



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 551.465

© С.В.Вазюля, О.В.Копелевич, 2012

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

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

svershova@mail.ru

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ БАЛАНСА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ В БАРЕНЦЕВОМ, БЕЛОМ, КАРСКОМ И ЧЕРНОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены сравнительные оценки основных составляющих баланса фотосинтетически активной радиации (ФАР) (падающей, отраженной и вышедшей из водной толщи) и объемного поглощения солнечного излучения в приповерхностном слое в Баренцевом, Черном, Карском и Белом морях по данным судовых и спутниковых измерений. Оптические свойства вод значительно различались, в частности, показатель диффузного ослабления подводной облученности  $K_d(555)$  изменялся приблизительно от  $0.13 \text{ м}^{-1}$  до  $0.42 \text{ м}^{-1}$ . Эти различия обуславливали существенную разницу в составляющих баланса ФАР в разных морях. Совпадение оценок характеристик проникновения солнечной радиации по судовым и спутниковым данным в приповерхностном слое вполне удовлетворительное.

**Ключевые слова:** фотосинтетически активная радиация, баланс ФАР, спутниковые данные.

Солнечное излучение видимого диапазона – фотосинтетически активная радиация (ФАР) – способно проникать в водную толщу. Баланс ФАР на поверхности моря и в водной толще зависит от условий освещения и оптических свойств морской воды. Его количественная оценка имеет большое значение для исследования утилизации солнечного излучения при создании первичной продукции фитопланктона, а также влияния объемного поглощения в водной толще на термическую структуру и теплосодержание поверхностного слоя. Для выполнения такой оценки необходимы данные о величинах ФАР, падающей на поверхность моря, восходящей от поверхности и проникающей на различные глубины в водной толще. Такие измерения в судовых экспедициях проводятся редко, однако для этой цели можно использовать данные спутниковых измерений, которые позволяют, в частности, оценить пространственную и временную изменчивость утилизируемой ФАР, исследовать влияние на нее различных факторов.

В Лаборатории оптики океана ИОРАН создан комплекс алгоритмов для расчета по данным спутниковых сканеров цвета основных составляющих баланса ФАР (падающая, отраженная и вышедшая из водной толщи) на уровне поверхности моря [1] и оценки объемного поглощения солнечного излучения в приповерхностном слое [2, 3]. Применимость разработанных алгоритмов для морей высоких широт была показана на примере Баренцева моря [1]. Ошибки расчета составляющих баланса ФАР, по данным спутниковых сканеров цвета, в основном обусловлены неточностью входных параметров расчета из-за ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных [3].

Ниже даны сравнительные оценки баланса ФАР в Баренцевом, Черном, Карском и Белом морях по данным судовых и спутниковых измерений. Судовые измерения были проведены в Баренцевом море в рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов», август 1998 г., в Карском и Белом морях в рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», сентябрь 2007 г., и в Черном море в рейсе НИС «Академик Профессор Штокман», март 2009 г. Более подробная информация приведена в табл.1. Все натурные измерения выполнены

при безоблачном небе и высоте Солнца меньше 40°. Оптические свойства вод варьировались в широком диапазоне: от чистых вод с показателем диффузного ослабления подводной облученности сверху  $K_d(555) \approx 0.13 \text{ м}^{-1}$  до очень мутных в Белом море ( $K_d(555) = 0.42 \text{ м}^{-1}$ ) и Баренцевом море на станции 1112 ( $K_d(555) = 0.35 \text{ м}^{-1}$ ).

Таблица 1

Станции, использованные для сравнительных оценок баланса ФАР

Море	Станция	Дата	Координаты	Зенитный угол солнца, градус	$K_d(555), \text{ м}^{-1}$
Баренцево	1112	19.08.1998	69.09°с.ш., 58.29°в.д.	67.6	0.35
	1131	24.08.1998	69.77, 56.28	63.3	0.13
Белое	4939	01.09.2007	65.75, 38.73	76.8	0.42
Карское	4956	11.09.2007	71.25, 65.84	66.6	0.12
Черное	2	09.03.2009	43.37, 36.7	51.0	0.13

**Методика измерений и расчетов. Судовые измерения.** Натурные измерения в Баренцевом море проводились в основном посредством УФ-ФАР-радиометра, измерявшего поверхностную и подводную облученность в видимом и ультрафиолетовом спектральных диапазонах. Эти данные ранее уже были использованы для проверки методики оценки баланса ФАР [1–3].

В Белом, Карском и Черном морях посредством измерителя светового режима на поверхности и в водной толще  $E$ -метра [4]. Измерялись облученность сверху на поверхности моря  $E_d(0^+)$  и подводная облученность в зависимости от глубины  $z$  (нисходящая  $E_d(z)$  и восходящая  $E_u(z)$ ) в четырех спектральных каналах: 443, 490, 555, 625 нм. По этим данным определялись величина облученности сверху, непосредственно под поверхностью моря  $E_d(0^-)$  и показатель диффузного ослабления подводной облученности  $K_d$  для вышеуказанных длин волн. Методика измерений и расчета этих величин описана в работе [4]. Затем с помощью специально разработанных алгоритмов рассчитывались спектральные величины облученности на поверхности и непосредственно под поверхностью, показатель диффузного ослабления подводной облученности, подводных облученностей сверху и снизу на разных глубинах во всем диапазоне ФАР. Ошибка расчета спектральных величин поверхностной облученности составляет около 10 %, показателя диффузного ослабления подводной облученности – 6 % [4].

**Спутниковые наблюдения.** Для расчетов использовались: значения спектральной яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренные спутниковыми сканерами цвета SeaWiFS (Баренцево море) и MODIS-Aqua (Белое, Карское, Черное моря); сопутствующие параметры, входящие в комплект спутниковых данных и необходимые для проводимых расчетов (такие, например, как содержание озона и скорость ветра). Данные получены из архива GSFC DAAC (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Для расчетов использовались ранее выведенные формулы [1–3], для спектральных величин подводной облученности сверху  $E_d(z)$  – экспоненциальный закон ослабления с глубиной:

$$E_d(z) = E_d(0^-) \exp[-K_d z],$$

где для простоты длина волны  $\lambda$  опущена.

Величина  $E_d(0^-)$  вычислялась исходя из предположения об отсутствии поглощения при прохождении излучения через поверхность:

$$E_d(0^+) - E_{ref} - E_w = E_d(0^-) - E_u(0^-). \quad (1)$$

Здесь  $E_{ref}$  и  $E_w$  – облученности снизу над поверхностью, создаваемые соответственно отраженным и вышедшим из водной толщи потоками излучения;  $E_u(0^-)$  – облученность снизу, непосредственно под поверхностью воды. Алгоритмы расчета величин  $E_d(0^+)$  и  $E_{ref}$ ,  $E_w$  по спутниковым данным подробно описаны в [1].

Величина  $E_u(z)$  рассчитывалась через величину  $E_d(z)$  посредством соотношения

$$E_u(z) = R \cdot E_d(z), \quad (2)$$

где  $R$  – коэффициент диффузного отражения водной толщи.

Предполагается, что величина  $R$  не зависит от глубины и рассчитывается через спектральный коэффициент яркости моря  $\rho$ :

$$R = \rho Q/\pi. \quad (3)$$

Значения  $Q$  для различных спектральных каналов в зависимости от высоты солнца и концентрации хлорофилла можно найти в [5].

Из формул (1) и (2) следует:

$$E_d(0^-) = [E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w] / [1 - R],$$

где  $R$  рассчитывается по формуле (3).

Объемное поглощение в водной толще  $E_{\text{abs}}(\Delta z)$  вычисляется исходя из баланса чистой энергии в рассматриваемом слое  $\Delta z = z_2 - z_1$ :

$$E_{\text{abs}}(\Delta z) = E_d(z_1) - E_d(z_2) + E_u(z_2) - E_u(z_1),$$

где  $E_d(z_1)$ ,  $E_d(z_2)$  – величины подводной облученности сверху на горизонтах  $z_1$  и  $z_2$ ;  $E_u(z_2)$ ,  $E_u(z_1)$  – величины облученности снизу на этих горизонтах.

Спектральный коэффициент яркости моря  $\rho$  определяется в результате атмосферной коррекции спутниковых данных. Полуаналитический биооптический алгоритм [6] позволяет по спектральным значениям  $\rho$  рассчитать спектральные показатели поглощения  $a$  и рассеяния назад  $b_b$  морской воды. Затем вычисляется величина  $K_d$  по формулам [7]

$$K_d = 1.04 D_0 (a + b_b),$$

$$D_0 = (1 - g) / \cos \theta_{0w} + 1.197 g,$$

где  $\theta_{0w}$  – угол преломления прямых солнечных лучей,  $g$  – доля диффузного излучения в общем потоке излучения, падающего на поверхность. Последняя величина определяется по результатам расчетов прохождения солнечного излучения в атмосфере – спутниковые данные.

При расчете дневных экспозиций параметры атмосферы и воды предполагались неизменными в течение всего дня; учитывалось лишь изменение высоты солнца [1]. При этом через каждый час рассчитывались мгновенные спектральные величины поверхностной облученности  $E_d(0^+)$ , потоков отраженного  $E_{\text{ref}}$  и вышедшего из-под поверхности излучения  $E_w$ , а также подводной облученности на различных горизонтах  $E_d(z)$  и поглощенного излучения в разных слоях  $E_{\text{abs}}(\Delta z)$  с разрешением 20 нм в диапазоне ФАР (400–700 нм). Результаты затем интегрировались по спектру и по времени, чтобы получить значения дневных экспозиций всех величин.

Таблица 2

**Сравнение величин дневных экспозиций ФАР на поверхности моря, рассчитанных по алгоритму НАСА и ИОРАН**

Море	НАСА		ИОРАН		Различие, %
	Эйнштейн м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>	МДж м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>	Эйнштейн м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>	МДж м <sup>-2</sup> сут <sup>-1</sup>	
Белое (ст.4939)	32.4	7.03	33.3	7.23	2.7
Карское (ст.4956)	21.8	4.73	22.4	4.86	2.6

Значения дневных экспозиций ФАР на поверхности моря рассчитываются так же, как стандартный продукт обработки данных спутниковых сканеров цвета, и доступны через Интернет (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). В табл.2 сравниваются результаты расчетов по алгоритму НАСА и ИОРАН для станций в Белом и Карском морях; величины ФАР представлены как квантовая (Эйнштейн м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>), так и энергетическая

(МДж м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>) облученности. Для перевода первых во вторые использовался коэффициент 4.6 МДж/Эйнштейн ([http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/seawifs\\_par\\_wfigs.pdf](http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/seawifs_par_wfigs.pdf)).

Как видно из табл.2, совпадение расчетов по разным алгоритмам очень хорошее.

**Результаты измерений и расчетов баланса ФАР.** На рис.1 представлены результаты измерений облученности сверху для четырех каналов Е-метра в Белом море (ст.4939) в сравнении с аналогичными данными, измеренными тем же прибором в Карском море (ст.4956). На рисунке хорошо видно, что облученность в Белом море для всех длин волн уменьшается гораздо более резко, чем в Карском. Наблюдаемые различия связаны в первую очередь с более сильным поглощением солнечного излучения в водах Белого моря, которое обусловлено высоким содержанием окрашенного органического вещества («желтое вещество»).

На рис.2 показано изменения с глубиной спектральных распределений подводной облученности, рассчитанных по результатам измерений *in situ* в Белом и Карском морях. Видно, как в Белом море с глубиной резко «обрезается» коротковолновая часть спектра, и уже на глубине 15 м прошедшее солнечное излучение фактически находится в желто-зеленом интервале спектра 520–630 нм.

На рис.3 представлены результаты сравнения профилей спектральной облученности сверху  $E_d(z)$ , измеренных *in situ* и рассчитанных по спутниковым данным для ст.2 в Черном море.

На рис.4 сравниваются результаты расчетов величин нисходящей ФАР в зависимости от глубины по данным измерений *in situ* и по спутниковым данным в момент проведения натурных измерений. Числа у кривых показывают различия между спутниковыми и натурными оценками ФАР у поверхности и на наибольшей глубине измерения. Совпадение этих оценок можно признать удовлетворительным, учитывая различия между данными в точке (натурные измерения) и, усредненными по площади пикселя (спутниковые данные).

В табл.3 представлены результаты оценки глубин 1% и 0.1%-ной ФАР, относительно падающей на поверхность по данным спутниковых и *in situ* измерений в различных морях.

Таблица 3

Глубина (в м) ФАР по данным спутниковых и *in situ* измерений в различных морях

Море	1%-ная ФАР		0.1%-ная ФАР	
	спутниковые данные	данные измерений	спутниковые данные	данные измерений
Белое (ст.4939)	7	8.8	11.2	14.5
Карское (ст.4956)	25.3	32.2	40.5	51
Черное (ст.2)	26.3	29	42.1	45.7

Как видно из табл.3, для глубин 1%- и 0.1%-ной ФАР в Черном и Карском морях получились близкие значения и сильно отличающиеся от оценок для Белого моря. Как уже указывалось выше, наблюдаемые различия связаны в первую очередь с более сильным поглощением солнечного излучения в водах Белого моря, обусловленным высоким со-

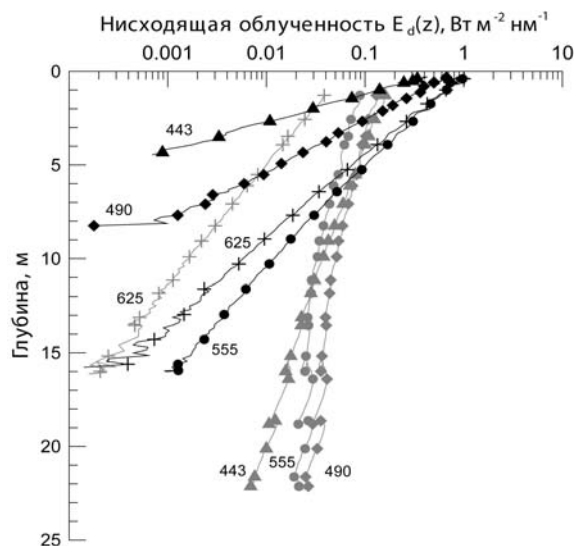


Рис.1. Вертикальное распределение нисходящей облученности, измеренное в водах Белого (ст.4939, темные значки) и Карского (ст.4956, светлые значки) морей.

В обоих случаях глубина моря свыше 25 м. Данные нормированы на облученность, измеренную на поверхности моря  $E_d(0^+)$ . Цифры у кривых – значения длин волн, на которых проводились измерения.



держанием окрашенного органического вещества (желтое). Следует отметить, что различия между значениями, полученными по спутниковым и натурным измерениям, не превышают 25 % в Белом море и меньше 10 % в Черном.

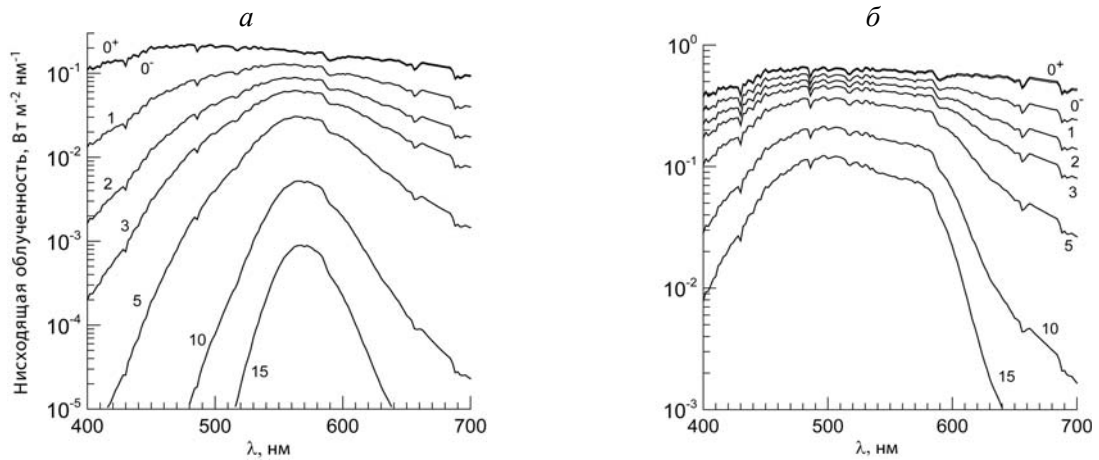


Рис.2. Спектральная облученность, создаваемая нисходящим потоком, на разных горизонтах, рассчитанная по результатам измерений в Белом (а, ст.4939) и Карском (б, ст.4956) морях.

Цифры у кривых – номера горизонтов.

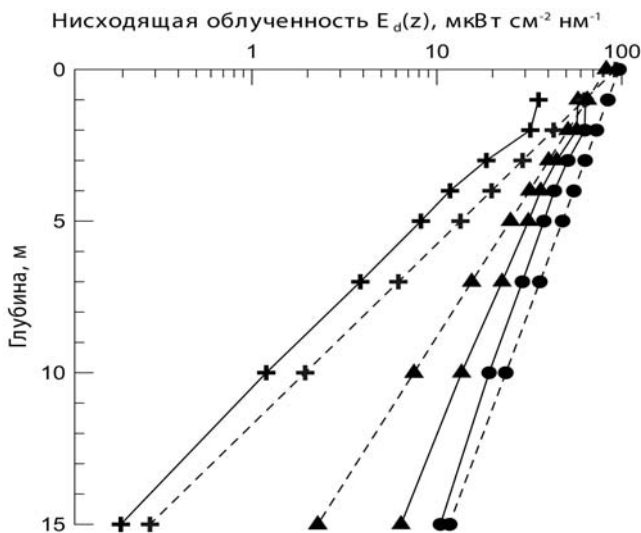


Рис.3. Спектральные величины облученности в Черном море (ст.2).

Сплошные линии – измеренные значения, штриховые – рассчитанные по спутниковым данным. Круги – 555, ромбики – 443, крестики – 625 нм.

В табл.4 представлены результаты расчетов дневных экспозиций составляющих баланса ФАР по спутниковым данным на различных станциях. Для сравнения даны среднемесячные значения в августе 2000 г. [3].

В табл.5 представлены величины суммарного альбедо и его составляющих, обусловленных отраженным от поверхности излучением (альбедо поверхности моря) и вышедшим из воды излучением (альбедо водной толщи) для разных морей. Анализируя представленные результаты, следует отметить очень низкие значения альбедо водной толщи в Белом море на ст.4939 – всего 0.12 %. Для сравнения – среднее значение этой составляющей альбедо в средней части Баренцевого моря равнялось 1.1 %, а в районах кокколитофоридного цветения превышало 4 % [3].

Другая интересная особенность – высокие значения альбедо поверхности моря Карского (более 11 %). Такие значения возникают из-за очень низкого солнца: высота солнца в Карском море не превышала 23.4° в течение всего дня, тогда как в Белом море максимальное значение высоты солнца было более 32°.

В табл.6 представлены суточные величины поглощенной ФАР в разных слоях для различных морей.

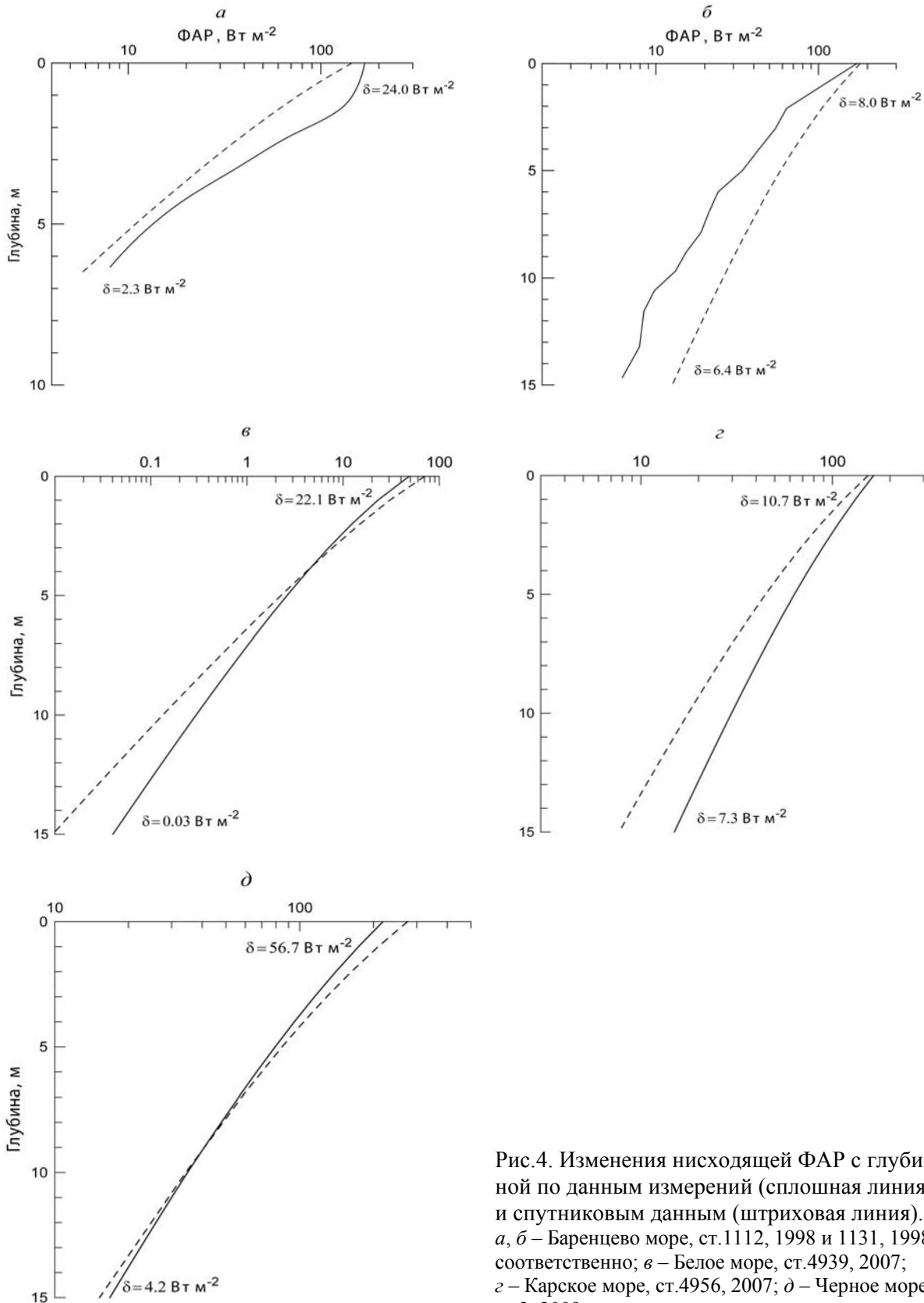


Рис.4. Изменения нисходящей ФАР с глубиной по данным измерений (сплошная линия) и спутниковым данным (штриховая линия). а, б – Баренцево море, ст.1112, 1998 и 1131, 1998 соответственно; в – Белое море, ст.4939, 2007; г – Карское море, ст.4956, 2007; д – Черное море, ст.2, 2009.

Как видно из таблицы, практически все солнечное излучение, вошедшее в воду Белого моря, поглощается уже в верхнем 10-метровом слое, что обусловлено сильным поглощением из-за высокой концентрации окрашенного органического вещества.

Таблица 4

**Величины дневных экспозиций составляющих баланса ФАР по спутниковым данным на различных станциях и среднемесячные значения в августе 2000 г. [3]**

Море	Дневные экспозиции, МДж м <sup>-2</sup> день <sup>-1</sup>				
	ФАР				
	верхняя граница атмосферы	падающая	отраженная	вышедшая	поглощенная
Белое (ст.4939)	12.15	7.23	0.61	0.009	6.61
Карское (ст.4956)	6.46	4.86	0.54	0.020	4.30
Черное (ст.2)	9.49	7.61	0.47	0.066	7.07
Баренцево (ср.ч.) [3]	10.47	4.98	0.28	0.054	4.60
Белое [3]	11.14	6.55	0.39	0.03	6.03

Таблица 5

**Величины суммарного альbedo и его составляющих (поверхность моря и водная толща) для разных морей**

Море	Альbedo, %		
	суммарное	поверхности моря	водной толщи
Белое (ст.4939)	8.5	8.4	0.12
Карское (ст.4956)	11.5	11.1	0.4
Черное (ст.2)	7.1	6.2	0.9
Баренцево (ср. ч.) [3]	6.7	5.6	1.1
Белое [3]	6.5	6.0	0.46

Таблица 6

**Суточные величины поглощенной ФАР (МДж м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>) в различных слоях для разных морей**

Море	Слой, м					
	0–1	1–2	2–3	3–5	5–10	10–15
Белое (ст.4939)	3.66	1.46	0.70	0.55	0.23	0.01
Карское (ст.4956)	1.11	0.75	0.53	0.68	0.75	0.28
Черное (ст.2)	1.74	1.21	0.87	1.13	1.27	0.47
Баренцево (ср. ч.) [3]	0.93	0.65	0.48	0.65	0.86	0.42
Белое [3]	2.31	1.19	0.72	0.79	0.68	0.20

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

### Литература

1. Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В. и др. Оценка баланса ФАР в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*. 2003. Т.43, № 6. С.834–845
2. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I. et al. Assessment of underwater irradiance and the absorption of solar radiation at the water column from satellite data // *Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters* / Eds: I.M.Levin, G.D.Gilbert, C.C.Trees. Proceeding of SPIE V.6615 (SPIE Bellingham, WA, 2007), 661507.
3. Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Набиуллина М.В. Оценка объемного поглощения солнечного излучения в водной толще по спутниковым данным // *Фунд. исслед. океанов и морей* / Под ред. Н.П.Лаверов. Кн.1. М.: Наука, 2006. С.109–126.
4. Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I. et al. New instrument for measuring surface and underwater irradiances // Proc. of IV Intern.Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2007)». N.Novgorod, 2007. P.271–275.
5. Morel A., Mueller J. Normalized Water-Leaving Radiance and Remote Sensing Reflectance: Bidirectional Reflectance and Other Factors // NASA, TM-2003-211621. Rev.4. V.III. 2003. P.32–59.
6. Burenkov V.I., Ershova S.V., Kopelevich O.V. et al. Semianalytic bio-optical algorithm for case 2 waters // Proc. of Intern. Conf. «Current Probl. in Optics of Nat. Waters». St.Petersburg, 2001. P.79–85.
7. Gordon H.R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // *Limnol. Oceanogr.* 1989. V.34, N 8. P.1389–1409.

Статья поступила в редакцию 02.04.2012 г.

