



Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого

М. И. Горбов^{@1}, П. А. Салюк¹, А. Н. Павлов², Г. П. Гаревских¹

^{@E-mail:} maxgorbov@mail.ru

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия

Резюме. Работа посвящена решению проблеме определения региональных связей между характеристиками подводного светового поля и биооптическими характеристиками водной толщи. Цель исследования – определить влияние концентраций хлорофилла-а (хл-а) (C) и окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) (D) на изменчивость подводной фотосинтетической активной радиации (ФАР) для отдельных районов заливов Петра Великого Японского моря (заливы Амурский, Уссурийский, Посытка). Для этого проанализирована зависимость показателя ослабления ($KPAR$) подводной ФАР от каждой из указанных биооптических характеристик в данных районах. Экспериментальные данные получены с помощью измерений концентраций хл-а и ОРОВ мультипараметрическим зондом SeaBird SBE 19-plus со сферическим датчиком ФАР Licor Li-193 и калиброванными флуоресцентными датчиками WETStar. В работе использовалось три вида моделей: $KPAR$ рассчитывается только через C (mC), только через D (mD) и одновременно через C и D (mCD). Получено, что в Амурском и Уссурийском заливах изменчивость $KPAR$ в первую очередь определяется вариацией содержания ОРОВ, а в заливе Посытка – вариацией концентрации хл-а. Одновременный учет концентраций хл-а и ОРОВ (модель mCD) во всех проанализированных случаях позволяет увеличить точность оценки $KPAR$ из измерений содержания оптически активных компонентов на 30–40 %, а для общей модели в ~2 раза по сравнению с учетом только концентрации хл-а. При использовании общей модели mCD для разных районов заливов Петра Великого показатель $KPAR$ определен со следующими относительными среднеквадратичными ошибками: $RMSE \%_{\text{Amur}}^{\text{mCD}} = 23.6$, $RMSE \%_{\text{Ussur}}^{\text{mCD}} = 19.3$, $RMSE \%_{\text{Posyet}}^{\text{mCD}} = 15.5$. Целесообразно использовать общую модель вида mCD, поскольку она демонстрирует более высокую адаптивность к региональным условиям заливов Петра Великого.

Ключевые слова: подводная фотосинтетически активная радиация, окрашенные растворенные органические вещества, хлорофилл-а, биооптические характеристики, оптически активные компоненты, Японское море

Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay

Maxim I. Gorbov^{@1}, Pavel A. Salyuk¹, Andrey N. Pavlov², Georgiy P. Garevskikh¹

^{@E-mail:} maxgorbov@mail.ru

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok, Russia

Abstract. The study is devoted to solving the problem of determining regional relationships between the characteristics of the underwater light field and the bio-optical characteristics of the seawater column. The aim of the study is to determine the influence of chlorophyll-a (Chl-a) (C) and colored dissolved organic matter (CDOM) (D) concentrations on the variability of underwater photosynthetically active radiation (PAR) for certain areas of Peter the Great Bay in the Sea of Japan (Amur Bay, Ussuri Bay, and Posyet Bay). To this end, the dependence of the diffuse attenuation coefficient ($KPAR$) of the underwater PAR on each of the specified bio-optical characteristics in these areas was analyzed. The experimental data were obtained by measuring chlorophyll-a and CDOM concentrations using the SeaBird SBE 19-plus multiparameter probe with the Licor Li-193 spherical PAR sensor and calibrated WETStar fluorescent sensors. Three types of models were used in the study: $KPAR$ was calculated only through C (mC), only through D (mD), and simultaneously through C and D (mCD). It was found that in Amur Bay and Ussuri Bay, $KPAR$ variability is primarily influenced by variations in CDOM content, while in Posyet Bay, it is determined by variations in Chl-a concentration. Incorporating both Chl-a concentration and CDOM concentration (mCD model) in all analyzed cases increases the accuracy of $KPAR$ estimation from measurements of optically active components by 30–40 %. For the general model, this approach improves accuracy by approximately twofold compared to using Chl-a concentration alone. The application of the general mCD model for different areas of Peter the Great Bay yielded $KPAR$ estimates with the following relative root mean square errors: $RMSE \%_{\text{Amur}}^{\text{mCD}} = 23.6$, $RMSE \%_{\text{Ussur}}^{\text{mCD}} = 19.3$, $RMSE \%_{\text{Posyet}}^{\text{mCD}} = 15.5$. It is advisable to use the general mCD model, as it demonstrates greater adaptability to regional conditions in Peter the Great Bay.

Keywords: underwater photosynthetically active radiation, colored dissolved organic matter, chlorophyll-a, bio-optical characteristics, optically active constituents, the Sea of Japan

Для цитирования: Горбов М.И., Салюк П.А., Павлов А.Н., Гаревских Г.П. Анализ зависимости показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации от концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ в отдельных районах залива Петра Великого. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 4, с. 361–369. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.361-369>; <https://www.elibrary.ru/yeqta>

For citation: Gorbov M.I., Salyuk P.A., Pavlov A.N., Dependence of the diffuse attenuation coefficient for underwater photosynthetically active radiation on chlorophyll-a and colored dissolved organic matter in Peter the Great Bay. *Geosistemy perehodnykh zon* = *Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 4, pp. 361–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.4.361-369>; <https://www.elibrary.ru/yeqta>

Финансирование

Работы выполнены в рамках государственных заданий ТОИ ДВО РАН № 124022100080-0 (анализ результатов) и № 124042300003-5 (методика расчета), а также при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-00004) (анализ данных подводной фотосинтетически активной радиации).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the POI FEB RAS: No. 124022100080-0 (results analysis) and No. 124042300003-5 (methods of calculations). The work was carried with financial support of Russian Science Foundation (project No. 23-77-00004) (determine of the underwater photosynthetically available radiation).

Введение

Подводная фотосинтетически активная радиация (ФАР) является важной характеристикой светового поля, которая определяет количество света, доступного для фотосинтеза фитопланктона [1, 2], и является одним из основных параметров биооптических моделей по расчету первичной продукции [3]. ФАР может быть использована также для оценки подводной освещенности [4] и для оценки поглощения тепла в морской толще в видимом спектральном диапазоне [5, 6]. Актуальной является разработка моделей по оценке под-

водной ФАР из прямых измерений биооптических характеристик [7]. Это позволяет упростить как используемые приборные океанографические комплексы, за счет уменьшения количества датчиков, так и модели по оценке первичной продукции, уменьшая количество неизвестных параметров. Кроме того, возможна оценка ФАР для архивов океанографических данных, где такие измерения не проводились.

Общепризнанным методом оперативной оценки подводной ФАР является использование измерений концентрации хлорофилла-а (хл-а) (C) [8, 9] или показателя ослабления

света [10] контактными или дистанционными способами. При этом важно понимать, что концентрация хл-а не единственная характеристика морской воды, определяющая изменчивость подводной освещенности [11, 16]. Не менее важны концентрация окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) (D) [12] и показатель рассеяния света назад взвешенными частицами (как органическими, так и неорганическими) [13]. Поэтому при использовании в качестве входных данных содержания оптически активных компонентов необходимо проанализировать влияние концентрации не только хл-а, но и ОРОВ, а также, по возможности, концентрации минеральной взвеси. А при использовании измерений показателя ослабления света на конкретной длине волны важно оценить, существенно ли влияние ОРОВ на используемой длине волны.

Цель данной работы – определить влияние концентраций хлорофилла-а и окрашенных органических растворенных веществ на изменчивость подводной фотосинтетически активной радиации для отдельных районов зал. Петра Великого Японского моря (заливы Амурский, Уссурийский, Посытая).

Материалы и методы

Анализировались данные 2664 станций, из которых 390 относится к Амурскому заливу, 1611 к Уссурийскому и 663 – к зал. Посытая. Для исследований использованы архивные экспедиционные данные ТОИ ДВО РАН, полученные в зал. Петра Великого с июля по сентябрь 2008 г. с помощью мультипараметрического зонда SeaBird SBE 19-plus (частота измерений 4 Гц, равномерное профилирование от поверхности до дна со скоростью около 0.5 м/с). Значения температуры (T) и солености (S) морской воды получены с помощью процедур обработки SBE

DataProcessing. Значения концентраций хл-а C и окрашенных растворенных органических веществ D (в мг/м³ хинина-сульфата) получены из калиброванных измерений флуоресцентными датчиками WETStar, установленными на зонде SBE 19-plus. Для дальнейшего анализа все полученные значения приведены к равномерным вертикальным профилям с шагом 1 м, путем усреднения в интервалах ± 0.5 м от целых значений глубины.

Для определения показателя ослабления подводной ФАР $KPAR$ использовались подводные измерения профилей суммарной ФАР (восходящей и нисходящей) с помощью сферического датчика Licor Li-193. Значение $KPAR(z)$ на глубине z определялось как модуль наклона полинома первой степени (рис. 1 а), построенного в диапазоне глубин от $z-dz/2$ до $z+dz/2$ по значениям $\ln(PAR(z))$ методом наименьших квадратов. Оптимальным значением dz было выбрано 5 м. Дополнительно отбраковывались отрицательные значения $KPAR(z)$, которые связаны с влиянием тени от судна, когда значение ФАР росло при увеличении глубины. Каждому корректно посчитанному значению $KPAR(z)$ сопоставлялось значение $C(z)$ и $D(z)$, а также

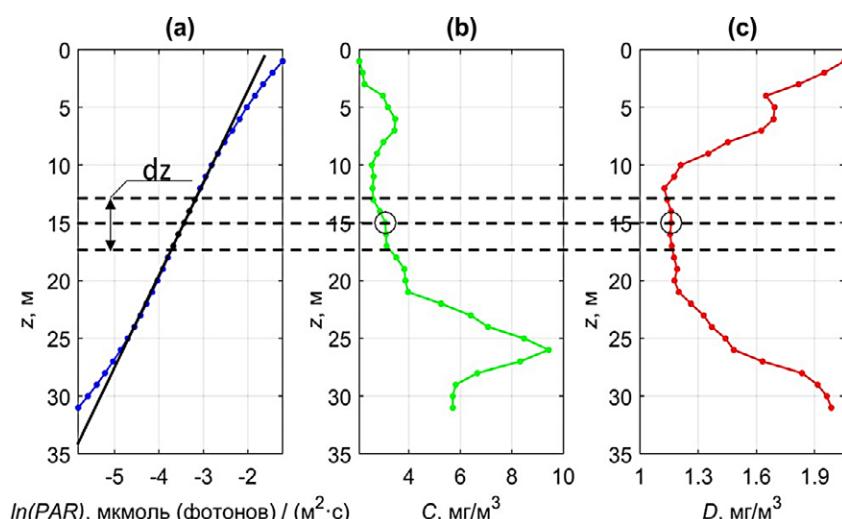


Рис. 1. Пример расчета значения $KPAR$ в каждой точке на интервале dz ; вертикальное распределение натурального логарифма PAR по z (а), C по z (б), D по z (в). Черной линией на рисунке (а) обозначен полином первой степени, построенный по точкам в интервале dz , кружками на рисунках (б) и (в) обозначены значения C и D для рассчитанного значения $KPAR$ в центре указанного интервала.

Fig. 1. Example of calculating the $KPAR$ value at each point in the interval dz ; vertical distribution of the natural logarithm of PAR by z (a), C by z (b), and D by z (c). The black line on diagram (a) represents a first-degree polynomial constructed from points in the interval dz , while circles on diagrams (b) and (c) represent the values of C and D for the calculated $KPAR$ value in the center of specified interval.

значения гидрологических характеристик $T(z)$ и $S(z)$ (значения из центра диапазона от $z-dz/2$ до $z+dz/2$ без дополнительного усреднения).

Для анализа качества линейной аппроксимации зависимости $KPAR(z)$ от $C(z)$ и $D(z)$ использовались коэффициент детерминации R^2 , среднеквадратичное отклонение ($RMSE$), $RMSE$ относительно среднего значения $KPAR$ в % ($RMSE\%$), смещение ($Bias$) и $Bias$ относительно среднего значения $KPAR$ в % ($Bias\%$).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}, \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (2)$$

$$RMSE \% = RMSE / \bar{y} * 100 \%, \quad (3)$$

$$Bias = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i), \quad (4)$$

$$Bias \% = Bias / \bar{y} * 100 \%, \quad (5)$$

где y_i — наблюдаемые (реальные) значения, \hat{y}_i — предсказанные моделью значения, \bar{y}_i — среднее наблюдаемых значений, n — количество наблюдений.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны координаты измерений (рис. 2 а) используемого массива данных и диаграмма «температура (T) – соленость (S)» морских вод (рис. 2 б) для точек, в которых есть одновременное определение $KPAR(z)$, $C(z)$, $D(z)$, $T(z)$ и $S(z)$. На рис. 2 б можно отметить значимое влияние приповерхностного распреснения при значениях солености менее 33 епс, которое выражается в резком изменении наклона между T и S , что характерно при наличии речного стока.

На рис. 3 приведены диаграммы рассеяния $D - C$ (рис. 3 а), $KPAR - C$ (рис. 3 б) и $KPAR - D$ (рис. 3 с). На рис. 3 а видно, что в используемом массиве данных присутствуют воды с различными соотношениями концентраций хл-а и ОРОВ, что говорит как о разных источниках происхождения ОРОВ, так и о разных стадиях развития фитопланктонных сообществ в районах исследований [14]. На рис. 3 б, с можно выделить линейные зависимости между $KPAR$ и концентрациями хл-а и ОРОВ. Эта линейная связь теоретически обоснована, поскольку чем больше содержание поглощающих свет

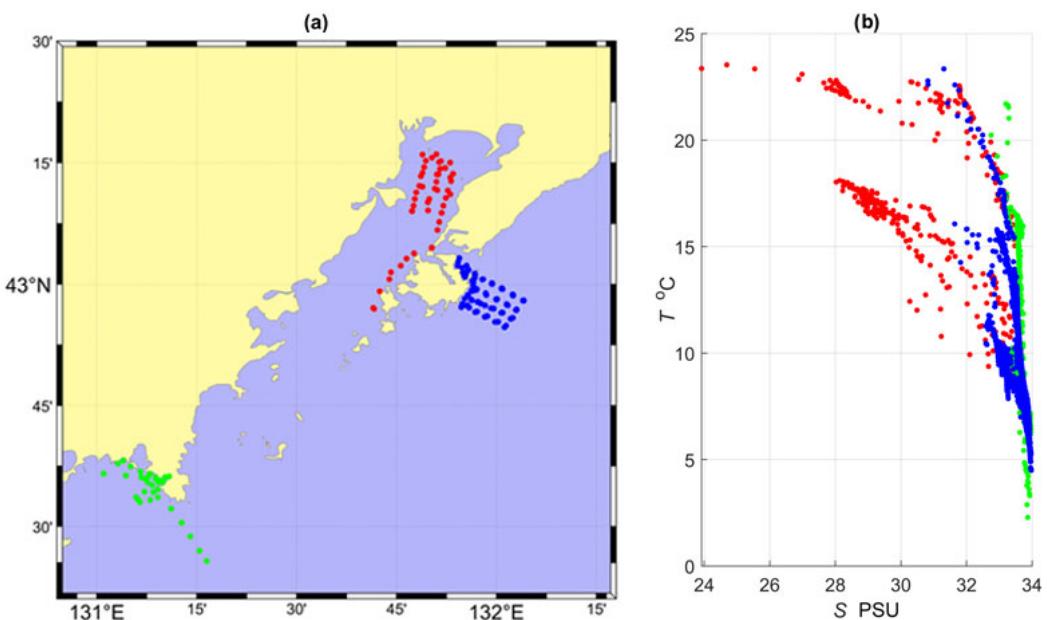


Рис. 2. Координаты станций в зал. Петра Великого (а); диаграмма «температура (T) – соленость (S)» морских вод (б). Красными точками обозначены станции в Амурском заливе, синими – в Уссурийском, зелеными – в зал. Посыета.

Fig. 2. Coordinates of stations in Peter the Great Bay (a); “temperature (T) – salinity (S)” diagram of the seawater (b). Red dots indicate stations of Amur Bay; blue, of Ussuri Bay; green, of Posyet Bay.

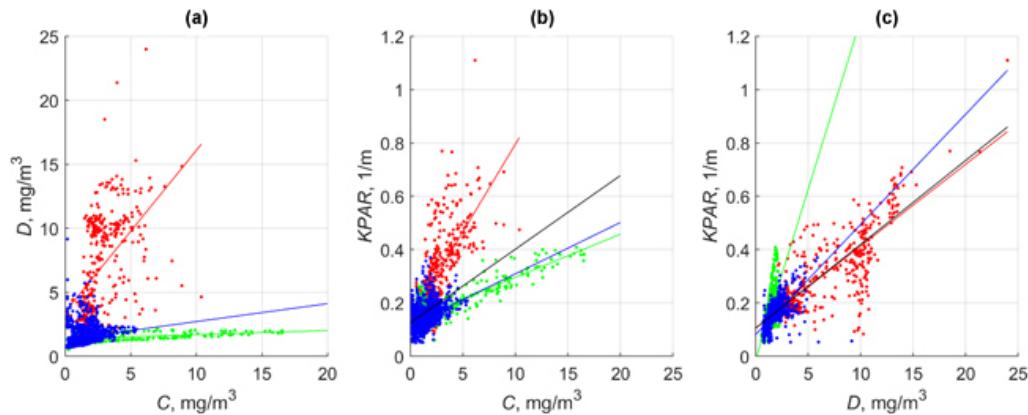


Рис. 3. Диаграммы рассеяния $D - C$ (а), $KPAR - C$ (б) и $KPAR - D$ (с). Точки и линейные регрессии, построенные для отдельных районов, обозначены красным (Амурский залив), синим (Уссурийский залив) и зеленым (зал. Посытка). Черной линией на рис. 3 б, с показана линейная регрессия, построенная по всем точкам.

Fig. 3. The scatter plots of $D - C$ (a), $KPAR - C$ (b), and $KPAR - D$ (c). Dots and linear regressions are denoted in red (Amur Bay), blue (Ussuri Bay), and green (Posyet Bay). Black lines in (b) and (c) indicate linear regression plotted across all points.

веществ, тем больше должен быть показатель ослабления света. В случае зависимости от концентрации хл-а, которая является оценкой содержания фитопланктона в морской воде, ослабление ФАР дополнительно связано с рассеянием света клетками фитопланктона [8].

Анализ данных позволяет ввести следующие виды эмпирических линейных моделей:

Таблица. Значения коэффициентов и статистические метрики качества линейных аппроксимаций (6) – (8)
Table. Coefficient values and statistical quality metrics of linear approximations (6) – (8)

Модель расчета	Эмпирические коэффициенты			Применение локальной модели		Применение общей модели		
	γ_{region}	ψ_{region}	δ_{region}	$R^2_{region}^{model}$	$RMSE\%_{region}^{model}$	$R^2_{region}^{model}$	$RMSE\%_{region}^{model}$	$bias\%_{region}^{model}$
$KPAR_{Total}^{mC}$	0.028	0	0.126	0.31	44.1	0.31	44.1	0.00
$KPAR_{Total}^{mD}$	0	0.031	0.105	0.69	29.1	0.69	29.1	0.00
$KPAR_{Total}^{mCD}$	0.018	0.028	0.081	0.81	23.3	0.81	23.3	0.00
$KPAR_{Amur}^{mC}$	0.066	0	0.138	0.47	33.4	-0.34	53.0	36.9
$KPAR_{Amur}^{mD}$	0	0.031	0.107	0.63	27.9	0.63	27.9	-1.18
$KPAR_{Amur}^{mCD}$	0.036	0.023	0.058	0.74	23.6	0.71	24.8	-0.82
$KPAR_{Posyet}^{mC}$	0.016	0	0.134	0.66	20.5	0.22	30.9	-11.5
$KPAR_{Posyet}^{mD}$	0	0.127	-0.011	0.39	27.9	0.02	34.9	13.6
$KPAR_{Posyet}^{mCD}$	0.136	0.082	0.021	0.81	15.5	0.71	19.0	5.43
$KPAR_{Ussur}^{mC}$	0.019	0	0.117	0.16	26.7	-0.10	30.6	-14.1
$KPAR_{Ussur}^{mD}$	0	0.041	0.082	0.48	21.0	0.41	22.3	-6.04
$KPAR_{Ussur}^{mCD}$	0.014	0.038	0.067	0.56	19.3	0.52	20.1	-2.19

Примечание. Отрицательные значения R^2 свидетельствуют о нецелесообразном использовании модели в данном случае, поскольку она показывает результаты хуже, чем использование среднего.

Note. Negative R^2 values suggest that using the model is not appropriate in this case, as it produces worse results than the average.

В таблице приведены значения коэффициентов γ_{region} , ψ_{region} , δ_{region} представленных видов эмпирических моделей для трех рассматриваемых районов отдельно (локальные модели, $region = \{Amur, Ussur, Posyet\}$) и общая модель для каждого района ($region = \{Total\}$). Общая модель представляет собой расчет для зал. Петра Великого по каждому виду модели. Также приведены статистические метрики для оценки качества линейной аппроксимации: R^2 , $RMSE\%$ и $bias\%$ между измеренными и рассчитанными по моделям значениями $KPAR$.

Из таблицы видно, что в Амурском и Уссурийском заливах $KPAR$ сильнее коррелирует с D ($R^2_{Amur}^{mD} = 0.63$, $RMSE\%_{Amur}^{mD} = 27.9\%$, $R^2_{Ussur}^{mD} = 0.48$, $RMSE\%_{Ussur}^{mD} = 21\%$), чем с C ($R^2_{Amur}^{mC} = 0.47$, $RMSE\%_{Amur}^{mC} = 33.4\%$ и $R^2_{Ussur}^{mC} = 0.16$, $RMSE\%_{Ussur}^{mC} = 26.7\%$). А в зал. Посьета наоборот ($R^2_{Posyet}^{mD} = 0.39$, $RMSE\%_{Posyet}^{mD} = 27.9\%$ и $R^2_{Posyet}^{mC} = 0.66$, $RMSE\%_{Posyet}^{mC} = 20.5\%$). При этом одновременный учет концентраций хл-а и ОРОВ во всех случаях улучшает результаты работы эмпирической линейной модели вида mCD ($R^2_{Amur}^{mCD} = 0.74$, $RMSE\%_{Amur}^{mCD} = 26.6\%$; $R^2_{Ussur}^{mCD} = 0.56$, $RMSE\%_{Ussur}^{mCD} = 19.3\%$;

$R^2_{Posyet}^{mCD} = 0.81$, $RMSE\%_{Posyet}^{mCD} = 15.5\%$).

Большая зависимость от ОРОВ, чем от хл-а, наблюдается и в других районах Мирового океана, например в отдельных районах Черного [15] и Средиземного [12] морей.

На рис. 4 представлены результаты работы рассматриваемых вариантов общей модели по сравнению измеренных и рассчитанных значений $KPAR$. Применение общей модели типа mCD позволяет получить оценки $KPAR$ в отдельных районах без существенного ухудшения качества аппроксимации ($Rsquare_{Amur}^{mCD} = 0.71$, $RMSE\%_{Amur}^{mCD} = 24.8\%$; $Rsquare_{Ussur}^{mCD} = 0.52$, $RMSE\%_{Ussur}^{mCD} = 20.1\%$; $Rsquare_{Posyet}^{mCD} = 0.71$, $RMSE\%_{Posyet}^{mCD} = 19\%$), в отличие от локальных моделей вида mCD. Таким образом, для дальнейшего анализа целесообразно использовать общую модель вида mCD, поскольку она демонстрирует более высокую адаптивность к региональным условиям зал. Петра Великого.

В статье отдельно не рассмотрено влияние взвешенных веществ на оценку $KPAR$, однако косвенно это влияние отражено в параметре C , который оценивает концентрацию хл-а (основного пигмента клеток фитопланктона), а также в параметре D , оценивающем концентрацию ОРОВ. Последняя в свою очередь может быть связана с концентрацией минеральной взвеси

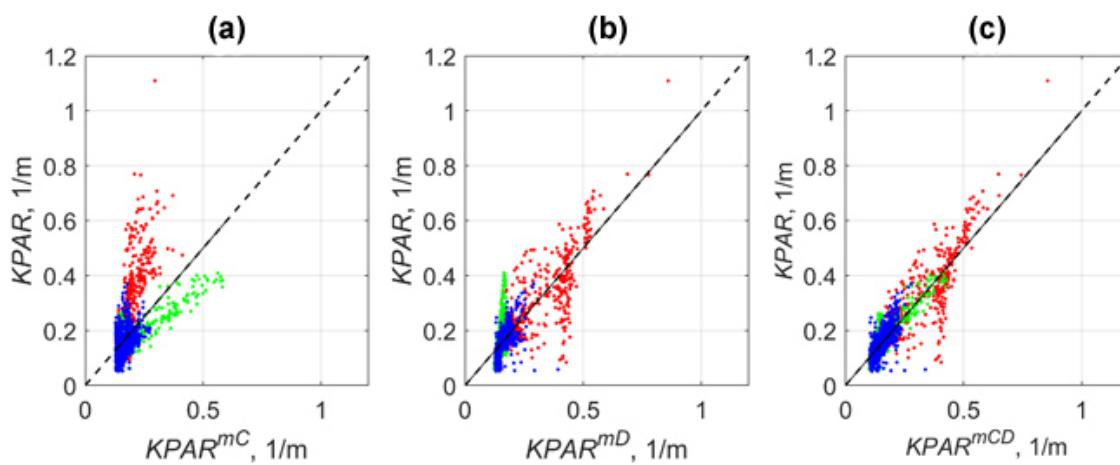


Рис. 4. Результаты работы рассматриваемых вариантов общих моделей (4)–(6) по сравнению измеренных (ось y) и рассчитанных (ось x) значений $KPAR$: модели вида mC (а), mD (б), mCD (с). Красными точками обозначен Амурский залив, синими – Уссурийский, зелеными – зал. Посьета. Штриховая линия – линия 1:1 ($y = x$).

Fig. 4. Results of the considered variants of general models (4)–(6) in terms of comparison measured (y-axis) and calculated (x-axis) $KPAR$ values: model mC (a), model mD (b), and model mCD (c). Red dots indicate Amur Bay, blue dots indicate Ussuri Bay, and green dots indicate Posyet Bay. The dotted line represents the 1:1 line ($y = x$).

в области стока р. Раздольная в Амурском заливе. Даже несмотря на отсутствие прямого учета взвешенных частиц, оценка KPAR выполняется с приемлемым уровнем точности как локальными моделями, так и общей моделью.

Заключение

В работе проанализирована зависимость показателя ослабления подводной фотосинтетически активной радиации (*KPAR*) от концентрации хл-а (*C*) и ОРОВ (*D*) в отдельных районах зал. Петра Великого (заливы Амурский, Уссурийский, Посытая) на основе экспериментальных *in situ* данных, полученных с июля по сентябрь 2008 г. По результатам исследований предложено 3 модели для восстановления значений *KPAR* из содержания оптически активных компонентов (*C, D*): модель mC – расчет только через *C*; модель mD – только через *D*; модель mCD – одновременно через *C* и *D*. Анализ статистических метрик использования представленных моделей в разных районах зал. Петра Великого позволил сделать следующие выводы.

Показатель ослабления ФАР в Амурском и Уссурийском заливах в первую очередь определялся содержанием ОРОВ в морской воде, а в зал. Посытая – концентрацией хл-а.

Одновременный учет концентрации хл-а и концентрации ОРОВ значительно увеличивает точность оценки *KPAR* из измерений содержания данных оптически активных компонентов во всех рассмотренных случаях.

При использовании общей модели вида mCD *KPAR* оценен с относительным RMSE ~20–25 % в пределах зал. Петра Великого.

Полученные результаты позволяют повысить точность определения показателя диффузного ослабления ФАР в зал. Петра Великого из биооптических характеристик водной толщи, а также определить вклад таких оптически активных компонентов водной толщи, как фитопланктон и ОРОВ, в формирование значений подводной ФАР в отдельных районах залива. В дальнейшем полученные коэффициенты будут валидированы на данных других экспедиций и лягут в основу создания универсальной модели по оценке подводной ФАР в зал. Петра Великого.

Список литературы

- Churilova T., Suslin V., Moiseeva N., Efimova T. **2020.** Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. *Journal of Applied Spectroscopy*, 86: 1084–1091. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00944-0>
- Ryther J. **1956.** Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnology and Oceanography*, 1(1): 61–70. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.1.00061>
- Westberry T.K., Silsbe G.M., Behrenfeld M.J. **2023.** Gross and net primary production in the Global Ocean: An ocean color remote sensing perspective. *Earth-Science Reviews*, 237: 104322. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104322>
- Nechad B., Ruddick K. **2010.** A model of diffuse attenuation of the downwelling irradiance for ecosystem models. *Remote Sensing of the Coastal Ocean, Land, and Atmosphere Environment*, 7858. <https://doi.org/10.1111/12.872979>
- Mobley C.D., Chai F., Xiu P., Sundman L.K. **2015.** Impact of improved light calculations on predicted phytoplankton growth and heating in an idealized upwelling-downwelling channel geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2): 875–892. <https://doi.org/10.1002/2014JC010588>
- Глуховец Д.И., Салюк П.А., Шеберстов С.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Степочкин И.Е. **2021.** Восстановление полного комплекса оптических характеристик для оценки теплосодержания в южной части Баренцева моря в июне 2021 г. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 18(5): 214–225. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-214-225>
- Xing X., Lee Z., Xiu P., Chen S., Chai F. **2022.** A dual-band model for the vertical distribution of photosynthetically available radiation (PAR) in stratified waters. *Frontiers in Marine Science*, 9: 928807. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.928807>.
- Xing X., Boss E. **2021.** Chlorophyll-based model to estimate underwater photosynthetically available radiation for modeling, in-situ, and remote-sensing applications. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092189>
- Renosh P.R. et al. **2023.** Vertically resolved Global Ocean light models using machine learning. *Remote Sensing*, 15(24): 5663. <https://doi.org/10.3390/rs15245663>
- Латушкин А.А., Салюк П.А., Суслин В.В., Мартынов О.В. **2023.** Региональный алгоритм расчета толщины фотического слоя из вертикального профиля показателя ослабления направленного света на примере северо-западной части моря Уэдделла. *Океанология*, 63(4): 628–633. <https://doi.org/10.31857/S0030157423040081>

11. IOCCG. **2000**. *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters* (Ed. S. Sathyendranath). Dartmouth, Canada: IOCCG. (Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group; no. 3).
12. Sempéré R., Para J., Tedetti M., Charrière B., Mallet M. **2015**. Variability of solar radiation and CDOM in surface coastal waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 91(4): 851–861. <https://doi.org/10.1111/php.12434>
13. Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Herblan A. **2005**. Satellite-derived parameters for biological modeling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
14. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. **2005**. Исследование процессов воспроизведения органического вещества клетками фитопланктона методом лазерной индуцированной флуоресценции. *Оптика атмосферы и океана*, 18(11): 976–983. EDN: HRPKFZ
15. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М. **2009**. Спектральная модель подводной облученности в Черном море. *Морской гидрофизический журнал*, 6: 33–46. EDN: VKGALV
16. Kirk J. **2010**. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3rd ed. UK: Cambridge University Press, 662 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139168212>
6. Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Saling I.V., Stepotchkin I.E. **2001**. [Retrieval of the full complex of optical characteristics for heat content assessing in the southern part of the Barents Sea in June 2021]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 18(5): 214–225. (In Russ.).
7. Xing X., Lee Z., Xiu P., Chen S., Chai F. **2022**. A dual-band model for the vertical distribution of photosynthetically available radiation (PAR) in stratified waters. *Frontiers in Marine Science*, 9: 928807. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.928807>.
8. Xing X., Boss E. **2021**. Chlorophyll-based model to estimate underwater photosynthetically available radiation for modeling, in-situ, and remote-sensing applications. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092189>
9. Renosh P.R. et al. **2023**. Vertically resolved Global Ocean light models using machine learning. *Remote Sensing*, 15(24): 5663. <https://doi.org/10.3390/rs15245663>
10. Latushkin A.A., Salyuk P.A., Suslin V.V., Martynov O.V. **2023**. A regional algorithm for calculating the photic zone thickness from the vertical profile of the beam attenuation coefficient on the example of the northwestern part of the Weddell Sea. *Oceanology*, 63(4): 545–549. <https://doi.org/10.31857/s0030157423040081>
11. IOCCG. **2000**. *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters* (Ed. S. Sathyendranath). Dartmouth, Canada: IOCCG. (Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group; no. 3).
12. Sempéré R., Para J., Tedetti M., Charrière B., Mallet M. **2015**. Variability of solar radiation and CDOM in surface coastal waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 91(4): 851–861. <https://doi.org/10.1111/php.12434>
13. Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Herblan A. **2005**. Satellite-derived parameters for biological modeling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
14. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. **2005**. Studies of organic matter reproduction in phytoplankton cells by laser-induced fluorescence method. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 18(11): 879–885.
15. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М. **2010**. Spectral model of underwater irradiance in the Black Sea. *Physical Oceanography* (2009), 19: 366–378. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9060-8>
16. Kirk J. **2010**. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3rd ed. UK: Cambridge University Press, 662 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139168212>

References

1. Churilova T., Suslin V., Moiseeva N., Efimova T. **2020**. Phytoplankton bloom and photosynthetically active radiation in coastal waters. *Journal of Applied Spectroscopy*, 86: 1084–1091. <https://doi.org/10.1007/s10812-020-00944-0>
2. Ryther J. **1956**. Photosynthesis in the ocean as a function of light intensity. *Limnology and Oceanography*, 1(1): 61–70. <https://doi.org/10.4319/lo.1956.1.1.00061>
3. Westberry T.K., Silsbe G.M., Behrenfeld M.J. **2023**. Gross and net primary production in the Global Ocean: An ocean color remote sensing perspective. *Earth-Science Reviews*, 237: 104322. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104322>
4. Nechad B., Ruddick K. **2010**. A model of diffuse attenuation of the downwelling irradiance for ecosystem models. *Remote Sensing of the Coastal Ocean, Land, and Atmosphere Environment*, 7858. <https://doi.org/10.1117/12.872979>
5. Mobley C.D., Chai F., Xiu P., Sundman L.K. **2015**. Impact of improved light calculations on predicted phytoplankton growth and heating in an idealized upwelling-downwelling channel geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120(2): 875–892. <https://doi.org/10.1002/2014JC010588>
6. Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V., Saling I.V., Stepotchkin I.E. **2001**. [Retrieval of the full complex of optical characteristics for heat content assessing in the southern part of the Barents Sea in June 2021]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 18(5): 214–225. (In Russ.).
7. Xing X., Lee Z., Xiu P., Chen S., Chai F. **2022**. A dual-band model for the vertical distribution of photosynthetically available radiation (PAR) in stratified waters. *Frontiers in Marine Science*, 9: 928807. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.928807>.
8. Xing X., Boss E. **2021**. Chlorophyll-based model to estimate underwater photosynthetically available radiation for modeling, in-situ, and remote-sensing applications. *Geophysical Research Letters*, 48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092189>
9. Renosh P.R. et al. **2023**. Vertically resolved Global Ocean light models using machine learning. *Remote Sensing*, 15(24): 5663. <https://doi.org/10.3390/rs15245663>
10. Latushkin A.A., Salyuk P.A., Suslin V.V., Martynov O.V. **2023**. A regional algorithm for calculating the photic zone thickness from the vertical profile of the beam attenuation coefficient on the example of the northwestern part of the Weddell Sea. *Oceanology*, 63(4): 545–549. <https://doi.org/10.31857/s0030157423040081>
11. IOCCG. **2000**. *Remote sensing of ocean color in coastal, and other optically complex waters* (Ed. S. Sathyendranath). Dartmouth, Canada: IOCCG. (Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group; no. 3).
12. Sempéré R., Para J., Tedetti M., Charrière B., Mallet M. **2015**. Variability of solar radiation and CDOM in surface coastal waters of the northwestern Mediterranean Sea. *Photochemistry and Photobiology*, 91(4): 851–861. <https://doi.org/10.1111/php.12434>
13. Gohin F., Loyer S., Lunven M., Labry C., Froidefond J.-M., Delmas D., Herblan A. **2005**. Satellite-derived parameters for biological modeling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 29–46. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
14. Букин О.А., Салюк П.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н. **2005**. Studies of organic matter reproduction in phytoplankton cells by laser-induced fluorescence method. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 18(11): 879–885.
15. Чурилова Т.Я., Суслин В.В., Сосик Х.М. **2010**. Spectral model of underwater irradiance in the Black Sea. *Physical Oceanography* (2009), 19: 366–378. <https://doi.org/10.1007/s11110-010-9060-8>
16. Kirk J. **2010**. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. 3rd ed. UK: Cambridge University Press, 662 p. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139168212>

Об авторах

Горбов Максим Иванович (<https://orcid.org/0009-0001-0057-0869>), инженер лаборатории физических методов исследования океана, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, maxgorbov@mail.ru

Салиук Павел Анатольевич (<https://orcid.org/0000-0002-3224-710X>), кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории спутниковой океанологии и лазерного зондирования, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, psalyuk@poi.dvo.ru

Павлов Андрей Николаевич (<https://orcid.org/0000-0001-6099-1174>), доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории лазерных методов исследования вещества, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, anpavlov@iacp.dvo.ru

Гаревских Георгий Павлович (<https://orcid.org/0009-0002-8528-6062>), старший инженер лаборатории физических методов исследования океана, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия, garevskih(gp@poi.dvo.ru)

About the Authors

Gorbov, Maxim I. (<https://orcid.org/0009-0001-0057-0869>), Engineer of the Laboratory of physical methods of ocean research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, gorbov.mi@poi.dvo.ru

Salyuk, Pavel A. (<https://orcid.org/0000-0002-3224-710X>), Cand. Sci (Phys. And Math.), Associate Professor, Leading Researcher, Leader of the Laboratory for satellite oceanography and laser sensing, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, psalyuk@poi.dvo.ru

Pavlov, Andrey N. (<https://orcid.org/0000-0001-6099-1174>), Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Laboratory of laser methods for studying matter, Institute of Automation and Control Processes of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, anpavlov@iacp.dvo.ru

Garevskikh, Georgiy P. (<https://orcid.org/0009-0002-8528-6062>), Senior Engineer of the Laboratory of physical methods of ocean research, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia, garevskih(gp@poi.dvo.ru)

Поступила 09.07.2025

Принята к публикации 15.10.2025

Received 9 July 2025

Accepted 15 October 2025