

Коррекция данных спутникового сканера MODIS на солнечный блик без использования дополнительных данных о скорости ветра

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

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997 Москва, Нахимовский проспект, 36
E-mail: likhacheva.m@gmail.com*

В работе представлен алгоритм атмосферной коррекции для спутникового сканера MODIS, который дает возможность осуществлять коррекцию солнечных бликов по данным самого спутника без привлечения дополнительной информации о скорости ветра. Алгоритм основан на нахождении неизвестного неселективного множителя, определяемого распределением уклонов на морской поверхности, зависящего от скорости ветра, и геометрии наблюдения. Обратная задача решается по данным измерений для 10 спектральных каналов сканера MODIS, включая длину волны 1240 нм, которая обычно не используется при решении задачи атмосферной коррекции. Результат работы алгоритма продемонстрирован на примере обработки спутниковых данных Атлантического океана и Каспийского моря. Полученные результаты сравниваются с результатами обработки посредством программного обеспечения SeaDAS 5.1 и данными натурных измерений.

Ключевые слова: спутниковый сканер MODIS, атмосферная коррекция, взволнованная поверхность океана, солнечный блик, верификация алгоритма.

Введение

Одна из проблем при решении задачи атмосферной коррекции (АК) данных спутниковых сканеров цвета – учет вклада отраженного от взволнованной морской поверхности прямого солнечного излучения (солнечных бликов). В программном обеспечении SeaDAS, разработанном специалистами НАСА США [1-3], для учета вклада бликов при обработке данных сканеров цвета SeaWiFS и MODIS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) используется в качестве входного параметра приземная скорость ветра, полученная из метеорологического центра NCEP, осредненная по достаточно большой площади и по времени. Однако вклад солнечных бликов связан, в основном, с высокочастотной составляющей волнения, которая зависит от мгновенной скорости ветра на данном участке поверхности. Проблема корректного учета блика особенно существенна для сканера MODIS, который не может отклоняться от блика, как сканер SeaWiFS.

Разработанный нами алгоритм дает возможность осуществлять коррекцию солнечных бликов по данным самого сканера MODIS без привлечения дополнительной информации о скорости ветра. Алгоритм основан на нахождении неизвестного неселективного множителя, определяемого распределением уклонов на морской поверхности, зависящего от скорости ветра, и геометрии наблюдения. Этот множитель для яркости отраженного от поверхности излучения с учетом переноса в атмосфере имеет одинаковый вид на различных длинах волн, чего нельзя сказать об остальных параметрах системы океан – атмосфера. Нами предлагается проводить оценку неселективного множителя с использованием спектрального канала 1240 нм, который обычно не используется при традиционном решении задачи АК. На этой длине волны можно пренебречь вышедшим из воды излучением, что позволяет упростить уравнения и провести оценку искомого множителя. Такой подход позволяет оценить распределение уклонов поверхности в каждом пикселе и тем самым опираться не на априорные данные о среднем ветре, а на фактическое состояние поверхности воды.

Метод расчета

Яркость на верхней границе атмосферы $L_t(\lambda)$, может быть представлена в виде суперпозиции вкладов следующих компонент:

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

где $L_r(\lambda)$ – яркость, обусловленная молекулярным (рэлеевским) рассеянием в атмосфере [4]; $L_a(\lambda)$ – вклад многократного рассеяния аэрозолем, учитывающий взаимодействие рэлеевского и аэрозольного рассеяния; $T(\lambda)L_g(\lambda)$ – вклад отраженного от взволнованной морской поверхности прямого солнечного излучения (солнечных бликов); $t(\lambda)L_w(\lambda)$ – яркость вышедшего из воды излучения на верхней границе атмосферы; $t(\lambda)L_{wc}(\lambda)$ – яркость на верхней границе атмосферы, обусловленная диффузным отражением пены; $T(\lambda)$ и $t(\lambda)$ – направленный и диффузный коэффициенты пропускания атмосферы на пути от поверхности до спутникового датчика.

Для аэрозольной яркости используется двухпараметрическая модель, разработанная на основе данных AERONET и верифицированная по данным SeaWiFS [5]:

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

где c_{af} , c_{ac} – неизвестные коэффициенты, которые определяются в процессе решения обратной задачи, $L_{af}(\lambda)$, $L_{ac}(\lambda)$ – базисные функции разложения для крупной и мелкой фракции аэрозоля.

Вклад яркости солнечных бликов $T(\lambda)L_g(\lambda)$ на верхней границе атмосферы можно представить следующей формулой:

$$T(\lambda) L_g(\lambda) = g_w(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, W) R_{fr}(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, n_w) T(\lambda) F_0(\lambda) \quad (3)$$

где $g_w(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, W)$ – неизвестный неселективный множитель, зависящий от скорости ветра W и геометрии наблюдения, характеризует распределение уклонов взволнованной поверхности; $R_{fr}(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, n_w)$ – спектральный френелевский коэффициент отражения, зависящий от угла между направлениями на Солнце (θ_0, φ_0) и на спутниковый датчик (θ, φ); $F_0(\lambda)$ – спектральная облученность, создаваемая солнечным излучением на верхней границе атмосферы при нормальном падении. Первый множитель одинаков для всех длин волн. Вычислив его значение для ИК области, мы можем провести коррекцию на отражение от взволнованной поверхности для видимого и ближнего ИК диапазонов, поскольку второй множитель легко рассчитать через известную геометрию положения солнца и спутника и спектральный показатель преломления воды $n_w(\lambda)$.

Яркость вышедшего из воды излучения на верхней границе атмосферы можно выразить через значение нормализованной яркости $L_{wn}(\lambda)$ [6]:

$$t(\lambda)L_w(\lambda) = L_{wn}(\lambda) \mu_0 t(\lambda) \quad (4)$$

где μ_0 – косинус зенитного угла Солнца.

Коэффициент диффузного отражения пеной при скоростях ветра до 10 м/с меньше или порядка 10^{-4} [7], поэтому при нормальных условиях наблюдения вкладом отражения пеной, особенно в области блика, можно пренебречь.

Нормализованная яркость $L_{wn}(\lambda)$ в формуле (4) может быть вычислена через значения спектрального коэффициента яркости морской воды $\rho(\lambda)$ по формуле Lee et. al. [8]:

$$L_{wn}(\lambda) = 0.165 \cdot \rho(\lambda) / (1 - 0.497 \cdot \rho(\lambda)) \quad (5)$$

В нашей работе для коэффициента яркости водной толщи использовались две малопараметрические модели: разработанная ранее универсальная модель и региональная для Каспийского моря.

Универсальная трехпараметрическая модель, предложена в работе [9]:

$$\rho(\lambda) = c_{1w} \Psi_{1w} + c_{2w} \Psi_{2w} + c_{3w} \Psi_{3w} \quad (6)$$

где Ψ_{1w} , Ψ_{2w} , Ψ_{3w} – система базисных функций, c_{1w} , c_{2w} , c_{3w} – неизвестные коэффициенты.

Использование универсальных биооптических алгоритмов может приводить к определенным погрешностям для акваторий, которые по своим условиям отличаются от океанических. С целью устранения таких ошибок предлагается разрабатывать региональные модели, основанные на

данных натурных измерений, и такая модель была разработана для северной половины Каспийского моря в работе [10]:

$$\rho(\lambda) = \rho_0(\lambda) + c_{1w}\Psi_{1w} + c_{2w}\Psi_{2w} + c_{3w}\Psi_{3w} \quad (7)$$

Здесь $\rho_0(\lambda)$ – среднее значение коэффициента яркости; $\Psi_{1w}, \Psi_{2w}, \Psi_{3w}$ – система базисных функции разложения; c_{1w}, c_{2w}, c_{3w} – неизвестные коэффициенты разложения. Системы различны для случаев мелкого и глубокого моря [10].

Обратная задача решается в два этапа методом нелинейной оптимизации с ограничениями (накладываются требования «неотрицательности» аэрозольной яркости и яркости вышедшего из воды излучения). Минимизируется сумма квадратов разности яркости, измеренной спутником на верхней границе атмосферы $L_t^{uzm}(\lambda)$, и яркости, представленной суперпозицией соответствующих вкладов (1):

$$\sum_{\lambda} [L_t^{uzm}(\lambda) - (L_r(\lambda) + L_a(\lambda, c_{af}, c_{ac}) + t(\lambda)L_w(\lambda, c_{1w}, c_{2w}, c_{3w}) + T(\lambda)L_g(\lambda, g_w))]^2 = \min \quad (8)$$

Измеренные яркости $L_t^{uzm}(\lambda)$ извлекаются из калиброванных файлов MODIS уровня L1B (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>).

На первом этапе проводится предварительная оценка (первое приближение) двух неизвестных коэффициентов для аэрозольной яркости c_{af}, c_{ac} и неселективного множителя $g_w(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, W)$. 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. Полученное значение неселективного множителя одно и то же для всех длин волн, что позволяет вычислить вклад отраженного от воды излучения $L_g(\lambda)$ для всех длин волн.

На втором этапе решения задачи, 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 $L_w(\lambda)$, и уточняется значение неселективного множителя $g_w(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, W)$:

$$g_w(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, W) = [L_t^{uzm}(\lambda) - L_r(\lambda) - L_a(\lambda) - t(\lambda)L_w(\lambda)] / [R_{fr}(\theta, \theta_0, \varphi - \varphi_0, n_w) T(\lambda) F_0(\lambda)] \quad (9)$$

Далее проводится следующая итерация, в результате которой находятся новые коэффициенты для вкладов воды и аэрозоля и 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.

Результаты расчета

Полученные результаты представлены ниже для трех случаев обработки спутниковых данных, для которых были подспутниковые измерения коэффициента яркости водной толщи *in situ*. На спутниковом снимке Саргассова моря 12 августа 2003 года (рис. 1) хорошо видна зона блика, а также эффекты, возникающие на краю блика, связанные с плохой работой стандартного алгоритма AK SeaDAS 5.1 в этой зоне. К сожалению, мы не располагали собственными подспутниковыми измерениями в Атлантическом океане. Поэтому мы обратились к базе данных NOMAD (NASA bio-optical Marine Algorithm Data Set), в которой собраны данные измерений *in situ*. Для рассматриваемого дня есть измеренные коэффициенты яркости водной толщи, проведенные на краю блика, но спутниковые данные для этой точки (1) отсутствуют из-за облачности. Ввиду однородности вод открытого океана мы выбрали пиксель (2), находящийся недалеко от места измерения и провели расчет с использованием универсальной модели коэффициента яркости водной толщи (рис. 2).

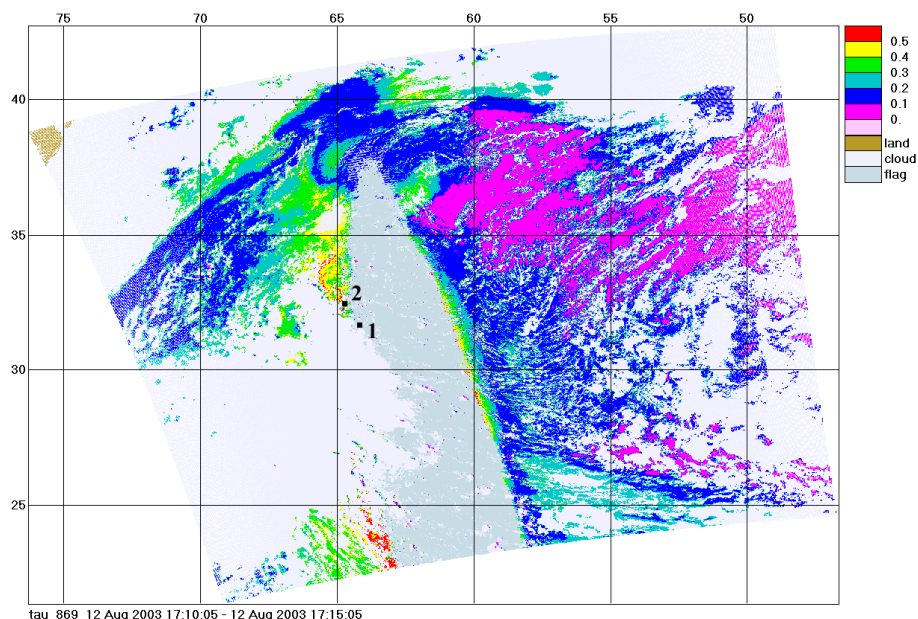


Рис. 1. Оптическая толщина аэрозоля на длине волны 869 нм над Саргассовым морем по данным сканера цвета MODIS-Aqua 12 августа 2003 года. Рассчитана посредством программного обеспечения SeaDAS 5.1. (1) – точка измерения *in situ*, (2) – пиксель, для которого проводили расчет

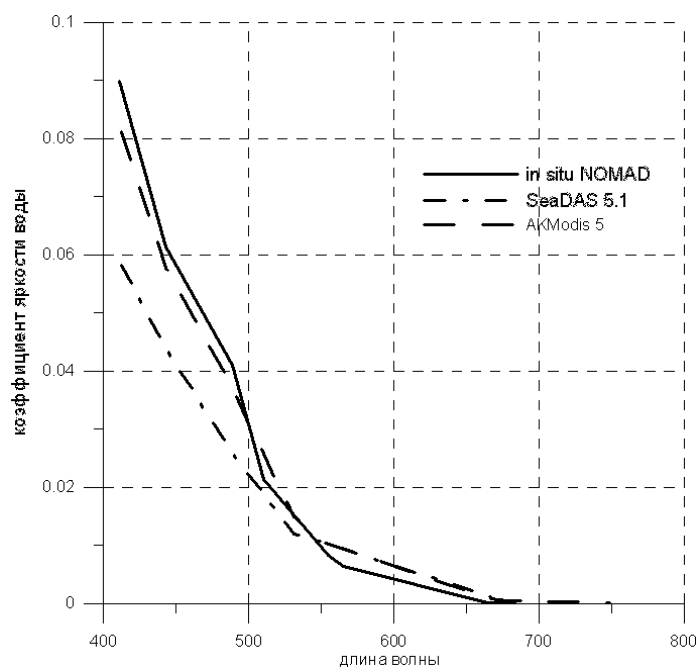


Рис. 2. Сравнение результатов расчета коэффициента яркости воды, измеренных *in situ* и полученных при обработке спутниковых данных MODIS-Aqua программой SeaDAS5.1 и AKModis. Саргассово море, 12 августа 2003 г.

Применение региональной модели для Каспийского моря продемонстрировано на примере двух спутниковых снимков, для которых есть подспутниковые измерения, проведенные в экспедициях ИОРАН в 2006 и 2008 годах (рис. 3, 5) для мелкого и глубокого моря.

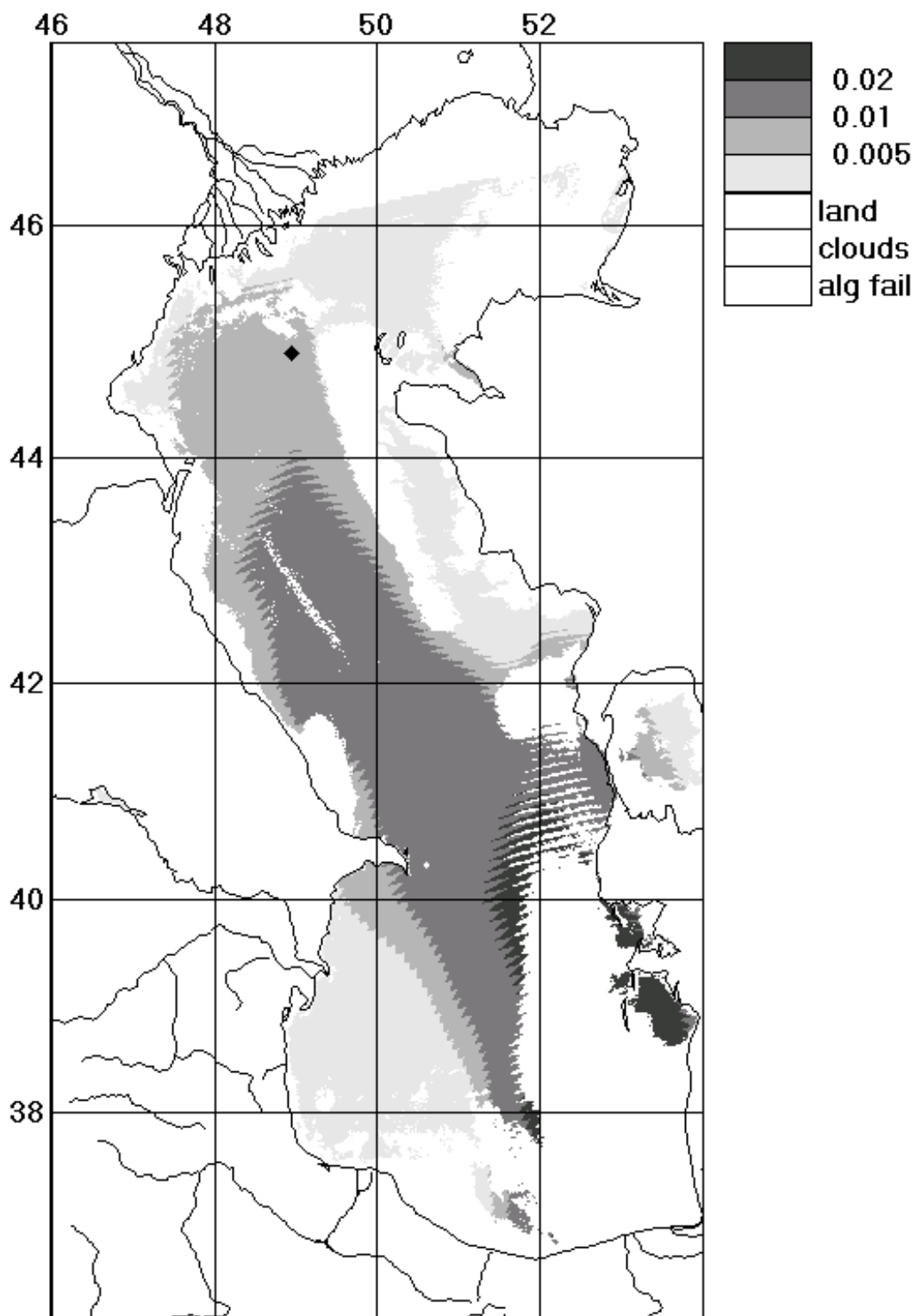


Рис. 3. Коэффициент яркости блика (glint_coef). Каспийское море, рейс НИС «Рифт», 31 июля 2006 года, станция 8 «Корчагина», координаты 44°54'с.ш. и 48°58'в.д., глубина 12 м. Ромбиком показано положение станции

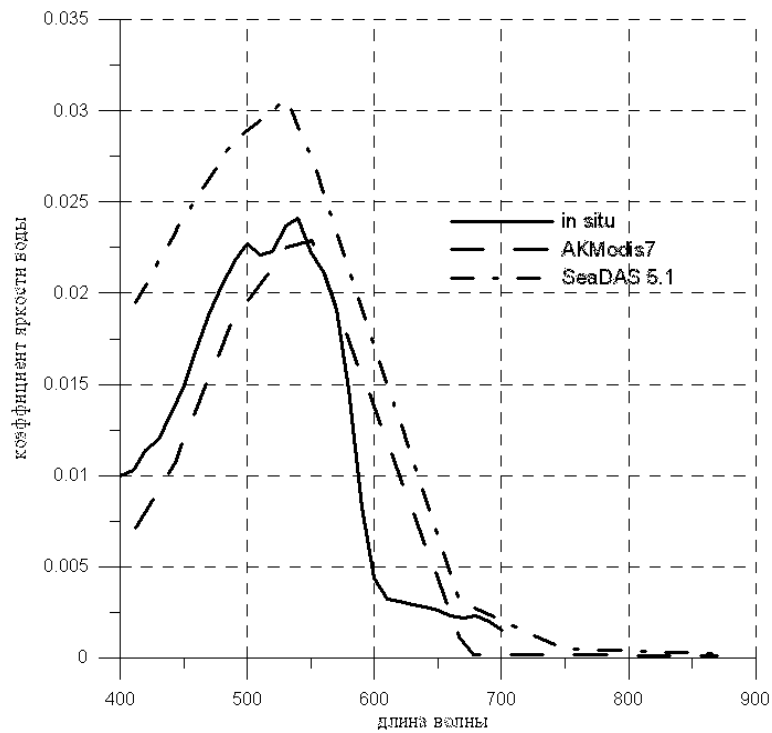


Рис. 4. Сравнение результатов расчета коэффициента яркости воды, полученных при обработке спутниковых данных MODIS-Aqua программой SeaDAS 5.1, AKModis и измеренных in situ. Станция 8 в Каспийском море 31 июля 2006 г.

При сравнении восстановленных коэффициентов яркости водной толщи (рис. 2, 4, 6) видно, что разработанный нами алгоритм AKModis работает лучше чем стандартный алгоритм SeaDAS 5.1 как в случае применения универсальной модели, так и в случае применения региональной модели коэффициента яркости для Каспийского моря.

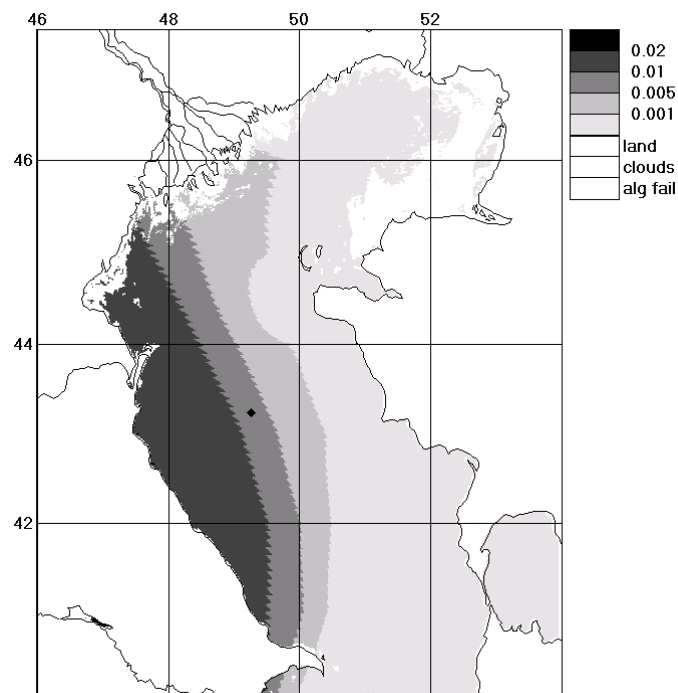


Рис. 5. Коэффициент яркости блика (glint_coef). Каспийское море, рейс НИС «Рифт», 25 июля 2008 года, станция 11, координаты 43°16'с.ш. и 49°17'в.д., глубина 108 м. Ромбиком показано положение станции

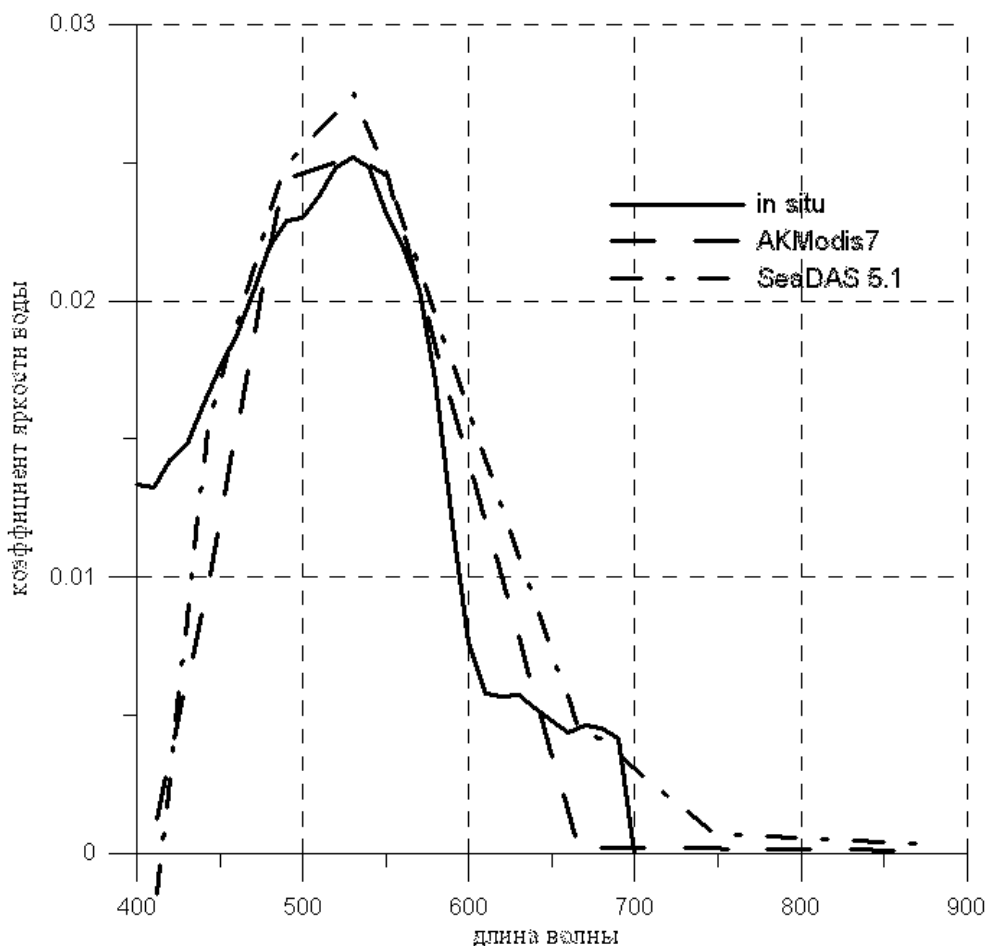


Рис. 6. Сравнение результатов расчета коэффициента яркости воды, полученных при обработке спутниковых данных MODIS-Aqua программой SeaDAS 5.1, AKModis и измеренных in situ. Станция 11 в Каспийском море 25 июля 2008 г.

В частности, разработанный алгоритм позволяет устранить наиболее распространенную ошибку алгоритма атмосферной коррекции SeaDAS – отрицательные значения нормализованной яркости для спектральных каналов 412 и 443 нм, возникающие при обработке снимков высоких широт и прибрежных вод. В качестве примера возникновения такой ошибки на длине волны 412 нм можно привести станцию 11 (25 июля 2008 года, рейс НИС «Рифт») в Каспийском море (рис. 6).

Заключение

Предложен новый алгоритм коррекции на солнечный блик данных спутниковых сканеров цвета типа MODIS, отличающийся тем, что коррекция проводится по данным самих сканеров, а дополнительные данные о скорости ветра не используются.

Разработано соответствующее программное обеспечение, и показана применимость разработанного алгоритма к реальным данным измерений сканера MODIS в ситуациях с наличием интенсивного солнечного блика.

Новый алгоритм, как правило, обеспечивает лучшее согласие рассчитанной яркости излучения, выходящего из водной толщи, с данным натурных измерений, чем стандартный алгоритм обработки сканера MODIS.

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

Литература

1. *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. №3. P. 443-452.
2. *Gordon H.R.* Atmospheric correction in ocean color imagery in the Earth Observing System era // *Journal of Geophysical Research*, 1997. V.102. №D14. P. 17081-17106.
3. *Baith K., Lindsay R., Fu G., McClain Ch.R.* Data Analysis System Developed for Ocean Color Satellite Sensors // *EOS*, 2001. v.82, №18 (http://www.agu.org/eos_elec/00289e.html)
4. *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.
5. *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"*. St. Petersburg. 2005. P. 299-304.
6. *Gordon H. R., Brown O. B., Evans R. H., et al.* A semianalytical radiance model of ocean color // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. P. 10,909–10,924.
7. *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. Geophys. Res.* 1996. №101. P. 14361-14371.
8. *Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., and Patch J.S.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model // *Applied Optics*. 1998. v.37. P. 6329-6338.
9. *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.
10. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В.* Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета // *Настоящий сборник*.

Sun glint correction of data from satellite scanner MODIS with no ancillary information on wind speed

M.V. Likhacheva, O.V. Kopelevich, S.V. Sheberstov

Shirshov Institute of Oceanology, Moscow, Russia

New algorithm of correction on sun glint for satellite ocean color scanner MODIS is developed. It is built on MODIS data only, without ancillary information on wind speed. The approach is based on a retrieval of the nonselective factor associated with the surface slope distribution by using data from three MODIS infrared bands including 1240 nm. This nonselective factor depends only on wind speed and viewing geometry, whereas other parameters of ocean-atmosphere system are spectrally dependent. As an example, the obtained results for the Caspian Sea and the Atlantic Ocean are demonstrated.

Keywords: satellite ocean color scanner MODIS, atmospheric correction, wavy sea surface, sun glint, algorithm validation.