

УДК 551.465

© М.В.Лихачева, О.В.Копелевич, С.В.Шеберстов, 2012

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

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

likhacheva.m@gmail.ru

## МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АТМОСФЕРНОЙ КОРРЕКЦИИ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО СКАНЕРА MODIS

Представлен новый подход к проведению атмосферной коррекции (АК) для спутникового сканера цвета MODIS, объединяющий разработанные ранее алгоритмы АК в области солнечного блика и малопараметрический алгоритм АК. Разработан пакет программ, позволяющих проводить атмосферную коррекцию для спутникового изображения MODIS. Полученные с помощью модифицированного алгоритма спектральные коэффициенты яркости воды для Каспийского моря и некоторых акваторий открытого океана в большинстве случаев лучше совпадают с данными *in situ*, чем полученные с помощью алгоритма SeaDAS 6.1. Увеличивается количество пикселей, для которых может быть решена обратная задача.

**Ключевые слова:** атмосферная коррекция, солнечный блик, спутниковые сканеры цвета.

Атмосферная коррекция (АК) – первый и важнейший этап обработки данных спутниковых сканеров цвета. Ее задача – выделение яркости вышедшего из воды излучения по значениям суммарной яркости, регистрируемой спутниковым датчиком на верхней границе атмосферы. Поскольку вклад вышедшего из воды излучения относительно мал, проблема АК остается одной из наиболее трудных и до конца нерешенных задач обработки спутниковых данных.

АК включает учет излучения, рассеянного в атмосфере и отраженного от морской поверхности. Последнее создается как рассеянным светом небосвода, так и прямым солнечным излучением – солнечным бликом, который при соответствующих углах солнца и наблюдения, в зависимости от состояния поверхности, может приводить к полной потере данных о выходящем из воды излучении. У сканера цвета SeaWiFS подобные ситуации частично устранялись тем, что плоскость сканирования спутникового датчика отклонялась от солнечного блика на угол  $\pm 20^\circ$ , однако у сканера цвета MODIS такой возможности нет. Поэтому на изображениях, получаемых этим сканером, достаточно часто можно видеть большие эллипсовидные области, где из-за солнечного блика данные отсутствуют. Полностью устранить наблюдаемую потерю данных невозможно, и речь может идти лишь о том, чтобы сократить область этой потери.

Ранее нами был представлен алгоритм коррекции данных спутникового сканера MODIS на солнечный блик без привлечения дополнительной информации о скорости ветра [1]; этот алгоритм был верифицирован по данным расчетов для отдельных пикселей. Однако его практическое использование требовало разработки пакета программ, реализующих атмосферную коррекцию для всего снимка MODIS, «загрязненного» присутствием блика. Такой пакет был создан на основе объединения алгоритма [1] и малопараметрического алгоритма АК [2, 3]. Ниже представлены краткое описание разработанного пакета и результаты его верификации по данным натурных измерений в сравнении со стандартным алгоритмом SeaDAS 6.1. Для верификации были подобраны и обработаны изображения MODIS для некоторых акваторий открытого океана и Каспийского моря, содержащие области солнечного блика.

**Стандартный алгоритм атмосферной коррекции.** Яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы  $L_t(\lambda)$  представляет собой суперпозицию вкладов молекулярного рэлеевского рассеяния в атмосфере  $L_r(\lambda)$ , многократного аэрозольного рассеяния  $L_a(\lambda)$ , отраженного прямого солнечного излучения от взволнованной морской поверхности  $L_g(\lambda)$ , вышедшего из воды излучения  $L_w(\lambda)$  и диффузного отражения пеной  $L_{wc}(\lambda)$ , с учетом переноса через атмосферу:

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

где  $T(\lambda)$  и  $t(\lambda)$  – направленный и диффузный коэффициенты пропускания атмосферы. Вклад отражения от поверхности диффузного света неба в формуле (1) учтен в рэлеевском слагаемом  $L_r(\lambda)$ . Как показывают расчеты [4], для аэрозольной яркости  $L_a(\lambda)$  этот вклад несуществен.

Стандартный алгоритм АК основан на работах [5–6] и реализован в пакете программ SeaDAS (SeaDAS Home Page <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>). Вклад молекулярного рассеяния в (1) определяется с хорошей точностью для каждой длины волны [7]. Алгоритм определения аэрозольного вклада основан на предположении, что для волн длиной 748 и 869 нм ближнего инфракрасного диапазона (NIR) вышедшим из воды излучением можно пренебречь. В таком приближении, используя спектральные зависимости, по таблицам (lookup tables) подбирается тип аэрозоля и яркость аэрозольного вклада  $L_a(\lambda)$  экстраполируется в видимый диапазон [5].

Для определения вклада отраженного излучения используется статистическая модель ориентации водных площадок Кокса и Манка [8], параметры которой – углы солнца и наблюдения, а также скорость и направление ветра. Стандартные алгоритмы используют информацию о ветре, предоставленную центром NCEP (National Center for Environmental Prediction), измеряемую каждые 6 ч, осредненную по площади  $1^\circ$  на  $1^\circ$ , что существенно превышает размеры одного пикселя. Фактическое состояние морской поверхности в конкретном пикселе и в конкретный момент времени может значительно отличаться от средних метеорологических, что приводит к значительным погрешностям стандартных алгоритмов в зоне блика.

Яркость вышедшего из воды излучения  $t(\lambda)L_w(\lambda)$  на верхней границе атмосферы вычисляется как разность между измеренной яркостью атмосферы  $L_t(\lambda)$  и другими составляющими в правой части уравнения (1).

**Малопараметрический алгоритм атмосферной коррекции.** Другой подход к атмосферной коррекции был предложен в работах [2, 3]. Он основан на одновременном определении неизвестных вкладов аэрозоля  $L_a(\lambda)$  и вышедшего из воды излучения  $L_w(\lambda)$  по измеренной сканером яркости на верхней границе  $L_t(\lambda)$ , с использованием данных как видимого, так и ближнего ИК-диапазона. Для аэрозольной яркости на основании данных AERONET разработана двухпараметрическая модель, верифицированная по данным SeaWiFS [2]:

$$L_a(\lambda) = c_{af}L_{af}(\lambda) + c_{ac}L_{ac}(\lambda), \quad (2)$$

где  $c_{af}$ ,  $c_{ac}$  – неизвестные коэффициенты;  $L_{af}(\lambda)$ ,  $L_{ac}(\lambda)$  – базисные функции разложения для крупной и мелкой фракций аэрозоля, которые были получены в работе [2] следующим образом: яркость на верхней границе атмосферы  $L_t(\lambda)$  вычислялась при решении уравнения переноса излучения точным методом с учетом многократного рассеяния (метод дискретных ординат) для системы, состоящей из трех слоев (водная поверхность, аэрозоль, рэлеевская атмосфера), и для системы из двух слоев  $L_{t0}(\lambda)$  (водная поверхность, рэлеевская атмосфера). Аэрозольная яркость на верхней границе атмосферы равна разности  $L_t(\lambda)$  и  $L_{t0}(\lambda)$ . Такая процедура была проведена для моделей крупной и мелкой фракций аэрозоля. Ранее было показано, что базисные функции  $L_{af}(\lambda)$  и  $L_{ac}(\lambda)$  позволяют с приемлемой точностью аппроксимировать аэрозольные яркости и для океанских районов [2], и для таких закрытых водных бассейнов, как Каспийское море [12].

Яркость вышедшего из воды излучения  $L_w(\lambda)$  можно выразить через значение нормализованной яркости  $L_{wn}(\lambda)$  [9] (или коэффициента яркости моря  $Rrs(\lambda) = L_{wn}(\lambda)/F_0(\lambda)$ , где  $F_0(\lambda)$  – спектральное значение солнечной постоянной) следующим образом:  $L_w(\lambda) = L_{wn}(\lambda) \cdot \mu_0$ , где  $\mu_0$  – косинус зенитного угла солнца. Коэффициент яркости водной толщи  $\rho(\lambda) = \pi L_u(0^-)/E_d(0^-)$  представляет собой отношение яркости восходящего излучения  $L_u(0^-)$  к падающей облученности  $E_d(0^-)$  непосредственно под поверхностью воды и определяется в результате натурных измерений. Величина  $Rrs(\lambda)$  связана с  $\rho(\lambda)$  формулой [10]:

$$Rrs(\lambda) = 0.165 \cdot \rho(\lambda) / (1 - 0.497 \cdot \rho(\lambda)).$$

Для определения коэффициента яркости водной толщи использовались универсальная трехпараметрическая модель [11]

$$\rho(\lambda) = c_{1w}\Psi_{1w} + c_{2w}\Psi_{2w} + c_{3w}\Psi_{3w} \quad (3)$$

и региональная для Каспийского моря [12]

$$\rho(\lambda) = \rho_0(\lambda) + c_{1w}\Psi_{1w} + c_{2w}\Psi_{2w} + c_{3w}\Psi_{3w}, \quad (4)$$

где  $\rho_0(\lambda)$  – среднее значение коэффициента яркости;  $\Psi_{1w}, \Psi_{2w}, \Psi_{3w}$  – система базисных функций,  $c_{1w}, c_{2w}, c_{3w}$  – неизвестные коэффициенты.

Обратная задача решается методом наименьших квадратов с ограничениями и сводится к нахождению пяти неизвестных коэффициентов при этих базисных функциях, что позволяет свести к минимуму количество таблиц (lookup tables).

**Атмосферная коррекция с учетом солнечного блика.** Алгоритм атмосферной коррекции для спутникового сканера MODIS, учитывающий солнечный блик без привлечения дополнительной информации о скорости ветра, основан на нахождении неизвестного неселективного множителя  $g_w$ , связанного с распределением уклонов на морской поверхности и зависящего от скорости ветра и геометрии наблюдения. В отличие от других параметров системы океан–атмосфера этот множитель не зависит от длины волны излучения. Обратная задача решается посредством нескольких итераций при начальном предположении, что для спектральных каналов 748, 869 и 1240 нм вышедшим из воды излучением можно пренебречь. Также можно не учитывать вклад диффузного отражения пеной, который при скорости ветра до 10 м/с, представляющей практический интерес, меньше или порядка  $10^{-4}$  [13].

Коэффициент отражения от взволнованной поверхности излучения  $glint(\lambda) = g_w R_{fr}(n_w)$  представляет собой произведение двух множителей, один из которых – френелевский коэффициент отражения  $R_{fr}(n_w)$ , легко рассчитывающий через известную геометрию положения солнца, спутника и спектральный показатель преломления воды  $n_w$ , а второй  $g_w$  одинаков для всех длин волн. Яркость отраженного излучения получается путем умножения коэффициента отражения  $glint(\lambda)$  на солнечную постоянную  $F_0(\lambda)$ :

$$L_g(\lambda) = g_w R_{fr}(n_w) F_0(\lambda).$$

Решение обратной задачи сводится к нахождению шести неизвестных коэффициентов: двух коэффициентов разложения для крупной и мелкой фракций аэрозоля ( $c_{af}, c_{ac}$ ) в двухпараметрической модели аэрозольной яркости (2), трех для малопараметрической модели водной толщи ( $c_{1w}, c_{2w}, c_{3w}$ ) (3), (4) и неселективного по длине волны множителя  $g_w$ , зависящего от скорости ветра и геометрии наблюдения.

Обратная задача решается в два этапа методом нелинейной оптимизации с ограничениями (накладываются требования неотрицательности аэрозольной яркости и яркости вышедшего из воды излучения). На первом этапе проводится предварительная оценка (первое приближение) двух неизвестных коэффициентов для аэрозольной яркости ( $c_{af}, c_{ac}$ ) и неселективного множителя  $g_w$ . При этом минимизация проводится по трем длинам волн – 748, 869, 1240 нм, для которых вкладом вышедшего из воды излучения  $t(\lambda)L_w(\lambda)$  в

первом приближении можно пренебречь. Минимизируется сумма квадратов разности яркости, измеренной спутником на верхней границе атмосферы  $L_t^{изм}(\lambda)$ , и яркости, представленной суперпозицией соответствующих вкладов (1):

$$\sum_{\lambda} \left[ L_t^{изм}(\lambda) - \left( L_r(\lambda) + L_a(\lambda, c_{af}, c_{ac}) + T(\lambda)L_g(\lambda, g_w) \right) \right]^2 = \min .$$

Полученное значение неселективного множителя одно и то же для всех длин волн, что позволяет вычислить вклад отраженного от воды излучения  $L_g(\lambda)$  для видимого диапазона.

На втором этапе, зная вклад блика, по спутниковым данным для спектрального диапазона 412–869 нм находятся пять неизвестных коэффициентов ( $c_{af}, c_{ac}, c_{1w}, c_{2w}, c_{3w}$ ), определяющих вклады аэрозольного рассеяния  $L_a(\lambda)$  и вышедшего из воды излучения  $L_w(\lambda)$ :

$$\sum_{\lambda} \left[ L_t^{изм}(\lambda) - \left( L_r(\lambda) + L_a(\lambda, c_{af}, c_{ac}) + t(\lambda)L_w(\lambda, c_{1w}, c_{2w}, c_{3w}) + T(\lambda)L_g(\lambda) \right) \right]^2 = \min .$$

По трем длинам волн – 748, 869, 1240 нм – уточняется значение неселективного множителя  $g_w$ :

$$g_w = \left[ L_t^{изм}(\lambda) - L_r(\lambda) - L_a(\lambda) - t(\lambda)L_w(\lambda) \right] / \left[ R_{fr}(n_w)T(\lambda)F_0(\lambda) \right].$$

Для вычисления блика  $glint(\lambda)$  используется среднее значение уточненного неселективного множителя. В случае, когда хотя бы один из коэффициентов отражения  $glint(\lambda)$  меньше, чем 0.005 (это значение соответствует флагу блика для программных продуктов SeaDAS), решение задачи заканчивается. Если это не так, то проводится следующая итерация, в результате которой находятся новые коэффициенты для вкладов воды и аэрозоля и вновь уточняется неселективный множитель. Итерационный процесс прекращается, когда разность между максимальными по спектру отклонениями рассчитанного коэффициента яркости на верхней границе атмосферы от измеренного для предыдущей и последующей итераций меньше  $10^{-3}$ . Это соответствует минимальной ошибке измерений, ниже которой проводить дальнейшую минимизацию бессмысленно. Из двух последних итераций в качестве решения выбирается та, для которой меньше средняя «невязка» в спектральном диапазоне 412–869 нм. В среднем необходимы 2–3 итерации.

**Обработка изображений.** Данные MODIS уровней L0–L3 свободно доступны через две интернет-системы – Ocean Color Web (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) и LAADS Web (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>). Для решения нашей задачи удобнее пользоваться первым ресурсом, так как получение файлов уровня L1A\_LAC не требует предварительного заказа. Прежде чем применять разработанный алгоритм атмосферной коррекции, необходимо подготовить файл первого уровня L1B, используя соответствующие метеорологические и озоновые файлы. В результате получаем HDF-файл, который содержит 27 входящих параметров: яркости на верхней границе атмосферы для 10 длин волн  $L_t(\lambda)$ , рэлеевские яркости для 10 длин волн  $L_r(\lambda)$ , зенитные и азимутальные углы солнца (solz, sola) и спутника (senz, sena), оптическую толщину озона (ozone), давление (pressure). Еще один параметр – глубину моря (depth) – добавляем в случае применения региональных алгоритмов, в частности для Каспийского моря, для которого разработаны две модели мелкой и глубокой воды [12].

Обработка подготовленного файла осуществляется разработанным пакетом программ, реализованном в программном комплексе SMCS [14], который последовательно решает обратную задачу для каждого пикселя. Алгоритм реализован как динамически подключаемая библиотека (DLL операционной системы Windows). В результате получаем файл второго уровня L2, атмосферная коррекция которого проведена полностью с помощью нового алгоритма без привлечения метеоинформации о скорости ветра. Файл L2 содержит следующие продукты: спектральные значения коэффициента яркости водной толщи  $Rrs(\lambda)$ , оптической толщины аэрозоля  $\tau_a(\lambda)$  и коэффициента отражения от

взволнованной морской поверхности  $glint(\lambda)$  для девяти длин волн:  $\lambda = 412, 443, 488, 531, 551, 667, 677, 748, 869$  нм. Использование программного комплекса SMCS позволяет получать файлы уровня L3, а также экспортировать в текстовый формат ASCII и графические форматы (bmp, png, gif).

**Результаты.** Для верификации разработанных алгоритмов были подобраны спутниковые изображения сканера MODIS-Aqua, для которых имелись данные подспутниковых измерений оптических характеристик воды. В экспедициях ИО РАН в Каспийском море спектральная яркость восходящего излучения измерялась плавающим спектрорадиометром [15]. Для открытого океана мы были вынуждены обратиться к базе данных NOMAD (NASA bio-optical Marine Algorithm Data Set), в которой собраны данные *in situ* измерений, выполненных специалистами разных стран.

Были отобраны такие снимки, на которых подспутниковые измерения проводились в присутствии блика. Результаты сравнения среднеквадратичной ошибки коэффициентов яркости водной толщи в открытом океане, обработанных модифицированным алгоритмом и алгоритмом SeaDAS 6.1, сведены в табл.1.

Таблица 1

Сравнение среднеквадратичных ошибок коэффициента яркости водной толщи с измеренными *in situ* для модифицированного алгоритма и алгоритма SeaDAS 6.1 по данным NOMAD для открытого океана

Файл	Широта, долгота	Модифицированный алгоритм	SeaDAS 6.1	glint
A2002192174500_L2_LAC	42.35°с.ш., 67.60°з.д.	$0.65 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$3.36 \cdot 10^{-3}$
A2002233174000_L2_LAC	43.72, 67.40	$6.2 \cdot 10^{-3}$	$6.7 \cdot 10^{-3}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$
A2003187165000_L2_LAC	31.79, 64.75	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$1.4 \cdot 10^{-5}$	$5.21 \cdot 10^{-3}$
A2003224171000_L2_LAC	31.64, 64.17	$6.3 \cdot 10^{-3}$	$27.6 \cdot 10^{-3}$	$17.1 \cdot 10^{-3}$
A2007099212000_L2_LAC	33.66, 123.13	$4.7 \cdot 10^{-3}$	$14.4 \cdot 10^{-3}$	$8.96 \cdot 10^{-3}$
A2007108211500_L2_LAC	33.79, 123.01	$10.2 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$14.7 \cdot 10^{-3}$
A2007128173500_L2_LAC	40.45, 73.89	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$8.9 \cdot 10^{-3}$	$7.7 \cdot 10^{-3}$

Для пяти из семи измерений коэффициенты яркости для модифицированного алгоритма лучше совпадают с *in situ* данными, чем восстановленные коэффициенты яркости с помощью SeaDAS 6.1. Следует отметить, что для снимков A2003187165000\_L2\_LAC и A2007108211500\_L2\_LAC координаты подспутниковых измерений находятся в непосредственной близости от облака – на расстоянии меньше 5 км.

На рис.1 представлен обработанный снимок, сделанный спутниковым сканером цвета MODIS-Aqua в Атлантическом океане 11 июля 2002 г. (A2002192174500\_L2\_LAC). Рис.1, в демонстрирует распределение коэффициента отраженного от взволнованной поверхности излучения ( $glint$ ), полученного с помощью модифицированного алгоритма АК. Слева расположена область блика, для которой спутниковые данные отсутствуют из-за насыщения датчика. На рисунке изображены распределения коэффициента яркости водной толщи, восстановленные алгоритмом SeaDAS 6.1 (рис.1, а) и разработанным нами алгоритмом (рис.1, б). При сравнении восстановленных значений коэффициента яркости водной толщи (рис.1, в) модифицированный алгоритм дает лучшее совпадение с измеренными данными. Среднеквадратичная ошибка для коэффициента яркости данного измерения по табл.1 равна  $0.65 \cdot 10^{-3}$  в случае применения модифицированного алгоритма и  $4.5 \cdot 10^{-3}$  в случае применения стандартного алгоритма.

Для Каспийского моря обработано 8 спутниковых снимков, для которых было проведено 11 подспутниковых измерений. Среднеквадратичные ошибки коэффициента яркости водной толщи, полученные в результате обработки модифицированным алгоритмом и алгоритмом SeaDAS 6.1, сведены в табл.2.

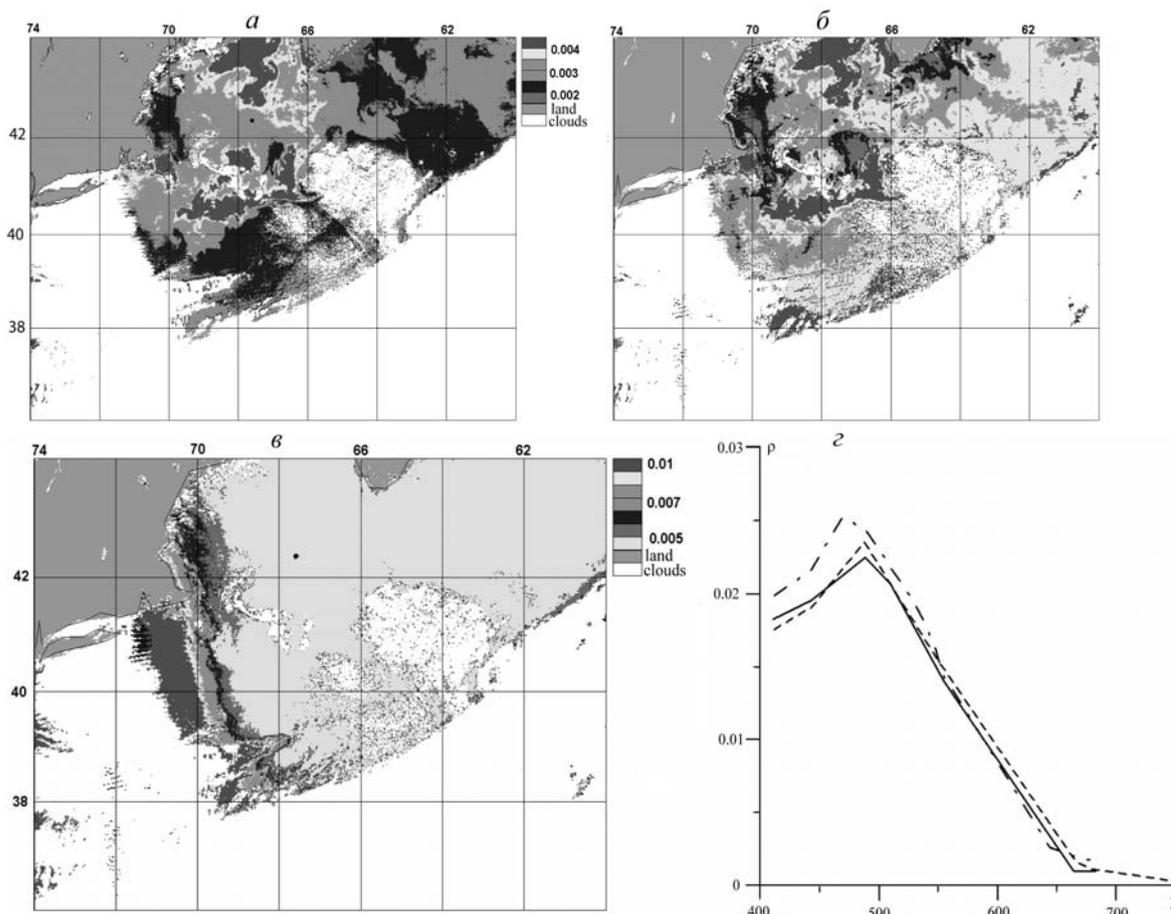


Рис.1. Распределения коэффициента яркости моря  $Rrs(531)$  и модифицированного алгоритма ИО РАН. Атлантический океан, 11 июля 2003 г. (A2002192174500\_L2\_LAC). Темная точка – положение станции, на которой выполнены измерения *in situ*.  
 a – коэффициенты, рассчитанные посредством алгоритма SeaDAS 6.1; б, в – распределение коэффициента яркости отраженного от воды излучения; z – сравнение спектров коэффициента яркости водной толщи, измеренных *in situ* (сплошная линия) и рассчитанных по спутниковым данным модифицированным алгоритмом (штриховая) и программой SeaDAS 6.1 (штрихпунктирная).

Таблица 2

Сравнение среднеквадратичных ошибок коэффициента яркости водной толщи с измеренными *in situ* для модифицированного алгоритма и алгоритма SeaDAS 6.1 для Каспийского моря

Файл	Широта, долгота	Модифицированный алгоритм	SeaDAS 6.1	glint
A2003187102000_L2_LAC	44.44°с.ш., 48.81°в.д.	$6.1 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$3.97 \cdot 10^{-3}$
A2003187102000_L2_LAC	44.20, 48.94	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$13.3 \cdot 10^{-3}$	$3.88 \cdot 10^{-3}$
A2003187102000_L2_LAC	44.25, 49.28	$5.7 \cdot 10^{-3}$	$3.48 \cdot 10^{-3}$	$3.76 \cdot 10^{-3}$
A2004248092000_L2_LAC	45.01, 48.55	$7.4 \cdot 10^{-3}$	$13.5 \cdot 10^{-3}$	$3.87 \cdot 10^{-3}$
A2004248092000_L2_LAC	45.20, 48.90	$12.9 \cdot 10^{-3}$	$13.8 \cdot 10^{-3}$	$3.98 \cdot 10^{-3}$
A2006211102000_L2_LAC	43.88, 50.0	$4.7 \cdot 10^{-3}$	$12.9 \cdot 10^{-3}$	$4.54 \cdot 10^{-3}$
A2008204091500_L2_LAC	43.0, 49.2	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$14.7 \cdot 10^{-3}$	$3.69 \cdot 10^{-3}$
A2008207094500_L2_LAC	43.27, 49.28	$11.8 \cdot 10^{-3}$	$17.5 \cdot 10^{-3}$	$5.2 \cdot 10^{-3}$
A2008208103000_L2_LAC	42.66, 49.15	$14.8 \cdot 10^{-3}$	$17.9 \cdot 10^{-3}$	$4.92 \cdot 10^{-3}$
A2008210101500_L2_LAC	42.07, 49.73	$16.8 \cdot 10^{-3}$	$47.5 \cdot 10^{-3}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$
A2008216094000_L2_LAC	45.08, 48.55	$24.2 \cdot 10^{-3}$	$26.4 \cdot 10^{-3}$	$9.05 \cdot 10^{-3}$

По таблице очень хорошо видно, что модифицированный алгоритм лучше справляется с решением обратной задачи, чем стандартный SeaDAS 6.1. в девяти случаях из одиннадцати. На рис.2 представлен результат работы регионального алгоритма для Каспийского моря на примере снимка, сделанного спутниковым сканером цвета MODIS-Aqua в Каспийском море 25 июля 2008 г. (A2008207094500\_L2\_LAC).

Пример обработки этого снимка мы уже демонстрировали в нашей предыдущей работе [16]. В 2010 г. был проведен репроцессинг данных L2 MODIS; полученный снимок представляет собой пример ухудшения работы стандартного алгоритма после репроцессинга, так как в работе [16] было продемонстрировано лучшее совпадение SeaDAS 5.1 с *in situ* данными. Среднеквадратичная ошибка для коэффициента яркости данного измерения по табл.2 равна  $11.8 \cdot 10^{-3}$  в случае применения модифицированного алгоритма и  $17.5 \cdot 10^{-3}$  в случае применения стандартного алгоритма.

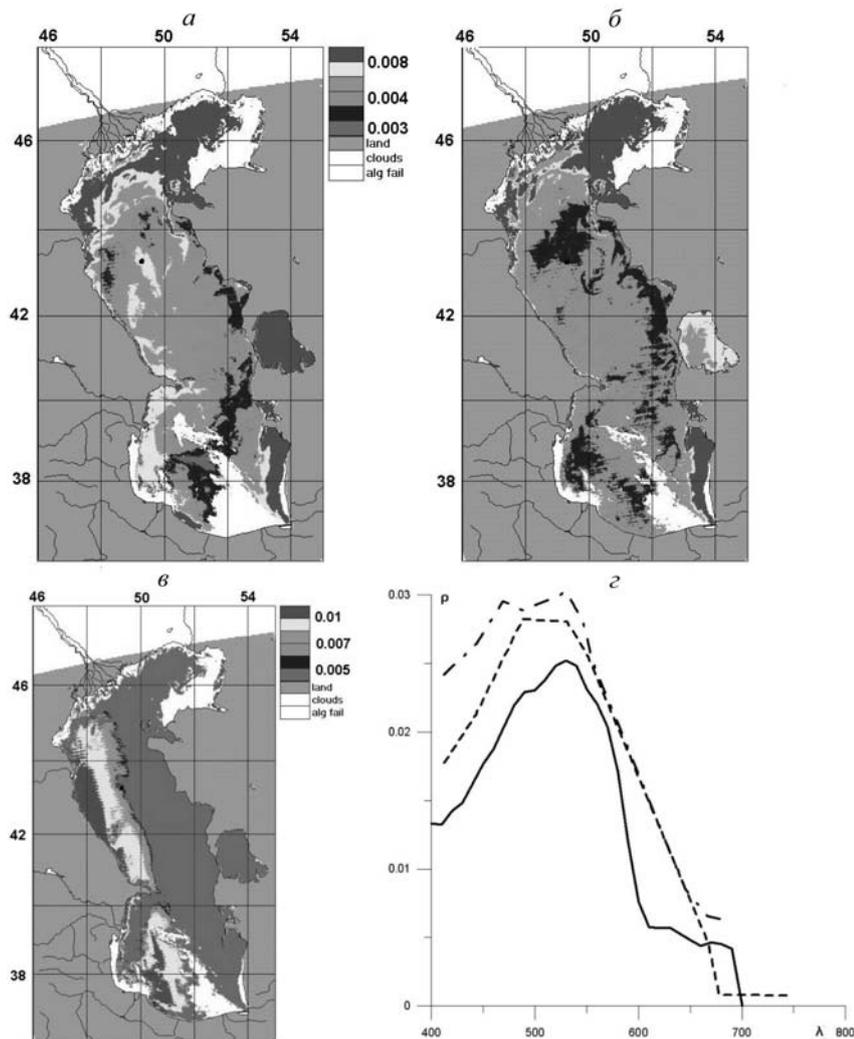


Рис.2. Распределения коэффициента яркости моря  $Rrs(531)$ . Каспийское море, 25 июля 2008 г. (A2008207094500\_L2\_LAC). Усл. обознач. см. на рис.1.

\*\*\*

В данной статье представлен новый подход к проведению атмосферной коррекции для спутникового сканера цвета MODIS, объединяющий разработанные ранее алгоритм АК в области солнечного блика, и малопараметрический алгоритм АК. Модифицированный алгоритм решает обратную задачу с привлечением данных ближнего ИК-диапазона, включая длину волны 1240 нм, без привлечения дополнительной информации о скорости ветра.

Разработан пакет программ, позволяющих проводить атмосферную коррекцию для всего спутникового изображения MODIS. Представлены результаты применения разработанного алгоритма для Каспийского моря и некоторых акваторий открытого океана. Полученные с помощью модифицированного алгоритма спектральные коэффициенты яркости воды в большинстве случаев лучше совпадают с данными натурных измерений, чем полученные с помощью стандартного алгоритма SeaDAS 6.1, как в области солнечного блика, так и вне этой области. Применение алгоритма ИО РАН позволяет устранить наиболее распространенную ошибку стандартного алгоритма – отрицательные значения нормализованной яркости для спектральных каналов 412 и 443 нм, возникающие при обработке изображений в высоких широтах и прибрежных водах. Увеличивается количество пикселей, для которых может быть решена обратная задача.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ (договор РГТМУ №11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.*

### Литература

1. Лихачева М.В., Шеберстов С.В., Копелевич О.В. Коррекция данных спутникового сканера MODIS на солнечный блик без использования дополнительных данных о скорости ветра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Вып.6. Т.1. М, 2009. С.421–428.
2. 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 // Proc. of III Intern. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». St.Petersburg, 2005. P.299–304.
3. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vazyulia, S.V. et al. New approach to atmospheric correction of satellite ocean color data // Proc. of SPIE. Current Research on Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters. 2007. P.6615.
4. Sheberstov S.V., Nabiullina M.V. (Likhacheva), Lukianova E.A. Numerical modeling of radiative transfer in ocean-atmosphere system with wind-roughened surface // Proc. of II Intern. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». St.Petersburg. 2003. P.90–96.
5. Gordon H.R., Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // Applied Optics. 1994. V.33, N 3. P.443–452.
6. Gordon H.R. Atmospheric correction in ocean color imagery in the Earth Observing System era // J. of Geophysical Research. 1997. V.102, N D14. P.17081–17106.
7. Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H. Exact Rayleigh scattering calculations for use with Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner // Applied Optics. 1988. V.27. P.862–871.
8. Cox C., Munk W. Statistics of the sea surface derived from Sun glitter // J. Mar. Res. 1954. V.13, N 2. P.139–159.
9. Gordon H.R., Clark D.K. Clear water radiances for atmospheric correction of Coastal Zone Color Scanner imagery // Applied Optics. 1981. V.20. P.4174–4180.
10. Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model // Applied Optics. 1998. V.37. P.6329–6338.
11. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. 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.
12. Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В. Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2009. Вып.6. Т.1. С.400–408.
13. Frouin R., Schwindling M., Deschamps P. Spectral reflectance of sea foam in the visible and near infrared: In situ measurements and remote sensing implications // J. of Geophysical Research, 1996. V.101. P.14361–14371.
14. Sheberstov S.V., Lukyanova E.A. A system for acquisition, processing, and storage of satellite and field biooptical data // Proc. of the IV Intern. conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters» Nizhny Novgorod. 2007. P.179–183.
15. Артемьев 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.
16. Likhacheva M.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V. Correction of MODIS satellite data for sun glint without resort to ancillary information on wind speed // Proc. of the IV Intern. conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». St. Petersburg, 2009. P.126–129.

