



Тематический выпуск

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Лучинин А.Г.</i> О системах подводного видения со сложно модулированными пучками подсветки .....	5
<i>Лихачева М.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В.</i> Модифицированный алгоритм атмосферной коррекции данных спутникового сканера MODIS .....	18
<i>Триз Ч., Пеннучи Дж.</i> Верификация вторичных оптических характеристик, восстанавливаемых планерами Слокама .....	26
<i>Долин Л.С.</i> Об искажениях импульсного светового пучка в среде с сильно анизотропным рассеянием .....	30
<i>Родионов М.А., Долина И.С., Левин И.М.</i> Корреляции между вертикальными распределениями показателя ослабления света и плотности воды в Северных морях.....	39
<i>Вазюля С.В., Копелевич О.В.</i> Сравнительные оценки баланса фотосинтетически активной радиации в Баренцевом, Белом, Карском и Черном морях по данным судовых и спутниковых измерений.....	47
<i>Фицек Д., Мелер Й., Западка Т., Стонь-Эгерт Й.</i> Моделирование коэффициентов поглощения света фитопланктоном в озерах Померании (северная Польша).....	54
<i>Пеннучи Дж., Альварес А., Триз Ч.</i> Спутниковый метод, основанный на ковариации, для поддержки деятельности AERONET – верификация данных по цвету океана.....	64
<i>Толкаченко Г.А., Калинин Д.В., Смирнов А.В., Прохоренко Ю.А.</i> Оценка пространственных масштабов аэрозольной атмосферы над акваторией Черного моря.....	69
<i>Левин И.М., Дарецкий М., Саган С., Ковальчук П., Здун А., Радомысльская Т.М., Родионов М.А.</i> Можно ли применять к Балтийскому морю известные модели оптических свойств воды?.....	80
<i>Сухоруков А.Л., Титов М.А.</i> Об использовании эффекта планирования для движения подводных аппаратов.....	88
<b>Конференции</b> .....	102
Тематический указатель 2012 г. ....	106
Авторский указатель за 2012 г. ....	108
Правила представления материалов в редакцию.....	109

## CONTENTS

### Articles

- Luchinin A.G.* On Underwater Imaging Systems with Complex Modulated Beams of Illumination.... 5
- A scheme of construction of imaging systems based on a complex modulated illuminating beam and the received echo signal processing is proposed, which involves the extraction of the modulated component and its matched filtering is discussed. The approached model of a signal taking into account the effect of surface waves and multiple scattering in water is constructed. The system limiting longitudinal and transverse resolutions determined by random light refraction on the surface and scattering in water are estimated. Characteristics of imaging systems with extremely high frequency of beam modulation are estimated.  
**Key words:** underwater imaging, modulated beams of light, dispersion of modulation waves, compression of complex signal, random refraction, wavy surface hydrodynamically rough.
- Likhacheva M.V., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V.* Modified Algorithm of Atmospheric Correction for MODIS Satellite Data..... 18
- New approach to MODIS data processing, joined of algorithm for sun glint area and low-parametric algorithm of atmospheric correction is presented. Software package processing MODIS imagery has been developed. Validation of this algorithm with in situ measurements of the water radiance reflectance  $\rho(\lambda)$  in most cases shows better accuracy then the SeaDAS 6.1 data as in the presence of sun glint and without glint. As a result of applying of new algorithm, the area of solving the inverse problem increased.  
**Key words:** atmospheric correction, sun glint, ocean color sensors.
- Trees C., Pennucci G.* About the Distortions of the Pulsed Light Beam in the Medium with Strongly Anisotropic Scattering..... 26
- One of the principle advantages of gliders is that they provide high-resolution measurements at small temporal and spatial scales. They also autonomously operate 24/7 under a variety of weather and sea-state conditions, they increase sample measurement densities (shipboard sampling 87 profiles day-1 as compared to 665 profiles day-1 from a glider), they are relatively low cost, easily re-locatable and finally, they have low power requirements for extended deployment periods. The goals of this study were (1) to determine the radiometric uncertainty of downwelling irradiance ( $E_d$ ) measurements made from gliders, (2) to apply the Submerged Remote Sensing (SRS) technique for calculating mean  $K$ 's (average  $K$  over some depth interval from just below the surface to the sensor depth) from validated glider  $E_d$  data and (3) to invert mean  $K$ 's to local  $K$ 's ( $K$  over some smaller depth increment  $\sim 1-2$  m to generate a vertical profile of  $K$ ) under varying incident solar fluxes (cloud cover/atmospheric conditions).  
**Key words:** slocum gliders, underwater irradiance, vertical attenuation coefficient.
- Dolin L.S.* About the Distortions of the Pulsed Light Beam in the Medium with Strongly Anisotropic Scattering..... 30
- The method for analysis of spatially - temporal distortions of a pulsed light beam in the stratified turbid medium with narrow scattering phase function (in particular, sea water) is developed. It is shown that the radiative transfer equation in the refined small-angle approximation is reduced to a set of equations for longitudinal moments of a pulsed light field which is solved rigorously unlike the analogous equations for temporary moments of pulse. Recurrence relations, which permit to calculate the moments of the higher order based on the zero moment, are obtained. The formulas for calculating the first three moments, defining the average radiance (or irradiance), the distance between the leading front and the "centre of gravity" of pulse as well as the longitudinal scale of its smearing, are given. Formulas for definition of time characteristics of pulse from its spatial moments are obtained.  
**Key words:** laser impulse, turbid medium, light scattering, radiative transfer equation, light field, a method of the moments.

- Rodionov M., Dolina I., Levin I. Correlations Between Depth Distributions of Water Attenuation Coefficient and Density in the North Seas ..... 39

The paper contains the data on measurements of depth distributions of attenuation coefficient and fluid density in the Barents, White and Kara Seas together with results of analysis the correlations between these distributions. We founded that in many cases correlations between parameters of the functions used for distributions approximation are rather high, namely, between the horizons of maximal change of attenuation coefficient and the pycnocline depth, between widths of pycnocline and the layer of attenuation coefficient jump, as well as between the gradient of  $c$  and the buoyancy frequency.

**Key words:** correlations, depth profiles, attenuation coefficient, fluid density.

- Vasulia S.V., Kopelevich O.V. Comparative Estimates of the Budget of Photosynthetic Available Radiation (PAR) in the Barents, White, Kara and Black Seas Derived From *in situ* and Satellite Data ..... 47

The comparative assessment of all components of the PAR budget (incident on the sea surface, reflected from the rough sea surface, penetrating to the different depth in the water column, water-leaving and absorbed in water) made by using satellite and *in situ* data in the Barents, Black, Kara, and White seas is presented. Water quality is varied from clear with the diffuse attenuation coefficient  $K_d(555) \approx 0.13 \text{ m}^{-1}$  to very turbid with  $K_d(555) = 0.42 \text{ m}^{-1}$ . These differences cause the essential discrepancy of components of the PAR budget in different seas. An agreement between the estimates of PAR penetration in the upper layer derived from *in situ* and satellite data is quite satisfactory.

**Key words:** photosynthetic available radiation, PAR budget, satellite data.

- Ficek D., Meler J., Zapadka T., Stoń-Egiert J. Modelling the Light Absorption Coefficients of Phytoplankton in Pomeranian Lakes (Northern Poland) ..... 54

In 2004-08 the absorption properties of phytoplankton was measured in 15 northern Polish lakes of different trophicity. At the same time the concentrations of optically active substances in these lakes were also measured. These data were used to test the model of the absorption properties of phytoplankton, derived by Bricaud et al. for case 1 oceanic waters (hereafter referred to as Bricaud's parameterisation), to predict the spectra of light absorption by phytoplankton  $a_{ph}$  for lakes in Pomerania. This study shows the limitations of this model to lacustrine phytoplankton; and the reasons for them are discussed. In addition, an analogous model of light absorption by phytoplankton in the investigated lakes was derived on the same mathematical basis as Bricaud's model, but with different values of the relevant empirical parameters. For the sake of simplicity, the analysis covered the coefficients of light absorption only by surface water phytoplankton. The results were compared with those obtained for case 2 waters by other authors using similar models.

**Key words:** phytoplankton absorption spectra, lakes, bio-optical modelling.

- Pennucci G., Alvarez A., Trees C. A Satellite Covariance-Based Method to Support AERONET Ocean Color Validation Activities ..... 64

The objective is to determine the location(s) in any given oceanic area during different temporal periods where *in situ* sampling for Calibration/Validation (Cal/Val) provides the greatest improvement in retrieving accurate radiometric and derived product data (lowest uncertainties). A method is presented to merge satellite imagery with *in situ* samples and to determine the best *in situ* sampling strategy suitable for satellite Cal/Val efforts. This methodology uses satellite acquisitions to build a covariance matrix encoding the spatio-temporal variability of the area of interest. The covariance matrix is used in a Bayesian framework to merge satellite and *in situ* data providing a product with lower uncertainty. The best *in situ* location for Cal/Val efforts is retrieved using a design principle (A-optimum design) that looks for minimizing the estimated variance of the merged product.

**Key words:** satellite images, field measurements, calibration-validation, merged product.

- Tolkachenko G.A., Kalinskaya D.V., Smirnov A.V., Prohorenko Y.A. Evaluation of Spatial Scales of Aerosol Atmosphere over the Black Sea ..... 69

Results of researches of spatial correlation of atmosphere optical heterogeneities above the Black sea are presented. Measurements of aerosol optical thickness are carried out by two spaced sun photometers. The spatial correlation radius of aerosol optical thickness is estimated and constitutes in order of 160 km. Possibility of revealing the absorbing aerosols properties above the sea is shown on a concrete examples. The recommendations on application of portable photometers in sub-satellite measured experiments are given.

**Key words:** aerosol, correction atmosphere, spatial correlation, undersatellite experiment.

*Levin I., Darecki.M., Sagan S., Kowalczyk P., Zdun A., Radomyslskaya T., Rodionov M.* Can the Known Models of Seawater Optical Properties Be Applied to the Baltic Sea?..... 80

Commonly used optical models of natural waters have been analyzed in the context of their applicability in the Baltic Sea. By use of a large data set collected at the Baltic, we found that published before relationships between scattering, attenuation and backscattering coefficients at wavelength 550 nm in ocean waters are valid for Baltic as well. When the same data were used for validation of the relationships connecting absorption and scattering coefficients of the chlorophyll and absorption coefficients of Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) with chlorophyll concentration, the result shows a large discrepancy, disqualifying them in the complicated environment of the Baltic Sea.

**Key words:** inherent optical properties, phytoplankton, yellow substance.

*Sukhorukov A.L., Titov M.A.* Use of Gliding Effect for Motion of Underwater Vehicles ..... 88

This study defines hydrodynamic characteristics of underwater gliders based upon numeric solution of Reynolds-averaged Navier-Stokes equation. The characteristics were compared with experimental data and it was shown that it is possible to use numeric methods of viscous fluid dynamics for development of a shape of such objects. Mathematical model of glider's motion was designed. Feasibility of its use as a towing vehicle for another underwater object was studied. Analytical estimations of glider motion parameters were obtained at steady-state modes with and without account of towing force.

**Key words:** underwater vehicle, glider, numeric methods, mathematical model of motion, towing, excessive buoyancy.

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  $glint(\lambda) = g_w R_f(n_w)$  представляет собой произведение двух множителей, один из которых – френелевский коэффициент отражения  $R_f(n_w)$ , 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  $F_0(\lambda)$ :

$$L_g(\lambda) = g_w R_f(n_w) F_0(\lambda).$$

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.

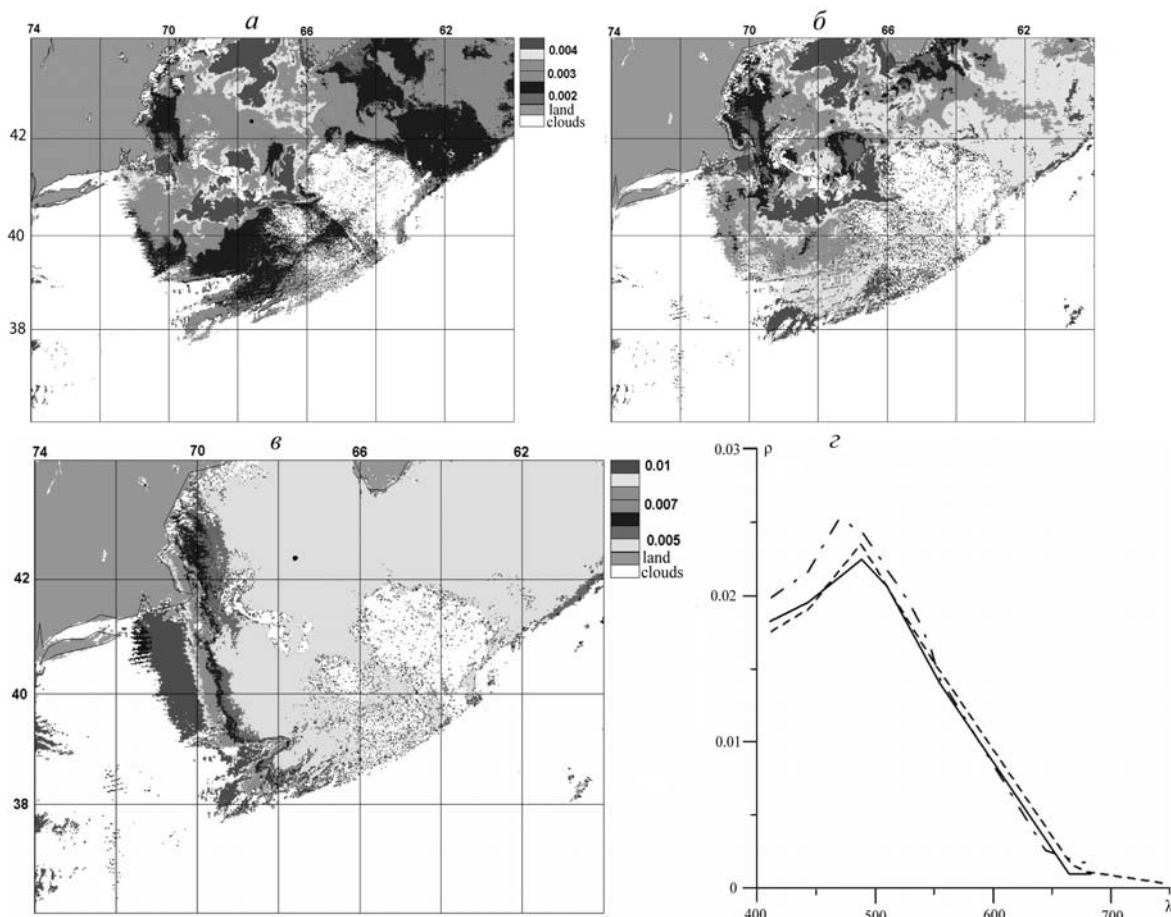


Рис.1. Распределения коэффициента яркости моря  $R_{rs}(531)$  и модифицированного алгоритма ИО РАН. Атлантический океан, 11 июля 2003 г. (A2002192174500\_L2\_LAC). Темная точка – положение станции, на которой выполнены измерения *in situ*.  
 а – коэффициенты, рассчитанные посредством алгоритма SeaDAS 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.

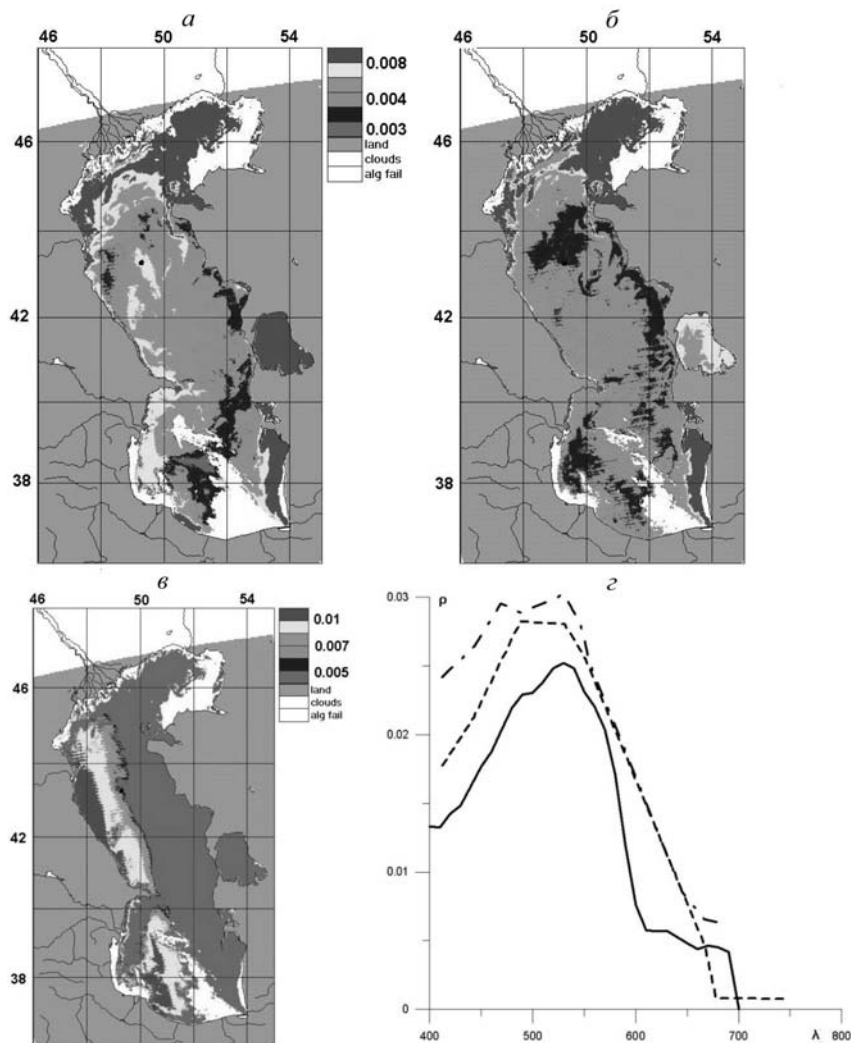


Рис.2. Распределения коэффициента яркости моря  $Rrs(531)$ . Каспийское море, 25 июля 2008 г. (A2008207094500\_L2\_LAC). Усл. обознач. см. на рис.1.

\*\*\*

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 натуральных 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.

