометром, дают возможность разделить эти ошибки. Измеряемые этим прибором значения спектральной яркости $L_w(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи, во-первых, дают прямую оценку ошибок атмосферной коррекции, а во-вторых, являются исходными для расчета биооптических параметров воды. Поскольку эти значения $L_w(\lambda_i)$ не искажены ошибками атмосферной коррекции, ошибки, возникающие при расчете биооптических параметров, обусловлены только ошибками используемых биооптических алгоритмов.

Для контроля последних необходимы прямые измерения определяемых биооптических характеристик: концентрации хлорофилла, оптических характеристик воды, концентрации взвеси и других биогеохимических параметров. Если речь идет об оценке концентрации хлорофилла, то минимальный набор, требуемый для анализа ошибок ее расчета по спутниковым данным, - это данные измерений спектральной яркости излучения, выходящего из водной толщи, и самой концентрации хлорофилла.

Атмосферная коррекция

Алгоритм атмосферной коррекции для сканеров цвета SeaWiFS и MODIS далек от совершенства и может давать большие ошибки на краях видимой области спектра. 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. Стандартный алгоритм атмосферной коррекции, используемый при обработке данных сканера SeaWiFS и MODIS, основан фактически на использовании лишь двух спектральных каналов в ближней инфракрасной области, для которых предполагается, что яркость излучения, выходящего из водной толщи, равна 0. Это предположение, как правило, нарушается в мутных прибрежных водах. Хотя в нынешнем алгоритме атмосферной коррекции для таких случаев предусмотрен итерационный метод учета ненулевой яркости, он полностью не решает проблемы и требует дополнительного компьютерного времени. Другой недостаток – использование для подбора аэрозольной модели лишь одной величины - отношения аэрозольных яркостей для двух длин волн в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Это отношение изменяется для разных типов аэрозоля в сравнительно небольших пределах, и в подборе модели достаточно легко ошибиться. Эта ошибка может приводить к большим ошибкам в коротковолновых спектральных каналах; в частности нередки случаи, когда используемый метод атмосферной коррекции приводит к отрицательным значениям $L_w(\lambda_i)$ при $\lambda_i = 412$ и 443 нм.

Учитывая вышесказанное, целесообразно использовать 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 [3].

Пример такой коррекции показан на рис.2 для одной из станций в Баренцевом море [3].

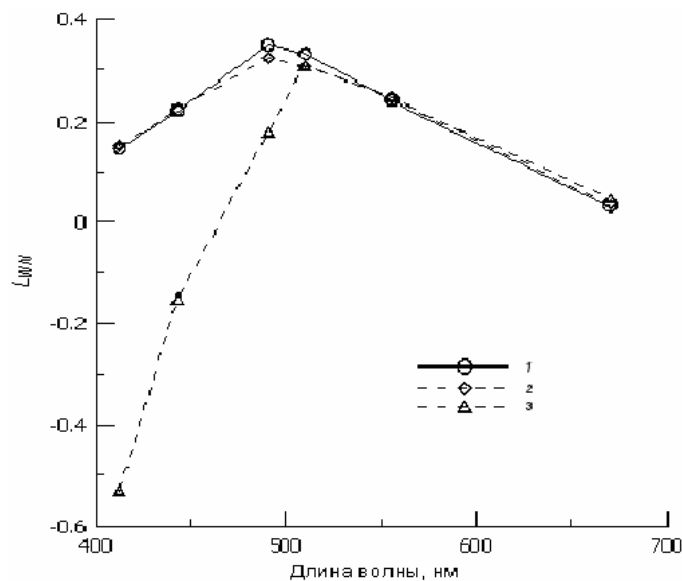


Рис. 2. Ст. 1131 в Баренцевом море (69.77N, 56.28E): кружочки – данные измерений *in situ*; треугольники – атмосферная коррекция посредством алгоритма SeaWiFS; ромбики – коррекция ошибок атмосферной коррекции

Используемый алгоритм коррекции разработан на основе данных измерений спектрального коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, выполненных в Баренцевом море плавающим спектрорадиометром. Для массива измеренных спектров $\rho(\lambda)$ рассчитаны ковариационная матрица, ее собственные векторы и построена система функций, позволяющая восстанавливать спектральные значения $L_w(\lambda_i)$ по спутниковым значениям этой величины лишь для двух каналов (у сканера SeaWiFS - 510 и 555 нм).

Как видно, стандартный алгоритм атмосферной коррекции (треугольники) сильно занижает, по сравнению с измеренными *in situ* (кружочки), значения яркости восходящего излучения на длинах волн 412-490 нм, но дает вполне приемлемые значения при длинах волн 510-670 нм. Коррекция спектра, выполненная на основе спутниковых значений при 510 и 555 нм, обеспечивает удовлетворительное совпадение спектров при всех длинах волн.

В ИОРАН разработан усовершенствованный алгоритм атмосферной коррекции, примеры применения которого, в сравнении со стандартным алгоритмом атмосферной коррекции, показаны для двух станций в Каспийском море на рис. 3.

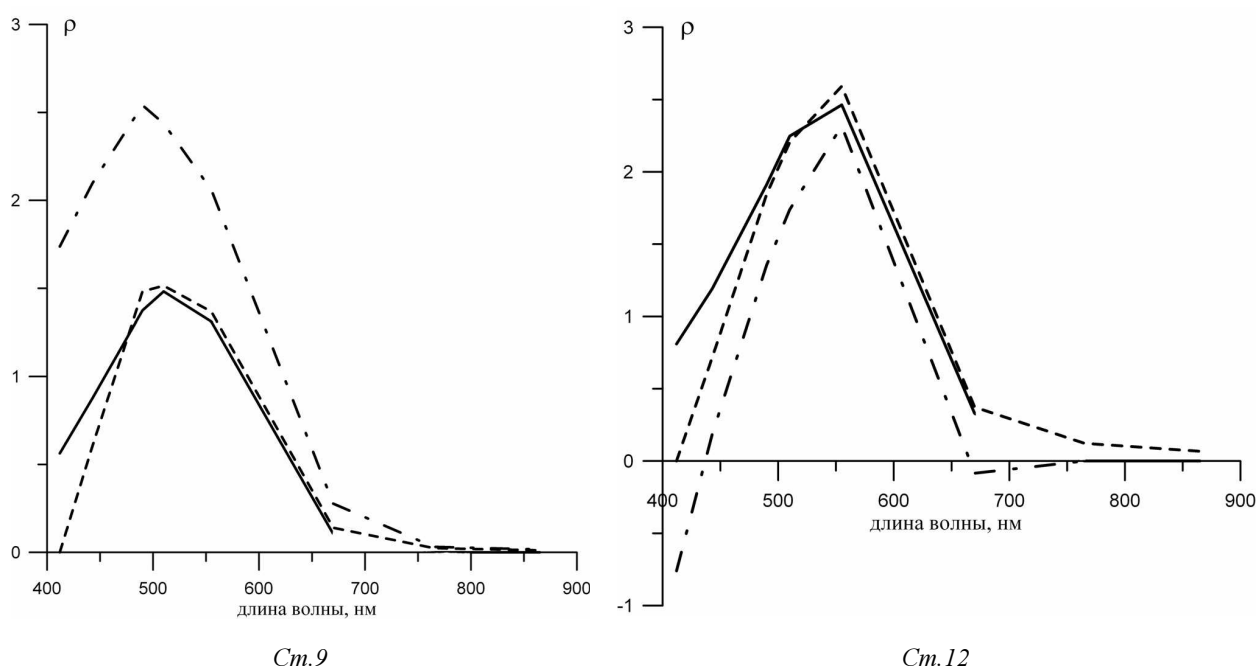


Рис. 3. Пример применения нового алгоритма ИОРАН (пунктир), в сравнении со стандартным алгоритмом атмосферной коррекции (штрих-пунктир). Сплошная линия – данные измерений *in situ*. Каспийское море, 2003 г. Ст.9 – 44°12'с.ш., 48°56'в.д.; ст.12 – 44°48'с.ш., 48°34'в.д

Алгоритм 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 $\rho_f(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы (для удобства, уравнение (1) нормируется на спектральную облученность, создаваемую солнечным излучением на верхней границе атмосферы). 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 $\rho_f(\lambda_i)$ [4-6].

Как видно из рис. 3, новый алгоритм атмосферной коррекции дает гораздо лучшие результаты, чем стандартный.

Биооптические алгоритмы

Биооптические алгоритмы принято подразделять на «полуаналитические» и «эмпирические» (регрессионные).

Полуаналитические алгоритмы

Эти алгоритмы основаны на использовании аналитической формулы для коэффициента яркости водной толщи $\rho_w(\lambda)$ и малопараметрических моделей для показателей поглощения $a(\lambda_i)$ и рассеяния назад $b_b(\lambda_i)$ морской воды. В алгоритме ИОРАН [7] для коэффициента яркости водной толщи использовалась формула Lee et al. [8]:

$$\rho_w(\lambda) = \pi (0.070 + 0.155 X^{0.752}) X \quad (2)$$

где $X = b_b / (a + b_b)$.

Наши более поздние исследования показали, что при малых значениях X и низких высотах Солнца меньшие ошибки дает формула Morel, Gentili [9]:

$$\rho_w(\lambda) = 0.0922 \pi X / (1 - X) . \quad (3)$$

Показатели поглощения $a(\lambda)$ и рассеяния назад $b_b(\lambda)$ морской воды представляются как суперпозиция вкладов оптически активных компонентов морской воды [7]:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda), \quad (4)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda), \quad (5)$$

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.

Величины $a_{ph}(\lambda)$, $a_g(\lambda)$ и $b_{bp}(\lambda)$ представляются в виде:

$$a_p(\lambda) = C_a f_{ph}(\lambda), \quad (6)$$

$$a_g(\lambda) = a_g \exp(-S(\lambda - 440)), \quad (7)$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp} (\lambda/550)^{-n}. \quad (8)$$

В этих формулах C_a - концентрация хлорофилла а, a_g - показатель поглощения РОВ на длине волны $\lambda = 440$ нм и b_{bp} - показатель обратного рассеяния взвесью на длине волны 550 нм. Это количественные параметры, характеризующие содержание трех важных компонентов морской воды: фитопланктона, окрашенного органического вещества и взвешенных частиц. Вторые множители в (6)-(8) характеризуют спектральные зависимости поглощения и рассеяния этими компонентами: $f_{ph}(\lambda)$ - удельное поглощение пигментами, которое задается степенной функцией $f_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot C_a^{-B(\lambda)}$ [10]; S и n определяют (в логарифмическом масштабе) наклоны спектров поглощения РОВ и обратного рассеяния взвешенными частицами.

Мы имеем с некорректной обратной задачей, неустойчивость которой возрастает с увеличением числа неизвестных. Поэтому обычно предполагается, что упомянутые выше спектральные зависимости известны, и решается задача определения трех неизвестных параметров C_a , a_g и b_{bp} . В случае SeaWiFS используются данные для пяти спектральных каналов в видимой области: 412, 443, 490, 510 и 555 нм [7].

Строго говоря, неизвестных не три, а пять, поскольку наклоны спектров поглощения желтым веществом S и обратного рассеяния взвешенными частицами n могут отличаться в разных водах. Удельное поглощение пигментами также может варьировать в зависимости от видового состава

фитопланктона и иметь региональные и сезонные отличия от [10]. В полуаналитическом алгоритме надо учитывать также и влияние других факторов [11], таких как зависимость коэффициента яркости водной толщи от зенитных углов Солнца и наблюдения; вклады флуоресценции и комбинационное (Рамана) рассеяние (вклад последнего может быть до 20-30% в чистых олиготрофных водах и ~8% в водах с концентрацией хлорофилла порядка 1 мг м^{-3}); влияние отражения ото дна на мелководье.

Из-за вышеуказанных трудностей, а также из-за большой чувствительности полуаналитического алгоритма к ошибкам атмосферной коррекции, в настоящее время при обработке данных спутниковых сканеров цвета предпочтение отдается эмпирическим алгоритмам.

Эмпирические алгоритмы

Эмпирические (регрессионные) алгоритмы основаны на использовании рассчитанных по данным натурных измерений статистических соотношений между определяемым биооптическим параметром и отношением яркостей восходящего от поверхности излучения для выбранных длин волн. Эти статистические соотношения зависят от количественного и качественного состава вышеупомянутых оптически активных компонентов морской воды, который может сильно варьировать. По этой причине невозможно создать универсальные алгоритмы определения биооптических параметров воды, пригодные для использования во всех морях и океанах. В частности, эмпирические стандартные алгоритмы обработки данных спутниковых сканеров цвета SeaWiFS и MODIS дают, как уже отмечалось во Введении, плохие результаты для морей России, находящихся под сильным влиянием речного стока. Необходимы региональные (возможно, и сезонные) алгоритмы, разработанные по данным натурных измерений. Такие алгоритмы дают возможность существенно улучшить точность определения биооптических параметров, в частности, концентрации хлорофилла. Один из примеров дан в Таблице 1, где сравниваются значения концентрации хлорофилла в Северном и Среднем Каспии, измеренные *in situ* в экспедициях 2003 и 2004 гг. и рассчитанные по одновременным данным сканера SeaWiFS посредством стандартного и разработанного нами регионального алгоритма.

Таблица 1. Сравнение данных судовых и спутниковых измерений концентрации хлорофилла в Северном и Среднем Каспии в экспедициях 2003 и 2004 гг.

Год	2003							2004						
№ станции	3	5	6	7	8	9	12	4	6	7	8	14	15	17
Данные <i>in situ</i>	9.0	1.5	0.72	0.76	0.52	0.22	0.42	15.9	11.2	1.30	8.35	0.78	1.15	1.95
Стандартный алгоритм	15.8	9.4	4.9	4.6	11.1	0.78	4.38	28.2	22.6	6.1	20.9	1.34	1.85	4.6
Региональный алгоритм	3.8	2.9	1.7	1.3	0.64	0.46	1.0	8.8	8.7	1.9	8.35	0.41	0.52	0.55

Региональный алгоритм разработан по данным натурных измерений спектральной яркости излучения, выходящего из водной толщи, посредством плавающего спектрорадиометра и прямых определений концентрации хлорофилла на одновременно отобранных пробах морской воды. 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

$$Chl = A [L_{wn}(510)/L_{wn}(555)]^{-B} \quad (9)$$

Для Северного и Среднего Каспия значения констант A и B оказались равны 0.38 и 3.65.

Аналогичная работа была проделана нами для Баренцева и Черного морей, где значения констант оказались существенно отличны:

для Баренцева моря $A = 0.34$, $B = 1.39$;

для Черного – 0.88 и 2.26.

Результаты

Результаты расчетов биооптических характеристик для морей России по данным сканера цвета SeaWiFS с 1998 to 2004 гг. посредством разработанных нами алгоритмов представлены на CD-ROM [12], где даны среднемесячные распределения концентрации хлорофилла, показателей рассеяния назад взвешенными частицами и поглощения желтым веществом в Баренцевом, Белом, Черном, Каспийском и Японском морях (742 цветные карты), подробно описаны разработанные алгоритмы расчета и дан краткий анализ полученных результатов. Материалы, представленные на CD, доступны также на сайте: <http://manta.sio.rssi.ru/>.

Литература

1. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V et al.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Research II*, 2004. V. 51. P.1063-1091.
2. *Артемов В.А., Буренков В.И., Вортман М.И. и др.* Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*, 2000. Т. 40. №1. С. 148-155.
3. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В. и др.* Оценка баланса ФАР в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*, 2003. Т. 43. № 6. С. 834-845.
4. *Kopelevich, O.V., Burenkov, V.I., Ershova, S.V. et al.* Assessment of optical characteristics of atmosphere and ocean by data from satellite ocean color sensors // *Eight International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, Proc. SPIE 4678*. 2002. P. 332-343.
5. *Kopelevich, O.V., Sheberstov, S. V., Vazyulia, S.V. et al.* The optical spectral model of aerosol over oceans intended for atmospheric correction of satellite ocean color data // *Proceedings of II International Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW'2003)*. St.Petersburg, 2003. P.46-51.
6. *Kopelevich, O.V., Sheberstov, S.V., Vazyulia, S.V. et al.* An advanced low-parametric aerosol optical model and its use in the atmospheric correction of satellite ocean color data // *Proceedings of III International Conference "Current Problems in Optics of Natural Waters" (ONW'2005)*. St.Peterburg. 2005. P.299-304.
7. *Буренков В. И., Ведерников В. И., Ершова С. В и др.* Использование данных спутникового сканера цвета океана SeaWiFS для оценки биооптических характеристик вод Баренцева моря // *Океанология*, 2001. Т. 41. № 4. С. 485-490.
8. *Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D. et al.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. 1. A semianalytical model // *Appl. Opt.* 1998. V. 37. № 27. P. 6329-6338.
9. *Morel A., Gentili B.* Diffuse reflectance of oceanic waters. II. Bidirectional aspects // *Appl. Opt.* 1993. V. 32. P. 6864-6879.
10. *Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 100, No. C7. P. 43-53.
11. *Mueller J.L., Morel A., Frouin R. et al.* Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols // *NASA Tech. Memo. 211621*. NASA Goddard Space Flight Center. Greenbelt, Maryland. 2003. 78 p.
12. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. et al.* Bio-optical characteristics of the seas of Russia from data of the SeaWiFS satellite ocean color scanner. CD-ROM. Moscow. SIO RAS. 2005.