

Оценка поглощения солнечного излучения в Баренцевом море по спутниковым и судовым данным

Шеберстов С.В. (1), Вазюля С.В. (1), Глуховец Д.И. (1,2)

(1) Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

(2) Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

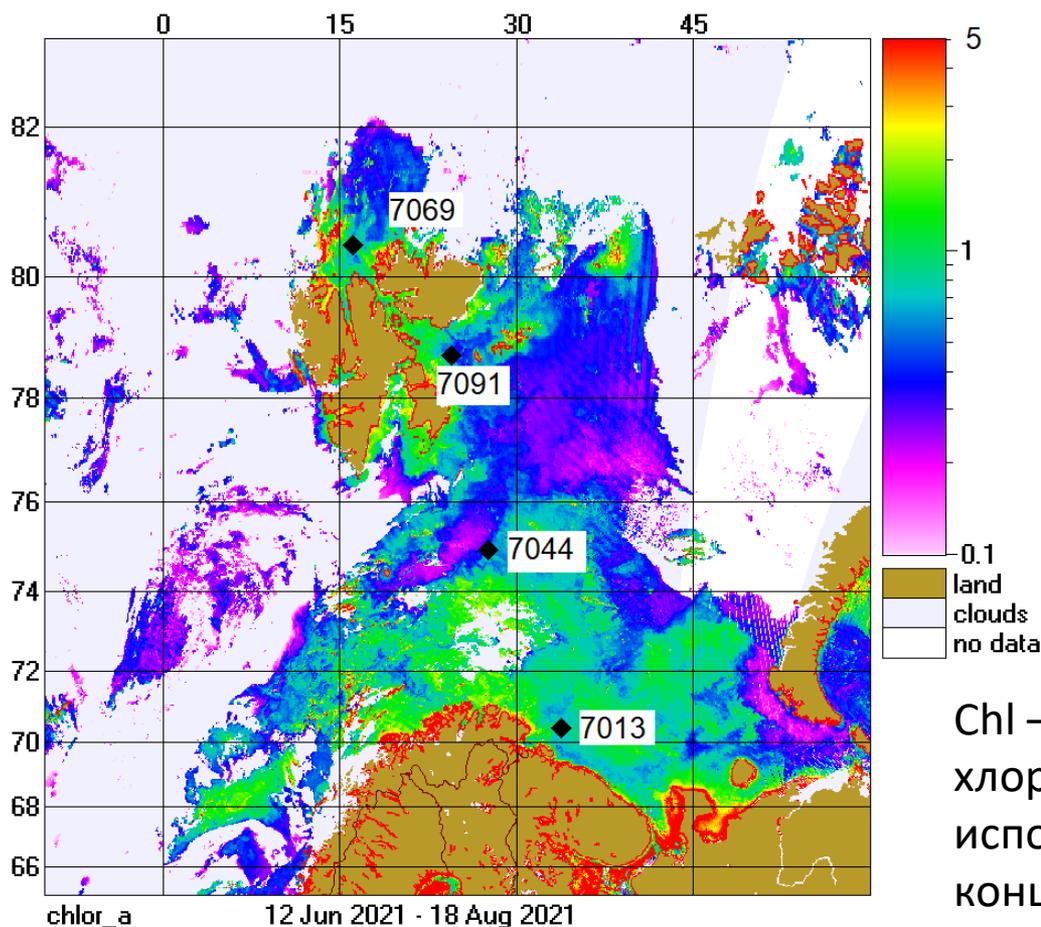
ВВЕДЕНИЕ

Для оценки поглощения солнечной энергии в толще морской воды по данным спутниковых сканеров цвета океана необходимо выбрать и настроить алгоритмы расчета спектров показателей поглощения и рассеяния света в морской воде, а также индикатрису рассеяния.

Восстановление полного набора оптических характеристик выполнено с помощью гидрооптических моделей Копелевича [1] и Мореля [2] по спутниковым данным сканеров цвета MODIS и OLCI. Кроме того, использовались судовые данные, полученные на четырех станциях в Баренцевом море в рейсах 83 и 84 НИС «Академик Мстислав Келдыш», выполненных в июне-августе 2021 г.

Полученный полный набор первичных оптических характеристик использован для оценки величины поглощения солнечной энергии в толще морской воды в диапазоне ФАР (400 – 700 нм).

Станции в Баренцевом море

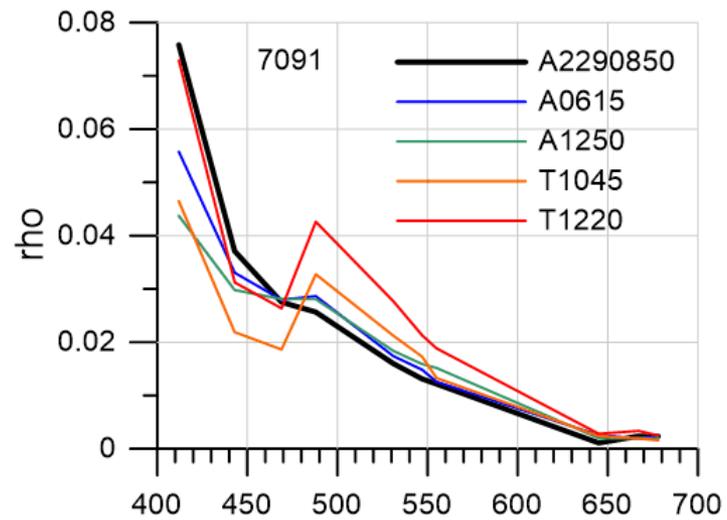
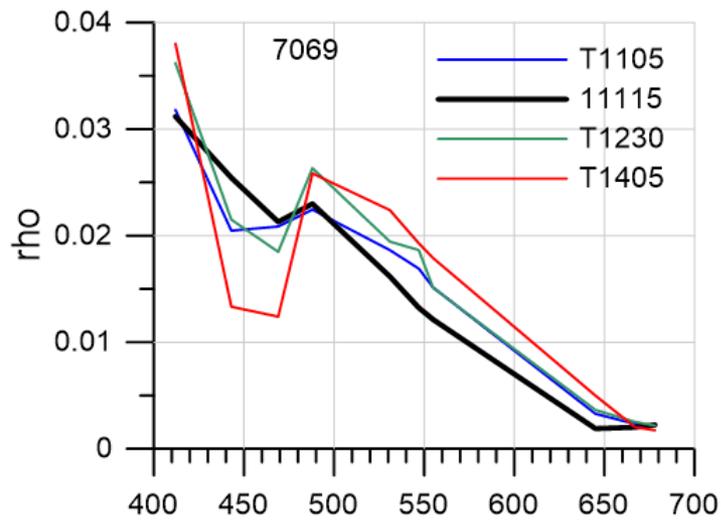
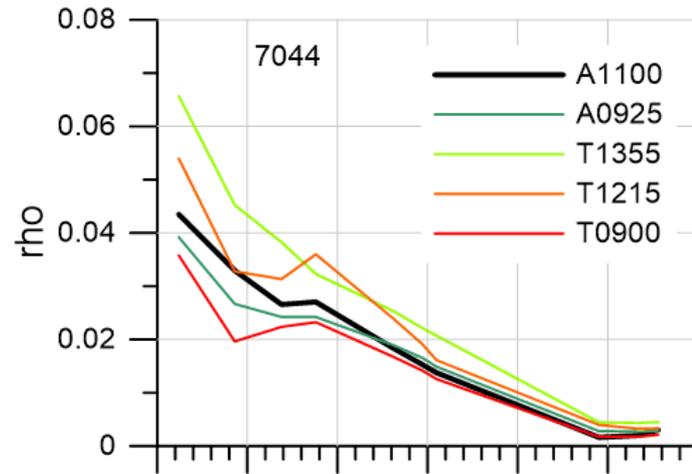
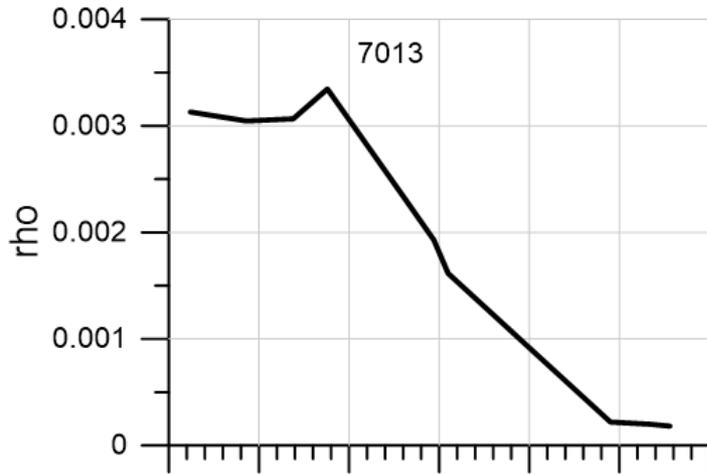


станция	7013	7044	7069	7091
широта	70.42	74.95	80.45	78.74
долгота	33.82	27.60	16.09	24.47
дата	14.06	28.07	09.08	17.08
$c(530,0)$	0.41	0/609	0.251	0.256
$a(530,0)$	0.093	0.114	0.086	0.073
Chl(0)	0.51	1.07	0.54	0.17
Chl*	1	0.25	1	1

Chl – измеренная концентрация хлорофилла, Chl* - величина, использованная для оценки влияния концентрации хлорофилла на поглощение солнечного излучения.

Судовые данные получены в рейсах 83 и 84 нис Академик Мстислав Келдыш в июне – августе 2021 с помощью приборов ПУМ ($c(z)$), ICAM ($a(\lambda)$), Ramses($E(\lambda)$)

Спутниковые данные



Модель Копелевича

Для численного моделирования распространения света под водой использовались методы дискретных ординат и Монте-Карло. Необходимый для выполнения расчетов полный набор первичных оптических характеристик включает спектральный показатель поглощения $a(\lambda)$ и дифференциальный показатель рассеяния $b(\theta, \lambda)$.

Для оценки индикатрисы рассеяния водных слоев использовалась двухпараметрическая модель светорассеивающих свойств морской воды [1], согласно которой показатель рассеяния может быть представлен как сумма вкладов от рассеяния чистой морской водой (индекс w), мелкой (индекс s) и крупной взвесью (индекс l):

$$b(\theta, \lambda) = b_w(\theta, \lambda) + v_s b_s(\theta, \lambda) + v_l b_l(\theta, \lambda), \quad (1)$$

где b_w , b_s и b_l - известные функции, а v_s и v_l - параметры модели. Можно показать, что для любой длины волны λ_0 существует взаимно-однозначное соответствие между парами (v_s, v_l) и $(b(\lambda_0), b_b(\lambda_0))$, где b - показатель рассеяния, а b_b - показатель рассеяния назад. Отсюда следует, что для определения всех рассеивающих свойств среды достаточно найти $b(\lambda_0)$ и $b_b(\lambda_0)$.

Алгоритм вычисления $b(\lambda_0)$ и $b_b(\lambda_0)$

В нашем случае с помощью прозрачномера ПУМ определяется показатель ослабления $c(530)$; с помощью прибора ICAM или алгоритмов GIOP (Werdell et al., 2013) – показатель поглощения $a(530)$, откуда $b(530)=c(530)-a(530)$.

Для вычисления $b_b(530)$ использовалась формула $\rho(u) = \pi (0.0949 + 0.0794 u)$ и [6] где $u = b_b/(a + b_b)$. Спектры $\rho(\lambda)$ рассчитывались из спектров коэффициентов яркости восходящего излучения моря $R_{rs}(\lambda)$ по формуле [7]

$$\rho(\lambda) = \pi \frac{R_{rs}(\lambda)}{0.52 + 1.7R_{rs}(\lambda)}$$

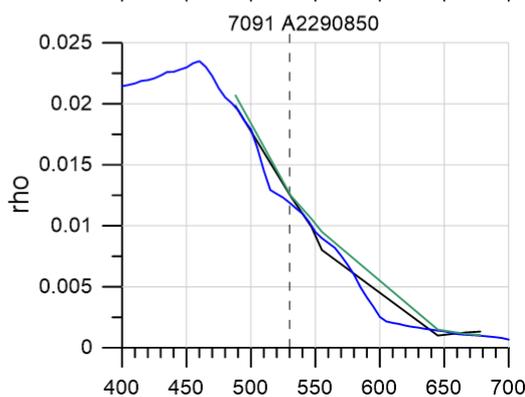
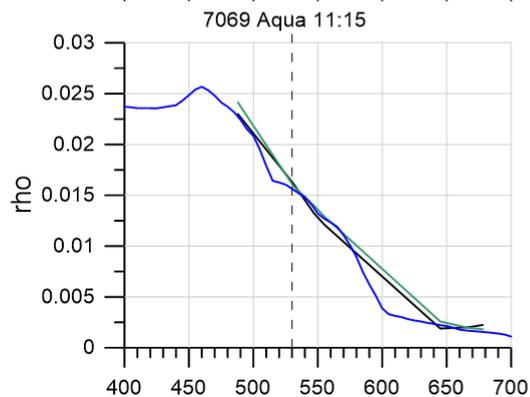
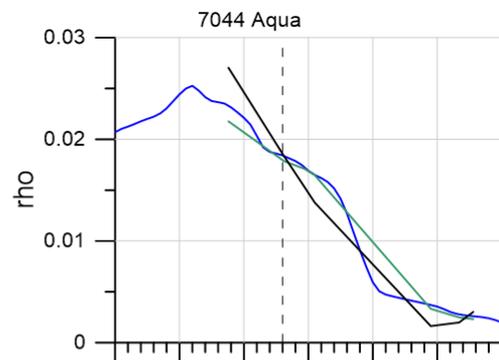
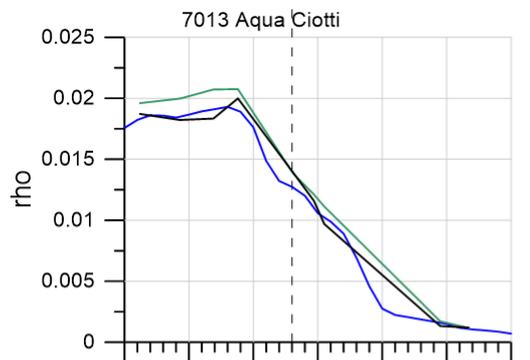
где $R_{rs}(\lambda)$ измерен спутниковым сканером цвета MODIS или OLCI/Sentinel-3A.

Для уточнения результатов вычисления параметров v_s и v_l с помощью численного алгоритма была выполнена минимизации квадратичной формы:

$$\sum_{i=1}^m (\rho(\lambda_i) - \hat{\rho}(\lambda_i, v_s, v_l))^2$$

где $\rho(\lambda_i)$ – измеренные значения коэффициента яркости, а $\hat{\rho}(\lambda_i, v_s, v_l)$ – значения той же величины, рассчитанные с помощью метода дискретных ординат. В качестве первого приближения можно использовать значения v_s и v_l , найденные по результатам прямых определений показателей ослабления и поглощения.

Коэффициент яркости водной толщи



На всех станциях, кроме 7013, не использовались $Rrs(\lambda)$ для $\lambda=412, 443$ и 469 .



MODIS

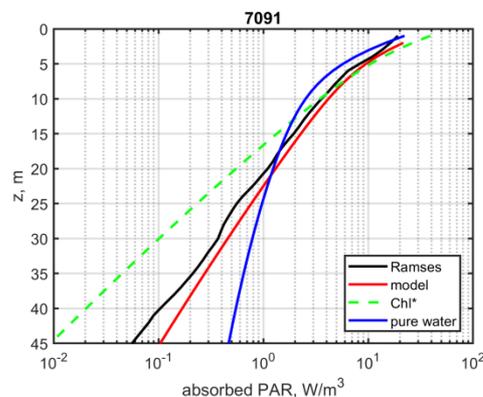
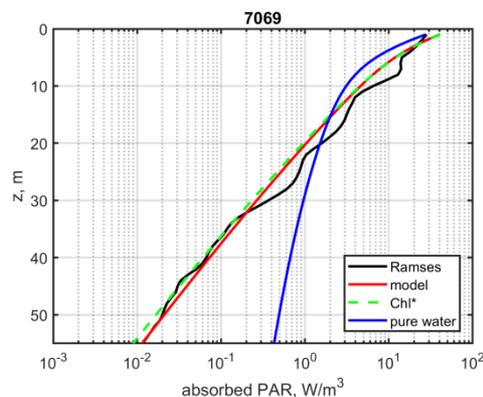
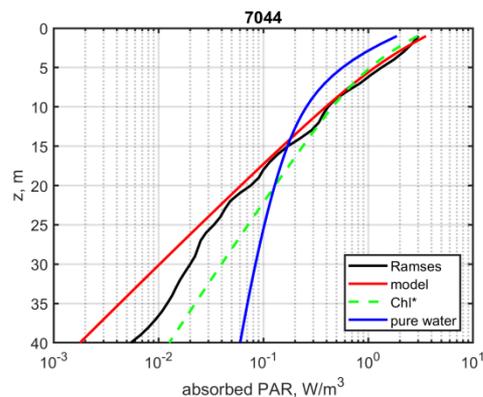
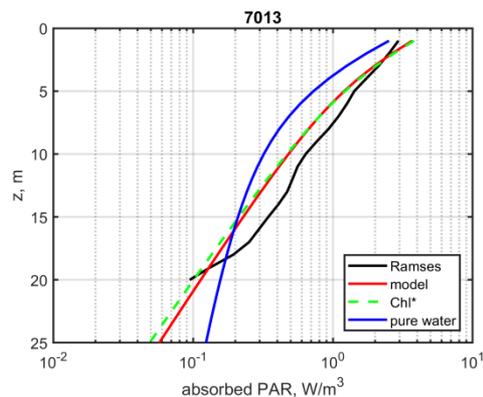


первое приближение



результат расчета

Профили поглощения



Результаты расчетов вертикальных профилей поглощаемой в единице объема мощности излучения сравнивались с данными прибора Ramses, результатами расчетов для гипотетического случая чистой воды и модельного Chl* для оценки влияния точности алгоритмов оценки концентрации хлорофилла [4].

Вертикальные профили поглощения солнечной энергии в диапазоне ФАР, полученные из прямых измерений (черные линии), моделирования на основе натуральных измерений (красные линии), выбранных значений Chl* (зеленые пунктирные линии) и гипотезы чистой воды (синие линии).

Модель Case I new (Morel et al.)

Удовлетворительное совпадение измеренных и рассчитанных профилей нисходящей освещенности $E_d(z)$ оказалось возможным в рамках более простой модели – «Case 1 new» [2, 5]. Согласно этой модели, все первичные оптические характеристики однозначно определяются через единственный параметр – концентрацию хлорофилла Chl. В частности, коэффициент поглощения моделируется как сумма трех составляющих:

$$a(z, \lambda) = a_w(\lambda) + a_p(z, \lambda) + a_g(z, \lambda),$$

где a_w — поглощение чистой водой, a_p – поглощение твердыми частицами, а a_g – поглощение желтым веществом. Для параметра a_p используется модель

$$a_p(\lambda, \text{Chl}(z)) = A(\lambda) [\text{Chl}(z)]^{E(\lambda)},$$

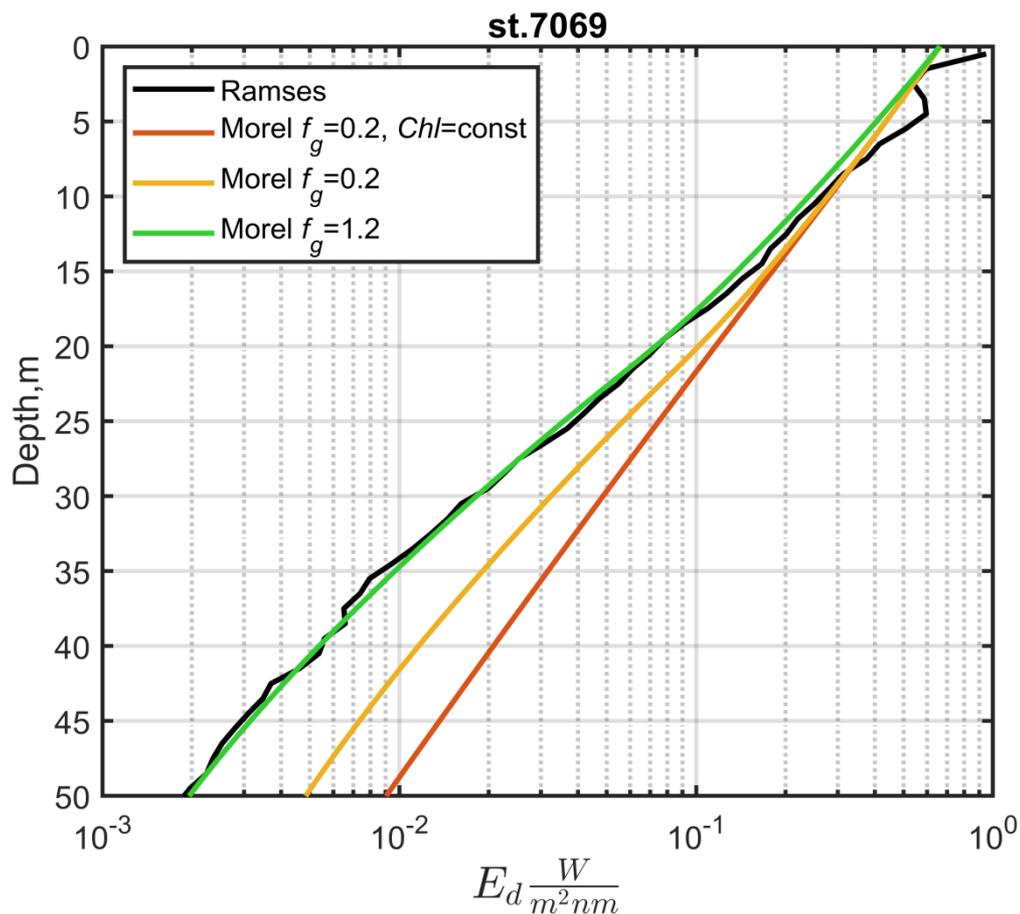
где $A(\lambda)$ и $E(\lambda)$ – известные функции (см. [5])

Для показателя поглощения желтого вещества использовалась формула [3]:

$$a_g(z, \lambda) = f_g a_p(z, \lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)],$$

где по умолчанию $f_g = 0.2$, $S = 0.014$, $\lambda_0 = 440$ нм.

Использование модели Morel Case I new



На рисунке представлены результаты расчетов удельной мощности поглощенной солнечной радиации в диапазоне ФАР в сравнении с результатом измерений прибором Ramses. Использовалась измеренная *in situ* зависимость концентрации хлорофилла от глубины. Как следует из результатов расчетов, для достижения оптимального согласия с результатами измерений необходимо изменить параметры модели, а именно, вместо принятого по умолчанию значения $f_g=0.2$ принять $f_g=1.2$

Выводы

1. В исследованном регионе суммарное поглощение света в толще воды слабо зависит от наличия и концентрации взвешенных частиц и растворённых веществ. Их наличие в морской воде приводит к перераспределению поглощаемой солнечной энергии по глубине, значительно увеличивая поглощаемую долю в верхних слоях водной толщи.
2. Относительные величины поглощения и отражения не существенно зависят от того, учитывается или не учитывается при расчете стратификация морской воды
3. Сравнение результатов модельных расчетов, выполненных с использованием гидрооптических моделей Копелевича и Мореля, и результатов спутниковых и подспутниковых измерений показало, что обе модели обеспечивают удовлетворительное согласие измеренных и рассчитанных значений коэффициента яркости моря. Для вертикальных профилей облученности наилучшее совпадение получено для модифицированной модели Case 1 Мореля.

Литература:

1. Копелевич О.В. Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды // Оптика океана. М.: Наука. 1983. Том 1. С. 208 – 234.
2. Morel A., Antoine D., and Gentili B., 2002. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // Applied Optics, 41(30), p. 6289-6406.
3. Werdell P.J., Franz B.A., Bailey S.W., et al. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. // Applied Optics. 2013. Vol. 52 (10). pp. 2019-2037.
4. Glukhovets D, Sheberstov S, Vazyulya S, Yushmanova A, Salyuk P, Sahling I, Aglova E. Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea. Remote Sensing. 2022; 14(19):4995. <https://doi.org/10.3390/rs14194995>
5. Hedley J.D., Mobley C.D. HYDROLIGHT 6.0 ECOLIGHT 6.0. Technical Documentation, Numerical Optics Ltd. Tiverton: UK, 2021; 131 p.
6. Mobley C.D., Gentili B., Gordon H.R.; Jin Z., Kattawar G.W., Morel A., Reinersman P.; Stamnes K., Stavn, R.H., Comparison of numerical models for computing underwater light fields, Appl. Opt. 1993, Vol. 32, pp. 7484–7504
7. Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S., Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model , Appl. Opt., 1998, Vol. 37, pp. 6329–6338.

Гидрооптические исследования выполнены в рамках государственного задания по теме № FMWE-2021-0001. Моделирование поглощения солнечной энергии в толще морской воды выполнено в рамках гранта МНПМУ 075-15-2021-934 «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»»

Авторы выражают благодарность В.А. Артемьеву и А.В. Юшмановой за предоставленные результаты измерений приборами ПУМ и ICAM.