



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 than 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 551.46

© И.М.Левин<sup>1</sup>, М.Дарецкий<sup>2</sup>, С.Саган<sup>2</sup>, П.Ковальчук<sup>2</sup>, А.Здун<sup>2</sup>, Т.М.Радомысльская<sup>1</sup>,  
М.А.Родионов<sup>1</sup>, 2012

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

<sup>2</sup>Институт океанологии ПАН, Сопот, Польша

osopt@yandex.ru

## МОЖНО ЛИ ПРИМЕНЯТЬ К БАЛТИЙСКОМУ МОРЮ ИЗВЕСТНЫЕ МОДЕЛИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ?

Проанализирована возможность применения к Балтийскому морю известных оптических моделей природных вод. С использованием большой базы данных по измеренным оптическим характеристикам воды в Балтийском море установлено, что полученные ранее для океанской воды соотношения между показателями рассеяния, ослабления и обратного рассеяния на длине волны 550 нм справедливы и для Балтики. В то же время соотношения, связывающие показатели поглощения и рассеяния хлорофилла, и показатели поглощения растворенного органического вещества с концентрацией хлорофилла не применимы в оптически сложном бассейне Балтийского моря.

**Ключевые слова:** первичные гидрооптические характеристики, фитопланктон, желтое вещество.

**Обзор известных моделей оптических свойств воды.** Существует несколько обычно используемых моделей, связывающих первичные гидрооптические характеристики (ПГХ) морской воды с концентрацией оптически активных веществ (ОАВ) – фитопланктона, растворенного органического вещества (РОВ) и минеральной взвеси. Имеются также модели, которые описывают корреляции между различными ПГХ для вод типа 1 и 2 («Case 1» и «Case 2» по классификации Мореля).

В частности, спектральная зависимость показателя поглощения РОВ выражается через концентрацию РОВ ( $Y$ ), определяемую по его коэффициенту поглощения на длине волны  $\lambda = 440$  нм ( $Y = a_y(440)$ ), обычно выражается соотношением

$$a_y(\lambda) = a_y(440) \exp[-S(\lambda - 440)]. \quad (1)$$

В течение долгого времени величина коэффициента  $S$  была принята равной  $0.014 \text{ нм}^{-1}$  [1–3]. Однако впоследствии было установлено, что  $S$  меняется в пределах  $0.011$ – $0.019 \text{ нм}^{-1}$  [4, 5].

Модели, описывающие зависимость между коэффициентом поглощения фитопланктона  $a_c(\lambda)$  и концентрацией хлорофилла  $C$  [5, 6]:

$$a_c(440) = 0.043C^{0.678}, \quad a_c(440) = 0.052C^{0.635}, \quad (2a, б)$$

$$a_c(550) = 0.007C^{0.92}, \quad a_c(550) = 0.012C^{0.83}. \quad (3a, б)$$

Уравнения (2a) и (3a) относятся только к живому фитопланктону, в то время как уравнения (2б) и (3б) учитывают также биогенный детрит и гетеротрофные организмы.

Модели, используемые для расчета коэффициента рассеяния фитопланктона при  $\lambda = 550$  нм [3, 7–9]:

$$b_c(550) = 0.3C^{0.62}, \quad b_c(550) = 0.416C^{0.766}, \quad (4a, б)$$

где уравнение (4a) относится к водам типа 1, а уравнение (4b) к водам типа 2. Напомним, что воды 1-го типа – воды, в которых концентрация биологических частиц (фитопланк-

тона) значительно превышает концентрацию теригенных (минеральных) частиц, в водах 2-го типа, наоборот, преобладает минеральная взвесь. Воды открытого океана в основном относятся к типу 1, прибрежные воды и воды внутренних морей – к типу 2.

Рассмотрим модели, которые описывают связь между концентрациями РОВ и фитопланктона. Нам известны три различных соотношения между  $a_y(440)$  и  $C$ :

$$a_y(440) = 0.2[0.052C^{0.635} + a_w(440)] \quad (5)$$

( $a_w$  – коэффициент поглощения чистой морской воды [10]),

$$a_y(440) = 0.032C^{0.63}, \quad (6)$$

$$a_y = a_f^\circ C_f \exp(-k_f \lambda) + a_h^\circ C_h \exp(-k_h \lambda),$$

$$C_f = 1.74098 C \exp(0.12327C), \quad C_h = 1.19334 C \exp(0.12343C), \quad (7)$$

$$a_f^\circ = 35.959 \text{ м}^2/\text{мг}, \quad a_h^\circ = 18.828 \text{ м}^2/\text{мг}, \quad k_f = 0.0189 \text{ нм}^{-1}, \quad k_h = 0.01105 \text{ нм}^{-1}.$$

Уравнение (5) взято из [6, 7], (6) – из [11] и (7) – из [12]. Уравнения (5), (6) относятся к водам типа 1, а (7) – и к типу 1, и к типу 2.

В частности, перечисленные оптические модели использовались в важной задаче оптической океанологии – задаче восстановления концентраций ОАВ из спектров яркости моря [13–15]. Естественно, что для оценки точности восстановления необходимо знать точность этих моделей и понимать, можно ли их применять в данном регионе океана. Например, расчеты [15] показали, что если использовать модели (5)–(7), точность восстановления концентраций  $Y$  и  $C$  из спектров яркости океана радикально увеличивается по сравнению с точностью восстановления  $Y$  и  $C$ , если они считаются независимыми. К сожалению, во всех вышеприведенных моделях, за исключением (1), точность моделей неизвестна.

Модель, связывающая различные гидрооптические характеристики на длине волны 550 нм, была предложена Левиным и Копелевичем [16] на основании около 70 измерений показателей ослабления  $c$  и рассеяния  $b$  в различных участках Атлантического и Тихого океанов и в Аравийском море в диапазоне показателя  $c = 0.08$ – $2.5 \text{ м}^{-1}$  и вероятности выживания фотона  $\omega_0 = b/c = 0.3$ – $0.9$ . По этим измерениям показатели ослабления и рассеяния связаны линейной регрессией

$$b = 0.944c - 0.048 \quad (8)$$

со среднеквадратичным отклонением  $\sigma_b = 0.022 \text{ м}^{-1}$ . Там же [16] на основании уравнения (8) было получено соотношение между вероятностью выживания фотона и вероятностью рассеяния назад  $\tilde{b}_b = b_b/b$  ( $b_b$  – показатель рассеяния назад):

$$\tilde{b}_b = 0.01796/\omega_0 - 3.7 \cdot 10^{-5} \approx 0.018/\omega_0, \quad (9)$$

$$\tilde{b}_b = 0.0183/\omega_0 - 0.0094. \quad (10)$$

Уравнения (9), (10) относятся к водам 2-го и 1-го типов соответственно. Таким образом, модель (8)–(10) охватывает оба типа вод. Однако она, строго говоря, неприменима в гипер-продуктивных водах с высокой концентрацией хлорофилла и неизвестно, применима ли в Балтийском море, поскольку измерения гидрооптических характеристик, на основе которых построены соотношения (8)–(10), в таких водах и в Балтийском море не проводились.

Необходимо подчеркнуть, что длина волны около 550 нм, для которой получены регрессии (8)–(10), имеет особое значение для теории подводного видения, поскольку подводные системы видения работают именно в этой спектральной области. Формулы

(8)–(10) позволяют найти все необходимые для теории видения гидрооптические характеристики, если известен показатель ослабления  $c$  или прозрачность по диску Секки, связь которой с показателем  $c$  установлена [17].

Хотя общепринято, что Балтийское море относится к водам типа 2, оно представляет собой специфический водоем, отличающийся высокой концентрацией РОВ и минеральных частиц. Задачей данной статьи является проверка применимости вышеприведенных моделей, выражаемых соотношениями (1)–(10), к Балтийскому морю. Для этой цели используются данные измерений показателей поглощения  $a(\lambda)$  и ослабления  $c(\lambda)$ , а также  $a_v(\lambda)$  и  $C$  в различных участках Балтийского моря. Мы также сравним некоторые модели, основанные на этих измерениях, с данными измерений, проведенных в Балтийском море ранее (соотношения между  $S$  и  $a_v(400)$  и между  $Y$  и  $C$  [18, 19]).

**Измерения.** Измерения коэффициентов поглощения и ослабления растворенного и взвешенного в воде вещества  $a_m(\lambda) = a(\lambda) - a_w(\lambda)$ ,  $c_m(\lambda) = c(\lambda) - c_w(\lambda)$  ( $a_w$  и  $c_w$  – коэффициенты поглощения и ослабления чистой морской воды) в Балтийском море проводились в 14 экспедициях на научно-исследовательском судне «Oceania». Использовался погружаемый прибор AC-9 (производство Wet Labs, США) на длинах волн  $\lambda$ , равных 412, 440, 488, 510, 532, 555, 650, 676 и 715 нм. Измерялись также концентрация хлорофилла  $C$  и поглощение РОВ  $a_v(\lambda)$ .

Были проведены калибровка и корректировка показаний прибора в соответствии с рекомендациями его разработчиков [20], которые, по их данным, должны обеспечивать точность измерений 2.5–5 %. Величина показателя рассеяния взвешенного вещества  $b_m(\lambda)$  определялась как  $c_m(\lambda) - a_m(\lambda)$ .

Мы проанализировали данные измерений, проведенных в двух разных сезонах: летом (апрель–октябрь) и зимой (ноябрь–март). Летние данные содержат 162 вертикальных профиля (10 045 элементов) на глубинах  $z = 0-125$  м при  $c_m = 0.07-1.91$  м<sup>-1</sup>,  $a_m = 0.01-0.25$  м<sup>-1</sup>, зимние – 53 вертикальных профиля (3297 элементов), измеренных на глубинах  $z = 0-91$  м при  $c_m = 0.08-1.58$  м<sup>-1</sup>,  $a_m = 0.018-0.180$  м<sup>-1</sup>.

**Применимость для Балтики соотношений между показателями поглощения и ослабления в спектральном участке около 550 нм.** Все измеренные коэффициенты  $c_m$ ,  $a_m$  и рассчитанные  $b_m = c_m - a_m$  растворенного и взвешенного вещества на длине волны 555 нм пересчитывались в полные коэффициенты рассеяния, ослабления и поглощения:  $b = b_m + b_w$ ,  $c = c_m + c_w$ ,  $a = a_m + a_w$ . В соответствии с [10, 21]  $a_w(555 \text{ нм}) = 0.0596$  м<sup>-1</sup>,  $b_w(555 \text{ нм}) = 0.0019$  м<sup>-1</sup>, и  $c_w(555 \text{ нм}) = 0.0615$  м<sup>-1</sup>. Измеренные величины  $c$  и  $b$  показаны точками на рис.1, а, а прямая представляет собой линейную регрессию:

$$b = 0.9393c - 0.0774. \quad (11)$$

Среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных  $\sigma_b$  составляет  $8.2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>-1</sup>, средний коэффициент вариации – около 1 %, коэффициент корреляции  $r^2 = 0.9994$ , т.е. корреляция между показателями ослабления и рассеяния в Балтийском море (11) сильнее, чем в океане (8): среднеквадратичное отклонение  $\sigma_b = 0.008$  м<sup>-1</sup> и  $0.022$  м<sup>-1</sup> соответственно. Чтобы установить, насколько соотношение (8) пригодно для применения в Балтийском, на рис.1, точками показаны результаты тех же измерений в Балтийском море, что и на рис.1, а, а прямая соответствует регрессии (8) для океанской воды. Несмотря на то что измерения, по которым построены регрессии (8) и (11), проводились в разных морских районах и разными измерительными приборами (в [16] показатель ослабления измерялся прибором СГН, а показатель рассеяния малоугловым измерителем рассеяния [22, 23]), регрессия (8) может быть применена и в Балтийском море с небольшой дополнительной погрешностью по сравнению с (11) (для данных рис.1, б  $\sigma_b = 0.033$  м<sup>-1</sup>,  $r^2 = 0.9899$ , тогда как для Балтийского моря (рис.1, а)  $\sigma_b = 0.0082$  м<sup>-1</sup>,  $r^2 = 0.9994$ ).

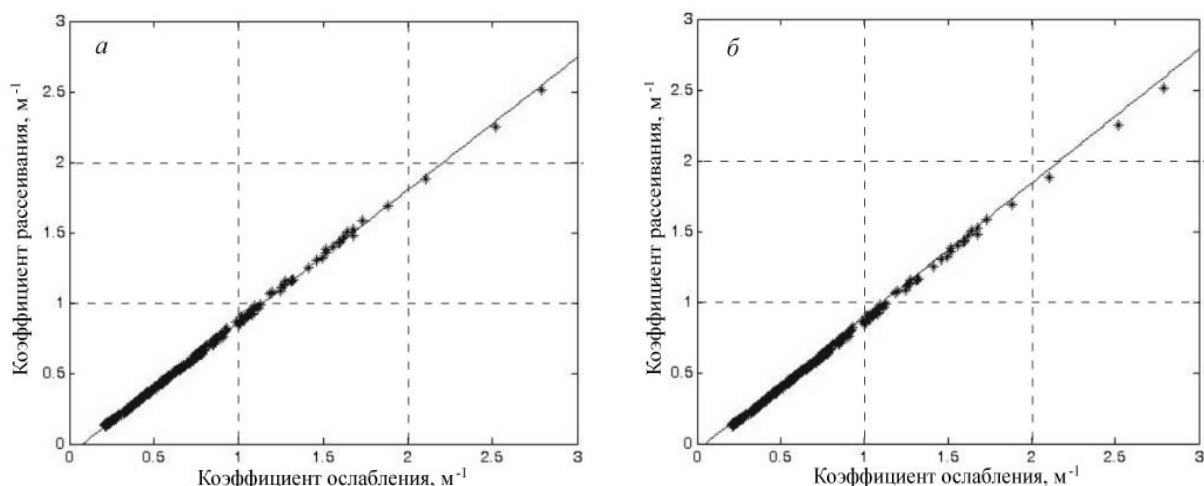


Рис.1. Регрессия между показателями ослабления и рассеяния для  $\lambda = 555$  нм в Балтийском море (а) и соотношение между показателями ослабления и рассеяния (б). Точки – данные измерений в Балтийском море ( $\lambda = 555$  нм), прямая – регрессия (8), полученная по измерениям в океане для  $\lambda = 550$  нм в [16].

Применимость соотношений между показателями обратного рассеяния и ослабления в спектральном участке для Балтики составляет около 550 нм. Показатель обратного рассеяния  $b_b$  и вероятность обратного рассеяния  $\tilde{b}_b = b_b / b$  – это ключевые параметры в теории подводного видения и дистанционного зондирования. Чтобы определить их для Балтийского моря, положим

$$b_b = b \tilde{b}_b = b_{bm} + b_{bw} = b_m \tilde{b}_{bm} + b_w \tilde{b}_{bw}, \quad (12)$$

где  $b_{bm}$  и  $\tilde{b}_{bm}$  – соответственно показатель обратного рассеяния и вероятность обратного рассеяния взвешенного вещества,  $b_{bw}$  и  $\tilde{b}_{bw} = 0.5$  – показатель обратного рассеяния и вероятность обратного рассеяния чистой морской воды. Из (11) и (12) с учетом значения  $b_w(555 \text{ нм}) = 0.0019 \text{ м}^{-1}$  следует:

$$b_b = [0.9393 c - 0.0774] \tilde{b}_{bm} + 0.00095. \quad (13)$$

Таким образом, соотношение между  $b_b$  и  $c$  зависит от  $\tilde{b}_{bm}$ .

В литературе для вод типа 2 обычно принимается впервые установленная Петцольдом при длине волны 514 нм величина  $\tilde{b}_{bm} = 0.019$  [24] или близкая к ней  $\tilde{b}_{bm} = 0.018$ – $0.020$  (см., например, [25, 26]). Во всяком случае, считается, что для вод типа 2, в которых концентрация минеральной взвеси значительно превышает концентрацию частиц биологического происхождения, значение  $\tilde{b}_m = 0.019$  адекватно [27].

Подставляя  $\tilde{b}_m = 0.019$  в (13), получаем

$$b_b = (0.01785 c - 5.2 \cdot 10^{-4}), \quad (14)$$

а вероятность рассеяния назад из (14) и (11)

$$\tilde{b}_b = (0.01785 c - 5.2 \cdot 10^{-4}) / (0.9393 c - 0.0774). \quad (15)$$

Функции, описываемые соотношениями (15) и (9), показаны на рис.2.

Обе кривые различаются очень мало: для  $c > 0.4 \text{ м}^{-1}$  разница между  $\tilde{b}_m$  не превышает 2%. При  $c < 0.3 \text{ м}^{-1}$  она возрастает и достигает 6% при  $c = 0.2 \text{ м}^{-1}$ , т.е. при минимальных значениях  $c(555 \text{ нм})$ , зарегистрированных в Балтийском море в данной серии измерений.



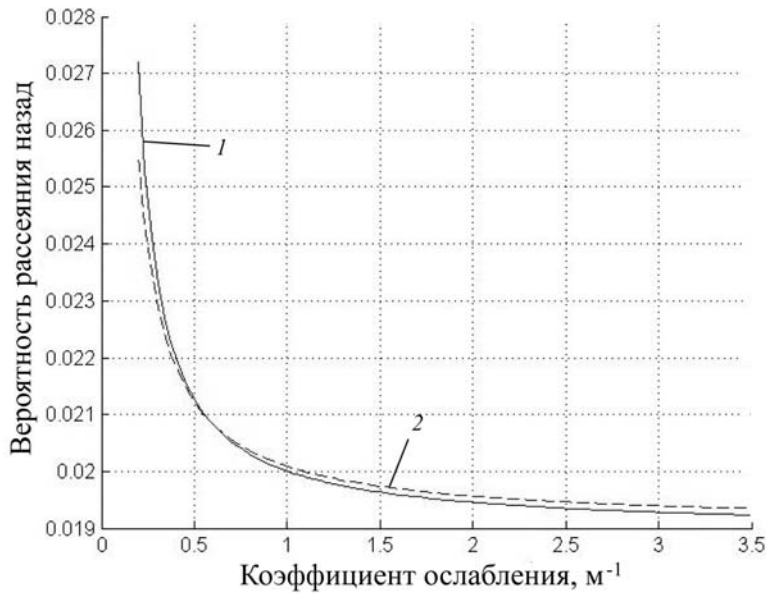


Рис.2. Вероятность рассеяния назад как функция показателя ослабления в Балтийском море при  $\lambda = 555$  нм по (15) (1) и  $\lambda = 550$  нм по измерениям [16] (2).

Таким образом, модель (8)–(10), связывающая гидрооптические характеристики  $s$ ,  $b$ ,  $b_b$  и  $\tilde{b}_b$  в области спектра около 550 нм, необходимые для теории подводного видения, может быть применима не только в океанской воде, но и в Балтийском море. Это подтверждает универсальность данной модели и позволяет надеяться, что она пригодна для любых морских районов.

**Коэффициент  $S$  спектрального распределения поглощения РОВ.** Значения  $S$  (см. (1)) для Балтийского моря были определены ранее и опубликованы в [18, 19]. Они показаны на рис.3, б. Резуль-

таты наших аналогичных измерений представлены на рис.3, а.

Видно, что величина  $S$ , по нашим данным, находится в основном в пределах  $0.016\text{--}0.024$   $\text{нм}^{-1}$ , а в [19] – от  $0.012$  до  $0.028$   $\text{нм}^{-1}$ . Разницу между этими диапазонами и соответствующими регрессиями (см. подписи к рис.3), по-видимому, можно объяснить тем, что наши данные ограничиваются открытыми районами Балтийского моря, а данные заливов (Гданьского и Померанского) были исключены, чтобы избежать экстремальных значений, присущих районам вблизи устьев рек.

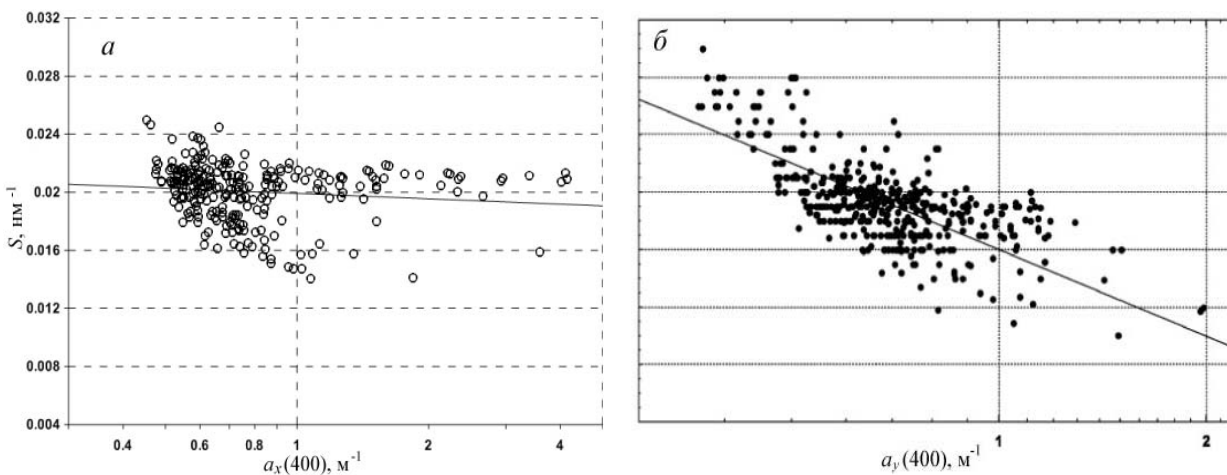


Рис.3. Соотношение между коэффициентом  $S$  и показателем поглощения  $a_y(400)$  по нашим измерениям – линейная регрессия  $S = 0.020 - 0.0012 (\log a_y(400))$  (а) и соотношение между коэффициентом  $S$  и показателем поглощения  $a_y(400)$  по работе [19] – линейная регрессия  $S = 0.016 - 0.022 (\log a_y(400))$  (б).

На рис.4 показана гистограмма, которая иллюстрирует плотность вероятности коэффициента  $S$  в наших измерениях. Среднее значение  $S = 0.0202$   $\text{нм}^{-1}$ , среднеквадратичное отклонение  $0.0032$   $\text{нм}^{-1}$ , 93 % значений  $S$  находятся в пределах от  $0.0165$  до  $0.0225$   $\text{нм}^{-1}$ . Сравнивая этот диапазон с указанным выше диапазоном  $S$  в океанской воде

(0.011–0.019  $\text{nm}^{-1}$ ), видим, что значения  $S$  в Балтийском море выше, чем в океане, хотя их диапазоны частично перекрываются.

**Зависимость между показателем поглощения хлорофилла  $a_c(\lambda)$  и его концентрацией  $C$ .** Чтобы определить значение  $a_c(\lambda)$ , которое непосредственно не измерялось, следуя [1], положим:

$$a_c(\lambda) = a(\lambda) - a_w(\lambda) - a_y(\lambda). \quad (16)$$

На рис.5, а, б точками показаны значения  $a_c(440)$  и  $a_c(550)$ , найденные по (16) с использованием измеренных значений  $a(440)$ ,  $a(550)$  и  $a_y(440)$ ,  $a_y(550)$ . Функции (2а), (3а) показаны пунктирными, а (2б), (3б) – сплошными кривыми. Видно, что хотя функция (2) ближе к экспериментальным данным, чем (3), ни (2) ни (3) не могут быть рекомендованы для применения в Балтийском море.

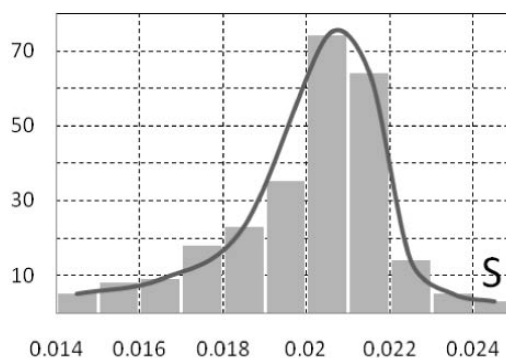


Рис.4. Гистограмма распределения  $S$  в Балтийском море.

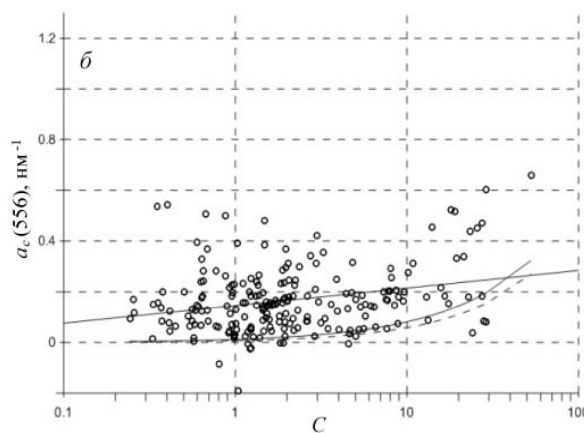
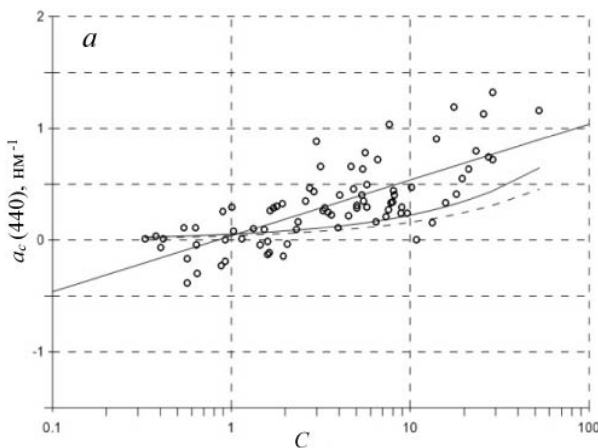


Рис.5. Зависимость между  $a_c(440)$  и  $C$ .

а: функции (16) – точки, (2б) – сплошная кривая, (2а) – пунктирная. Регрессия:  $a_c(440) = 0.038 + 0.5 \log C$ ,  $r^2 = 0.55$ ; б: функции (16) – точки, (3б) – сплошная кривая, (3а) – пунктирная. Регрессия:  $a_c(550) = 0.045 + 0.069 \log C$ ,  $r^2 = 0.07$ .

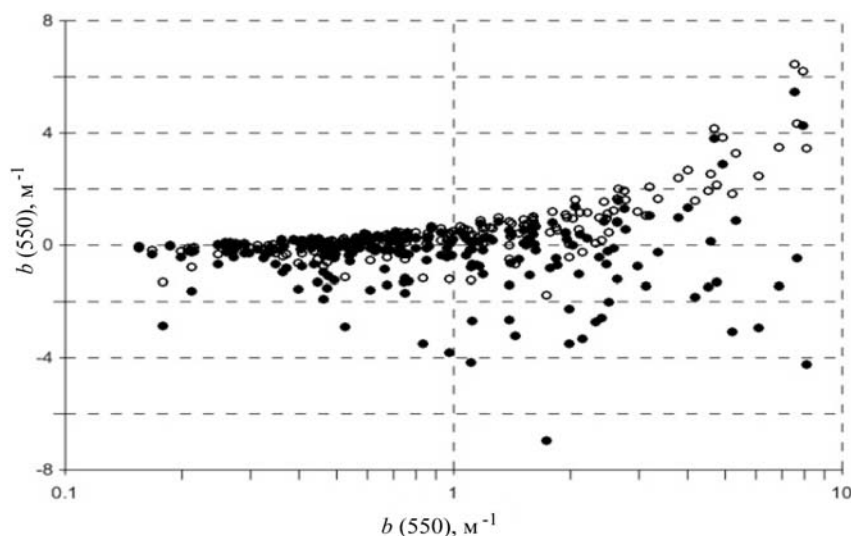


Рис.6. Зависимость  $b_x(550)$  от  $b(550)$ , найденная из измеренных значений  $b(550)$  и  $b_c(550)$ , вычисленных (с использованием измеренных  $C$ ) по (4а) (темные точки) и (4б) (светлые точки).

**Зависимость между показателем рассеяния фитопланктона  $b_c(550)$  и его концентрацией  $C$ .** Чтобы определить значение показателя полного рассеяния минеральной взвеси  $b_x(550)$ , которое непосредственно не измерялось, следуя [1], положим

$$b_x(\lambda) = b(\lambda) - b_w(\lambda) - b_c(\lambda),$$

где  $b_c(550)$  выражается формулой (4). Рис.6 иллюстрирует зависи-

мость  $b_x(550)$  от  $b(550)$ , где используются измеренные значения  $b(550)$  и концентрации фитопланктона  $C$ , входящей в (4). Из рисунка видно, что большинство значений  $b_x(550)$  близки к нулю или даже отрицательны. Между тем известно, что концентрация минеральной взвеси в Балтийском море достаточно велика. Поэтому из рис.6 следует, что соотношения (4а, б) не могут быть рекомендованы для применения в Балтийском море.

**Зависимость между концентрациями фитопланктона и растворенного органического вещества.** Как уже говорилось выше, в задаче восстановления концентраций оптически активных веществ из спектров яркости моря очень важным вопросом является наличие корреляции между концентрациями РОВ ( $a_y(440)$  или  $a_y(400)$ ) и фитопланктона  $C$ . На рис.7 показаны наши экспериментальные данные (точки) и функции (5)–(7) (прямые 1, 2, 3); прямая 4 – линейная регрессия наших экспериментальных данных ( $r^2 = 0.0012$ ), 5 – регрессия для Балтийского моря ( $r^2 = 0.25$ ), взятая из [18] и пересчитанная с 400 на 440 нм по соотношению (1) при  $S = 0.02 \text{ нм}^{-1}$ . Видно, что в Балтийском море корреляция между концентрациями РОВ и фитопланктона практически отсутствует.

\*\*\*

Мы проанализировали применимость к Балтийскому морю ряда известных моделей оптических характеристик воды и концентраций оптически активных веществ, полученных для вод типа 1 и 2. Показано, что соотношения между коэффициентами ослабления, рассеяния и обратного рассеяния на длине волны  $\lambda = 550 \text{ нм}$ , полученные по измерениям в океанской и морской воде, справедливы и для Балтийского моря. Возможное объяснение этого в том, что данная длина волны далеко отстоит от максимумов поглощения фитопланктона и РОВ, преобладающих в Балтийском море. Однако оптические характеристики воды около  $\lambda = 550 \text{ нм}$  важны для проблемы видения, поскольку почти все системы подводного видения и локации работают в этой спектральной области. Спектральная зависимость поглощения РОВ (1) также справедлива в Балтийском море с коэффициентом  $S$  несколько большим, чем в океанских водах. С другой стороны, широко используемые модели, связывающие показатели поглощения и рассеяния хлорофилла и показатели поглощения РОВ с концентрацией хлорофилла, в Балтийском море неприменимы.

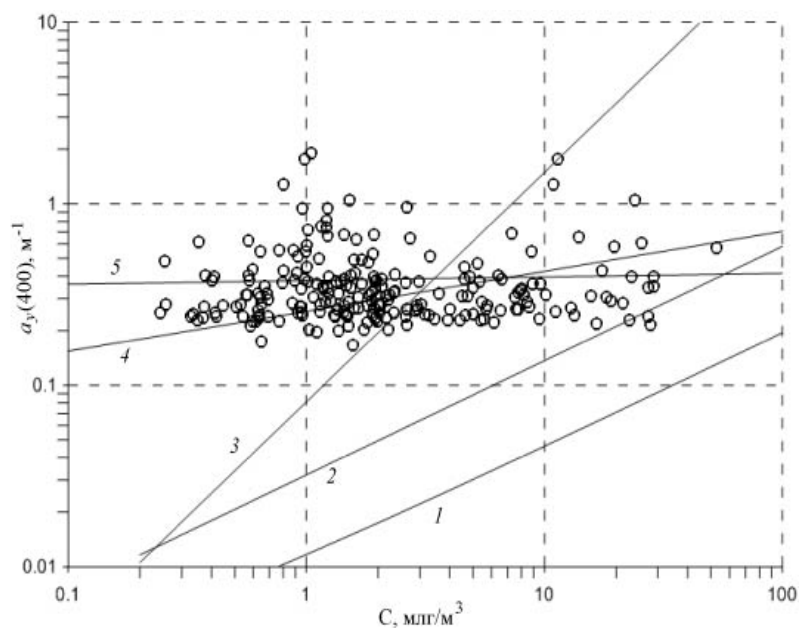


Рис.7. Соотношение между концентрациями РОВ и фитопланктона. Точки – наши экспериментальные данные; прямые 1, 2, 3 – соотношения (5)–(7); 4 – регрессия экспериментальных данных ( $r^2 = 0.0012$ ), 5 – регрессия для Балтийского моря ( $r^2 = 0.25$ ) из [18].

Работа поддержана РФФИ, проект 10-05-00311.

## Литература

1. Копелевич О.В. Оптические свойства морской воды // Оптика океана. Т.1. М.: Наука, 1983. С.150–234.
2. Sathyendranath S., Prieur L., Morel A. A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters // Intern. J. of Rem. Sensing. 1989. V.10. P.1373–1394.

3. *Morel A., Loisel H.* Apparent optical properties of oceanic water: dependence on the molecular scattering contribution // *Applied Optics*. 1998. V.37, N 21. P.4765–4776.
4. *Kopelevich O.V.* The current low-parametric models of seawater optical properties // *Proc. 1th International Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters»*. St.Petersburg, 2001. P.18–23.
5. *Bricaud A., Morel A., Babin M., Allaly K., Claustre H.* Variation of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: analysis and implications for bio-optical models // *J. Geophys. Res.* 1998. V.103, N C13. P.31,033–31,044.
6. *Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization // *J. Geophys. Res.* 1995. V.100, N C7. P.13,321–13,332.
7. *Morel A., Maritorena S.* Bio-optical properties of oceanic waters: A reappraisal // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106, N C4. P.7163–7180.
8. *Loisel H., Morel A.* Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: a reexamination // *Limnology and Oceanography*. 1998. V.43, N 5. P.847–858.
9. *Morel A., Antoine D., Gentili B.* Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // *Applied Optics*. 2002. V.41, N 30. P.6289–6306.
10. *Pope R.M., Fry E.S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. V.36, N 33. P.8710–8723.
11. *Morel A.* Are the empirical relationships describing the bio-optical properties of case 1 waters consistent and internally compatible? // *J. Geophys. Res.* 2009. V.114, N C01016. doi: 10.1029/2008JC004803.
12. *Haltrin V.* Chlorophyll-based model on seawater optical properties // *Appl.Optics*. 1999. V.38, N 33. P.6826–6832.
13. *Левин И.М., Левина Е.И., Гильберт Г.Д., Стюарт С.Ю.* Оптимальный алгоритм дистанционного определения оптически активных веществ в океане с помощью многоканального спектрометра // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т.41, № 5. С.693–701.
14. *Levin I., Levina E., Gilbert G., Stewart S.* Role of sensor noise in hyperspectral remote sensing of natural waters: Application to retrieval of phytoplankton pigments // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V.95, N 2. P.264–271.
15. *Levin I.M., Levina E.I.* Effect of atmospheric interference and sensor noise in retrieval of optically active materials in the ocean by hyperspectral remote sensing // *Applied Optics*. 2007. V.46, N 28. P.6896–6906.
16. *Левин И.М., Копелевич О.В.* Корреляционные соотношения между первичными гидрооптическими характеристиками в области спектра около 550 нм // *Океанология*. 2007. Т.47, № 3. С.344–348.
17. *Dolin L., Gilbert G., Levin I., Luchinin A.* Theory of imaging through wavy sea surface. Nizhniy Novgorod: Institute of Applied Physics, 2006. 171 p.
18. *Kowalczyk P.* Seasonal variability of yellow substance absorption in the surface layer of the Baltic sea // *J. Geophys. Res.* 1999. V.104, N C12. P.30,047–30,058.
19. *Kowalczyk P., Olszewski J., Darecki M., Kaczmarek S.* Empirical relationships between coloured dissolved organic matter and apparent optical properties in Baltic Sea waters // *Intern. J. of Rem. Sensing*. 2005. V.26, N 2. P.345–370.
20. *Zaneveld J.R.V., Kitchen J.C., Moore C.* The scattering error correction of reflecting-tube absorption meters // *Ocean Optics XII (Jaffe, J.S., Ed.)*, Proc. SPIE. 1994. V.2258. P.44–55.
21. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of the clearest natural waters (200–800 nm) // *Appl.Opt.* 1981. V.20, N 2. P.177–184.
22. *Козлянинов М.В.* Руководство по гидрооптическим измерениям в море // *Тр. ИОАН*. 1961. Т.47. С.37–79.
23. *Копелевич О.В., Маштаков Ю.Л., Русанов С.Ю.* Аппаратура и методика исследования оптических свойств морской воды // *Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах*. 1974. М.: Наука. С.97–107.
24. *Petzold T.J.* Volume scattering function for selected ocean waters. San Diego: Scripps Inst. of Oceanography, 1972. 79 p.
25. *Gould R.W., Arnone R.A., Martinolich P.M.* Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and 2 waters // *Appl. Opt.* 1999. V.38, N 12. P.2377–2383.
26. *Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S.* Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2. Deriving bottom depths and water properties by optimization // *Appl. Opt.* 1999. V.38, N 18. P.3831–3843.
26. *Morel A., Antoine D., Gentili B.* Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // *Appl. Opt.* 2002. V.41. P.6289–6306.

Статья поступила в редакцию 24.02.2012 г.

