

**Поглощение света
основными оптически активными компонентами
шельфовых вод Камчатского полуострова
(август – сентябрь 2023 года). Часть I. Фитопланктон**

**Т. Я. Чурилова^{1, 2, ✉}, Е. Ю. Скороход^{1, 2}, Н. А. Моисеева¹,
А. С. Бучельников^{1, 3}, Т. В. Ефимова^{1, 2}, П. А. Салюк⁴, А. В. Яцук⁵**

¹ ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН,
Севастополь, Россия

² Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

³ Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

⁴ Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичёва ДВО РАН,
Владивосток, Россия

⁵ Научно-технологический университет «Сириус», Сириус, Россия

✉ tanya.churilova@gmail.com

Поступила в редакцию 27.03.2026; одобрена после рецензирования 21.04.2026;
принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Цель работы – анализ пространственной изменчивости концентрации хлорофилла *a* (*TChl-a*) и спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$), определение зависимости $a_{ph}(\lambda)$ от *TChl-a* в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм с шагом 2 нм для разных слоев зоны фотосинтеза.

Методы и результаты. Исследования выполнены в августе – сентябре 2023 г. на 79 станциях. Пробы воды отбирали батометрами, концентрацию хлорофилла *a* определяли спектрофотометрически, спектральные показатели поглощения – на увлажненных стекловолоконных фильтрах с использованием интегрирующей сферы. Вертикальную структуру анализировали по данным *CTD*, флуоресценции хлорофилла *a* и фотосинтетически активной радиации (*PAR*). Выделены верхний квазиоднородный слой (*UML*) и нижележащие слои до глубин с 1 и 0,1 % *PAR*. Параметризация выполнена степенной функцией $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ для двух слоев зоны фотосинтеза и нижележащего слоя. *TChl-a* в поверхностном слое варьировала от 0,7 до 14 мг·м⁻³ в Тихом океане и от 0,87 до 8,9 мг·м⁻³ в Охотском море. Выявлено четыре типа вертикального профиля *TChl-a*, обусловленных стратификацией вод и поступлением биогенных элементов. Коэффициенты $A(438)$ и $A(675)$ для *UML* составили 0,058 и 0,023 м²·мг⁻¹; для слоя между *UML* и границей зоны фотосинтеза – 0,043 и 0,020 м²·мг⁻¹. Показано, что удельное поглощение $a_{ph}^*(\lambda)$ при одинаковой освещенности снижается с ростом *TChl-a*, что связано с увеличением степени упаковки пигментов с ростом доли крупноклеточных видов в фитопланктоне.

Выводы. Впервые для исследуемой акватории выполнена параметризация поглощения света пигментами фитопланктона в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм (с разрешением в 2 нм) для двух слоев в зоне фотосинтеза и нижележащего слоя. Выявлены статистически значимые различия коэффициентов параметризации между слоями. Полученные зависимости могут быть использованы для восстановления спектров $a_{ph}(\lambda)$ по *TChl-a*, что необходимо для оценки фото-

синтетических характеристик фитопланктона и расчета первичной продукции спектральным методом, а также для разработки региональных спутниковых алгоритмов и организации оперативного мониторинга продуктивности вод вблизи полуострова Камчатка.

Ключевые слова: хлорофилл, спектральный показатель поглощения света, фитопланктон, шельфовые воды, Камчатка

Благодарности: отбор проб во время научного рейса проводился в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06), обработка данных, первичный анализ влияния факторов среды на концентрацию хлорофилла *a* проводились в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ № 124030100106-2, вертикальные профили флуоресценции хлорофилла *a* измерялись в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН № 124022100080-0, исследование изменчивости биооптических свойств финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2024-0037.

Для цитирования: Поглощение света основными оптически активными компонентами шельфовых вод Камчатского полуострова (август – сентябрь 2023 года). Часть I. Фитопланктон / Т. Я. Чурилова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 628–653. EDN VEHZOQ.

Original article

Light Absorption by Main Optically Active Components in Shelf Waters of the Kamchatka Peninsula

(August – September, 2023). Part 1. Phytoplankton

T. Ya. Churilova^{1, 2, ✉}, E. Yu. Skorokhod^{1, 2}, N. A. Moiseeva¹,
A. S. Buchelnikov^{1, 3}, T. V. Efimova^{1, 2}, P. A. Salyuk⁴, A. V. Yatsuk⁵

¹ A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of Russian Academy of Sciences,
Sevastopol, Russia

² Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

³ Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

⁴ V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
Vladivostok, Russia

⁵ Sirius University of Science and Technology, Sirius, Russia

✉ tanya.churilova@gmail.com

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to analyse the spatial variability of chlorophyll *a* concentration (*TChl-a*) and spectral coefficients of light absorption by phytoplankton ($a_{ph}(\lambda)$), as well as to determine the relationship between $a_{ph}(\lambda)$ and *TChl-a* in the wavelength range from 400 to 700 nm with the 2 nm step for different layers of the euphotic zone.

Methods and Results. The research was carried out at 79 stations in August – September, 2023. Water samples were collected using the Niskin bottles, chlorophyll *a* concentration was determined spectrophotometrically, and spectral absorption coefficients were measured on the moistened glass fiber filters using an integrating sphere. The vertical structure was analysed based on the CTD data, chlorophyll *a* fluorescence, and photosynthetically available radiation (*PAR*). The upper mixed layer (*UML*) and the underlying layers down to the depths with 1 and 0.1 % of *PAR* have been identified. The parameterization was done using a power function $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ for two layers of the euphotic zone and the underlying layer. *TChl-a* in the surface layer varied within 0.7–14 mg·m⁻³ in the Pacific Ocean and within 0.87–8.9 mg·m⁻³ in the Sea of Okhotsk. Four types have been identified. Their formation is a result of water stratification, its location within euphotic zone and nutrient supply. The coefficients *A*(438) and *A*(675) were 0.058 and 0.023 m²·mg⁻¹ for *UML*, and 0.043 and 0.020 m²·mg⁻¹ for the layer between *UML* and the bottom of the euphotic zone. It was shown that at the same light intensity, the

chlorophyll *a* specific absorption coefficient $a_{ph}^*(\lambda)$ decreased with increasing *TChl-a*, which was related to the stronger pigment package effect as the proportion of large-celled species in phytoplankton increased.

Conclusions. For the first time, parameterization of light absorption by phytoplankton for the study area is done within the 400–700 nm range (with the 2 nm step) for two layers in the euphotic zone and for the underlying one. Statistically significant differences between the parameterization coefficients of these layers are revealed. The obtained relationships can be used to retrieve the $a_{ph}(\lambda)$ spectra from *TChl-a*, that is necessary for assessing the photosynthetic characteristics of phytoplankton and determining primary production using the spectral method, as well as for developing the regional satellite algorithms and operational monitoring of water productivity off the Kamchatka Peninsula.

Keywords: chlorophyll, spectral light absorption coefficient, phytoplankton, shelf waters, Kamchatka

Acknowledgments: During the scientific cruise, water samples were taken within the framework of scientific and educational program “Floating University” (agreement No. 075-01593-23-06); data processing and primary analysis of the impact of environmental factors upon the chlorophyll *a* concentration were done within the framework of state assignment of FRC IBSS No. 124030100106-2; vertical profiles of chlorophyll *a* fluorescence were measured within the framework of state assignment of POI FEB of RAS No. 124022100080-0; and the study of variability of bio-optical properties was funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation, project No. FZNS-2024-0037.

For citation: Churilova, T.Ya., Skorokhod, E.Yu., Moiseeva, N.A., Buchelnikov, A.S., Efimova, T.V., Salyuk, P.A. and Yatsuk, A.V., 2026. Light Absorption by Main Optically Active Components in Shelf Waters of the Kamchatka Peninsula (August – September, 2023). Part 1. Phytoplankton. *Physical Oceanography*, 33(4), pp. 650-674.

Введение

Охотское море (ОМ) и северо-западная часть Тихого океана (ТО) относятся к числу наиболее биологически продуктивных регионов Мирового океана¹ [1–4]. В южной части ОМ весеннее «цветение» фитопланктона и высокий уровень продуктивности вод [5–9] обусловлены обеспеченностью биогенными элементами [6]. В северо-западной части ТО, у юго-восточного побережья Камчатского п-ова [4, 10], анализ спутниковых данных за 2002–2020 гг. [11] показал регулярное увеличение концентрации хлорофилла *a* («цветение» фитопланктона) в конце сентября – начале октября. В годы интенсивного «цветения» высокие концентрации хлорофилла *a* отмечались не только в прибрежных водах с интенсивным речным стоком, но и в шельфовой зоне, а также в районе континентального склона, что было связано с аномальным повышением температуры и подъемом более глубоких слоев моря вследствие перемешивания, вызванного прохождением циклона над этой территорией [11]. Максимальные концентрации хлорофилла *a* наблюдались в прибрежных водах Авачинской бухты [11], что обусловлено поступлением биогенных элементов преимущественно вулканического происхождения с береговым и речным стоком [12, 13] и влиянием биогеохимических и гидрологических факторов в период максимального потепления воды [14].

Интенсивное «цветение» потенциально токсичных водорослей может представлять опасность для экосистемы. Вредоносные «цветения» водорослей (ВЦВ) наблюдались в прибрежных водах ОМ и ТО вблизи Камчатского п-ова [15–17]. Так, осенью 2020 г. интенсивное ВЦВ у берегов Камчатского п-ова

¹ North Pacific Marine Science Organization (PICES) : Eighteenth Meeting : Annual Report. Eighteenth Meeting Jeju: North Pacific Marine Science Organization (PICES). Sidney, Canada : PICES, 2009. 273 p.

нанесло катастрофический ущерб морской биоте и привело к серьезным проблемам со здоровьем у людей [17]. В связи с этим особенно актуальна организация системы оперативного мониторинга с использованием дистанционного зондирования Земли из космоса. Уникальные возможности спутниковой океанографии [18] позволяют отслеживать аномалии в режиме реального времени. Однако концентрации хлорофилла a в ОМ летом 2006 г., полученные с использованием алгоритмов *OC4v6 (SeaWiFS)* и *OC3M (MODIS)*, были значительно (в 2,6 и 3,6 раза) завышены [19]. В прибрежных водах ТО (Авачинская бухта) летом 2017 г. также установлена неточность спутниковых данных [20].

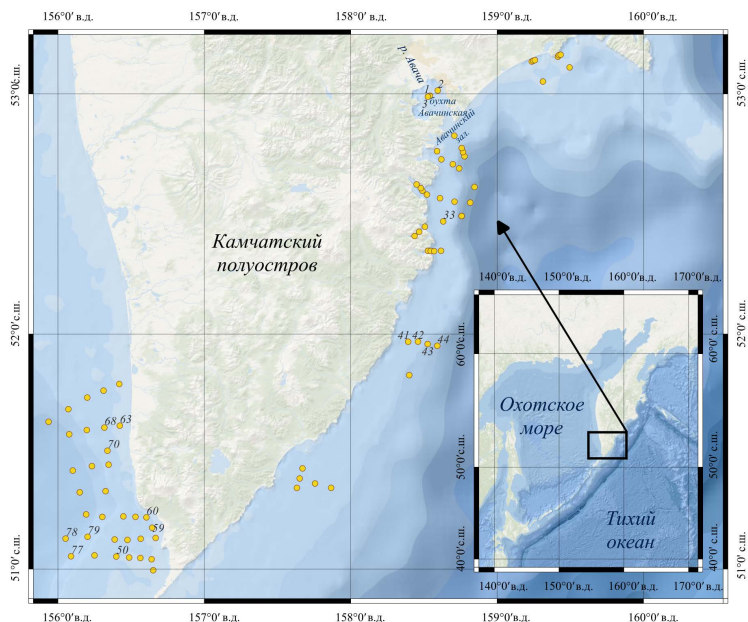
Проблема точности спутниковых оценок в оптически неоднородных водах [21–23], к которым относятся почти все прибрежные воды, может быть решена путем разработки региональных алгоритмов, учитывающих биооптические свойства этого региона. Известно исследование вариабельности показателей поглощения света пигментами фитопланктона в юго-западной части ОМ летом 2006 г. [19]. Однако связь между показателем поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) и концентрацией хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$) не была установлена, что необходимо для корректной оценки $TChl-a$ на основе значения $a_{ph}(\lambda)$, восстановленного с помощью биооптического спутникового алгоритма, в частности трехканального алгоритма [24].

В связи с этим цель настоящей работы – анализ пространственной изменчивости $TChl-a$ и показателя $a_{ph}(\lambda)$ в зависимости от условий среды, определение зависимости $a_{ph}(\lambda)$ от $TChl-a$ в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм с высоким спектральным разрешением для разных слоев зоны фотосинтеза.

Методы и материалы

Исследования проводили в шельфовых водах ТО и ОМ вблизи южной части Камчатского п-ова в ходе экспедиции на НИС «Профессор Мультановский» с 15 августа по 20 сентября 2023 г. (рис. 1). Пробы воды отбирали с помощью 10-литровых батометров в комплексе с системой *CTD (Sea-Bird)*, измеряющей гидрофизические параметры (температура, соленость, плотность воды). Глубины для отбора проб определяли на основе вертикального распределения гидрофизических параметров и флуоресценции хлорофилла a , измеренной погружным флуориметром (*WETStar W535-1246*).

Пробы воды (1–2 л) для определения концентрации хлорофилла a и феопигментов фильтровали через стекловолокнистые фильтры *GF/F* диаметром 25 мм (*Whatman*) при низком вакууме (менее 0,2 атм). До анализа фильтры хранили в сосуде Дьюара с жидким азотом. Для экстракции пигментов применяли двухступенчатый метод: пигменты экстрагировали 90%-ным уксусом (5 мл) с помощью виброгомогенизатора, затем экстракты осветляли центрифугированием. Процедуру повторяли: сливали экстракт и к осадку добавляли еще 5 мл 90%-ного уксуса. Концентрацию хлорофилла a и феопигментов в экстрактах определяли спектрофотометрическим методом [25, 26].



Р и с. 1. Южная часть Камчатского п-ова со схемой расположения станций в августе – сентябре 2023. На врезке – регион Охотского моря и северо-западной части Тихого океана, прямоугольным контуром выделен район исследования

F i g. 1. Southern part of the Kamchatka Peninsula with a scheme of station locations in August – September 2023. The inset shows the region of the Sea of Okhotsk and the northwestern Pacific Ocean, with the study area outlined by a rectangular contour

Поглощение света пигментами фитопланктона определяли по методике [27, 28] в соответствии с протоколом ². Фильтровали при слабом вакууме (менее 0,2 атм) с использованием стекловолокнистых фильтров (*Whatman*). Пробы до измерения хранили в сосуде Дьюара с жидким азотом. Оптическую плотность (*optical density*, *OD*) измеряли в диапазоне от 350 до 750 нм с разрешением 1 нм с помощью двухлучевых спектрофотометров *Perkin Elmer Lambda 35* (пробы воды из ТО) и *Shimadzu UV-2600* (пробы из ОМ), которые оснащены интегрирующей сферой. Измерения проводили в сравнении с чистым фильтром, увлажненным ультрафильтратом морской воды. С целью разделения поглощения света всем взвешенным веществом ($a_p(\lambda)$) на поглощение пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) и неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) пигменты экстрагировали горячим метанолом [29] и горячей дистиллированной водой [30]. Затем измеряли *OD* обесцвеченной взвеси на фильтре (*non-algal particles*, *NAP*). Спектры *OD* корректировали, чтобы среднее значение *OD* в диапазоне длин волн 715–750 нм равнялось нулю, и проводили коррекцию на изменение длины оптического пути (β -коррекцию) в соответствии с [31]. Показатели поглощения $a_p(\lambda)$, m^{-1} , и $a_{NAP}(\lambda)$, m^{-1} , рассчитывали по формуле

² Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation. Vol. 1 : Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient (vl.O) (v. 1. 0) / E. Boss [et al.] ; eds. A. R. Neeley, A. Mannino. Dartmouth, NS, Canada : IOCCG, 2018. 78 p. <https://doi.org/10.25607/OBP-119>

$$a_i(\lambda) = 2,303 \cdot \frac{OD_i(\lambda)}{(V/S)},$$

где i соответствует p или NAP ; $2,303 = \ln 10$; V – объем пробы воды, m^3 ; S – рабочая площадь фильтра, m^2 .

Показатель $a_{ph}(\lambda)$, m^{-1} , рассчитывали по формуле

$$a_{ph}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_{NAP}(\lambda).$$

Удельный показатель $a_{ph}^*(\lambda)$, $m^2 \cdot mg^{-1}$, получали делением $a_{ph}(\lambda)$ на $TChl-a$, $mg \cdot m^{-3}$.

Зависимость между $a_{ph}(\lambda)$ и $TChl-a$ описывали степенной функцией [32]

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)},$$

где $A(\lambda)$ – спектральный коэффициент, $m^2 \cdot mg^{-1}$; $B(\lambda)$ – безразмерный спектральный степенной коэффициент.

Прозрачность вод оценивали по глубине видимости диска Секки (Z_s , м). Суточную величину фотосинтетически активной радиации (*Photosynthetically Available Radiation*, PAR), падающей на поверхность моря ($PAR(0)$, $\text{Э} \cdot m^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$), измеряли с помощью датчика *LI-COR*, закрепленного на пеленгаторной палубе, который работал в течение всей экспедиции. Спектральную облученность в море $E_d(\lambda)$, $\text{Э} \cdot m^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, измеряли на каждой станции в пределах зоны фотосинтеза с шагом в 1 м с помощью погружного спектрорадиометра *RAMSES (TriOS Mess- und Datentechnik GmbH, Германия)*. Значение PAR ($\text{Э} \cdot m^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) на глубине z в момент зондирования на станции рассчитывали интегрированием $E_d(\lambda)$ в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм:

$$PAR(z) = \int_{400}^{700} E_d(z, \lambda) d\lambda.$$

По этим данным оценивали глубину зоны фотосинтеза (Z_{eu}) как горизонт с 1 % PAR относительно значения PAR под поверхностью моря ($PAR(0^-)$) [33], а также первую оптическую глубину для PAR (Z_{1opt}) как глубину с 37 % $PAR(0^-)$ [34], что допустимо для относительно однородных слоев, например верхнего квазиоднородного слоя (upper mixed layer, UML) [35].

Глубину такого слоя (Z_{UML}) определяли по критерию разности плотности воды ($0,2 \text{ кг} \cdot m^{-3}$) относительно глубины 1 м [36]. Значение суточной величины PAR в среднем для UML (PAR_{UML} , $\text{Э} \cdot m^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) рассчитывали на основе суточной $PAR(0)$, измеренной с помощью *Li-Cor*, по формуле [37]

$$PAR_{UML} = 0,94 \cdot PAR(0) \cdot \frac{\left[1 - e^{-4,6 \frac{Z_{UML}}{Z_{eu}}}\right]}{4,6 \frac{Z_{UML}}{Z_{eu}}},$$

где 0,94 – коэффициент перехода ³ от $PAR(0)$ к $PAR(0^-)$.

³ Маньковский В. И. Основы оптики океана. Методическое пособие. Севастополь : МГИ НАН Украины, 1996. 119 с.

Результаты

Температура поверхностных вод ТО 17–30 августа 2023 г. снижалась с юга на север от 16,0 до 9,9 °С, в среднем составляя $13,8 \pm 1,48$ °С (табл. 1). Соленость поверхностных вод варьировала от 23 до 32 ЕПС. На большинстве станций соленость была близка к среднему значению $30,8 \pm 1,48$ ЕПС, и только на мелководье (22–26 м) в Авачинской бухте (ст. 1–3) соленость была ниже (23–27 ЕПС), что было связано со стоком р. Авачи.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Гидрофизические и биооптические характеристики вод Тихого океана
и Охотского моря в августе – сентябре 2023 г.
Hydrophysical and bio-optical characteristics of the Pacific Ocean
and the Sea of Okhotsk waters in August – September, 2023

Регион / Region	Показатель / Parameter	t	S	Z_s	Z_{eu}	Z_{1opt}	Z_{UML}	PAR_{UML}	$TChl-a$
Тихий океан / PO	$av \pm SD$	$13,8 \pm 1,5$	$30,0 \pm 1,5$	$6,4 \pm 2,4$	$20 \pm 6,4$	$3,1 \pm 1,0$	$3,9 \pm 2,4$	$14,1 \pm 6,7$	$2,8 \pm 2,9$
	min – max	9,9–16,0	23,0–32,0	2,0–10,0	8,0–35,0	1,2–5,5	2,0–11,0	3,0–27,0	0,67–14
Охотское море / SO	$av \pm SD$	$10,9 \pm 1,6$	$32,3 \pm 0,4$	$7,8 \pm 2,0$	$27 \pm 9,8$	$4,0 \pm 1,3$	$11,2 \pm 6,3$	$7,2 \pm 5,8$	$2,9 \pm 1,3$
	min – max	7,5–12,9	30,5–32,6	5,0–13,0	14,0–47,0	2,2–7,5	2,0–24,0	0,77–22,0	1,2–5,5

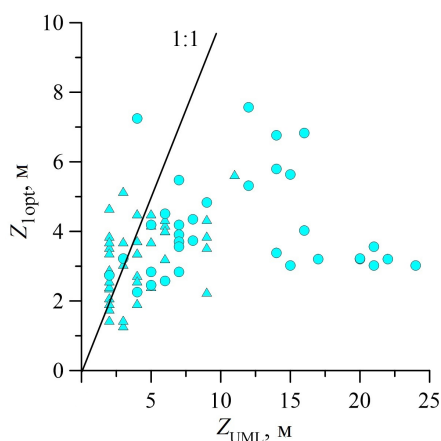
П р и м е ч а н и е : t – поверхностная температура, °С; S – поверхностная соленость, ЕПС; Z_{1opt} – первая оптическая глубина, м; Z_s – глубина видимости диска Секки, м; Z_{eu} – глубина зоны фотосинтеза, м; Z_{UML} – глубина верхнего квазиоднородного слоя, м; PAR_{UML} – средний уровень фотосинтетически активной радиации в UML, Э·м⁻²·сут⁻¹; $TChl-a$ – суммарная концентрация хлорофилла a и феопигментов в поверхностном слое, мг·м⁻³; av – среднее значение; SD – среднее квадратическое отклонение.

Comments : t is surface temperature, °C; S is surface salinity, PSU; Z_{1opt} is the first optical depth, m; Z_s is the Secchi disk depth, m; Z_{eu} is euphotic zone depth, m; Z_{UML} is upper mixed layer depth, m; PAR_{UML} – average level of photosynthetically available radiation in UML, E·m⁻²·d⁻¹; $TChl-a$ is a concentration of chlorophyll a plus pheopigments in the surface layer, mg·m⁻³; av is average value; SD is standard deviation.

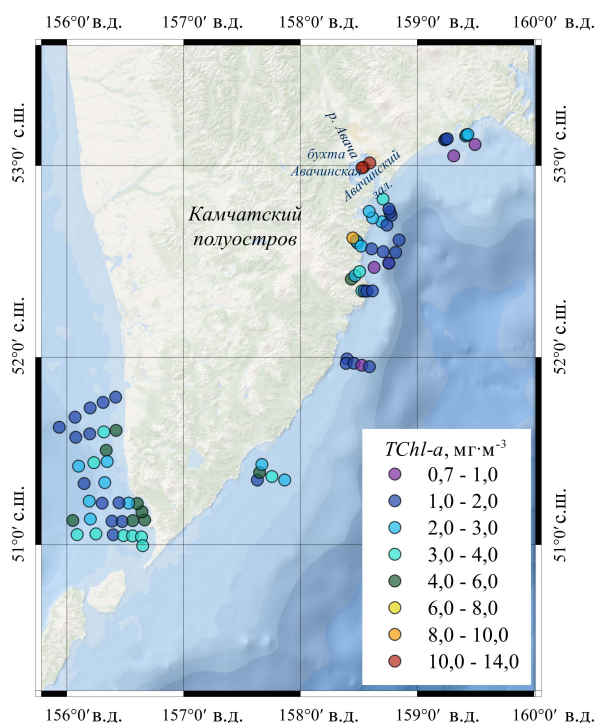
Температура поверхностных вод в ОМ в течение периода исследования (с 31 августа по 9 сентября 2023 г.) была ниже ($7,5$ – $12,9$ °С со средним значением $(10,9 \pm 1,6)$ °С), чем в ТО. Соленость поверхности варьировала в узком диапазоне ($30,5$ – $32,6$ ЕПС), в среднем составляя $(32,3 \pm 0,4)$ ЕПС (табл. 1). В пределах исследуемого слоя воды, от поверхности до дна на мелководье или до горизонта 50 м в других районах, температура с глубиной снижалась, а соленость увеличивалась. В результате наблюдалась вертикальная стратификация вод. В ТО максимальный градиент плотности $\Delta\sigma$ варьировал между станциями от 0,19 до 2,5 кг·м⁻⁴ со средним значением $(0,61 \pm 0,40)$ кг·м⁻⁴, тогда как в ОМ его значения были ниже: от 0,019 до 0,74 кг·м⁻⁴, среднее $(0,22 \pm 0,16)$ кг·м⁻⁴, что в три раза ниже, чем в ТО.

Значения Z_s в ТО составляли 2,0–10 м, в среднем $(6,4 \pm 2,4)$ м, что ниже, чем в ОМ – 5,0–13,0 м, в среднем $(7,8 \pm 2,0)$ м (табл. 1). Наименее прозрачные воды наблюдались в Авачинской бухте (рис. 1). Глубина Z_{eu} в ТО – 8,0–35,0 м, в среднем $(20 \pm 6,4)$ м – была меньше, чем в ОМ – 14,0–47,0 м, в среднем $(27 \pm 9,8)$ м.

Диапазоны вариабельности и средние значения Z_{1opt} и Z_{UML} приведены в таблице 1. Значения Z_{1opt} на большинстве станций были меньше Z_{UML} (рис. 2).



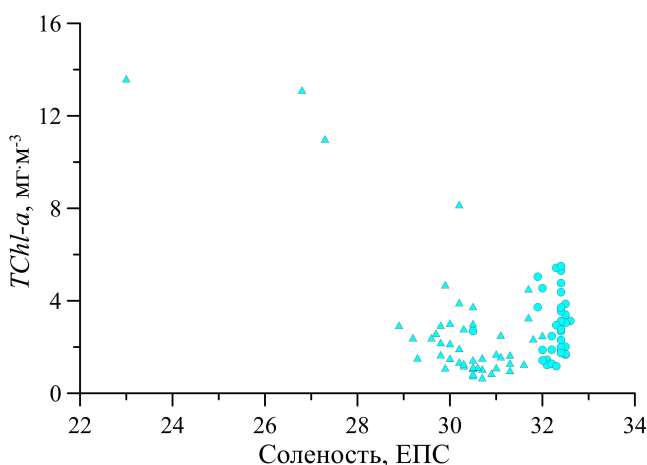
Р и с. 2. Связь первой оптической глубины Z_{1opt} и глубины верхнего квазиоднородного слоя Z_{UML} в Тихом океане (треугольники) и Охотском море (кружки) в августе – сентябре 2023 г.
F i g. 2. Relations between the first optical depth Z_{1opt} and the upper mixed layer depth Z_{UML} in the Pacific Ocean (triangles) and in the Sea of Okhotsk (circles) in August – September, 2023



Р и с. 3. Поверхностная концентрация хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$) в Тихом океане (17–30 августа 2023 г.) и Охотском море (31 августа – 9 сентября 2023 г.) вблизи южной части Камчатского п-ова
F i g. 3. Surface concentration of chlorophyll a plus phaeopigments ($TChl-a$) in the Pacific Ocean (August 17–30, 2023) and in the Sea of Okhotsk (August 31 – September 9, 2023) near the southern part of the Kamchatka Peninsula

Исследуемая акватория была неоднородной по $TChl-a$ (табл. 1, рис. 3). В ТО значения $TChl-a$ увеличивались от $0,67$ (ст. 33) до 14 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (ст. 1) в слое от поверхности до первой оптической глубины ($0-Z_{\text{lopt}}$) и от $0,67$ (ст. 33) до 16 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ (ст. 44) в пределах зоны фотосинтеза ($0-Z_{\text{eu}}$). В слое $0-Z_{\text{lopt}}$ относительно высокие значения $TChl-a$ ($10\text{--}14$ $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) отмечены в опресненных водах Авачинского залива, низкие (менее 1 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) – в шельфовых водах (рис. 3, 4), что отражает влияние стока реки на $TChl-a$.

В ОМ значения $TChl-a$ варьировали в более узком диапазоне по сравнению с ТО: от $1,2$ до $7,7$ $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ в слое $0-Z_{\text{lopt}}$ и от $0,87$ до $8,9$ $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ в зоне фотосинтеза. Прибрежные воды (ст. 50, 59, 60, 63, 68, 70) характеризовались повышенным значением $TChl-a$ в поверхностном слое (более 4 $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) (рис. 3). Снижение $TChl-a$ наблюдалось в направлении от берега к глубоководной части (рис. 3). Несмотря на различия в диапазонах изменчивости $TChl-a$ в слое $0-Z_{\text{lopt}}$ между ТО и ОМ, средние значения были близки: $(3,0 \pm 3,0)$ и $(3,3 \pm 1,6)$ $\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$ соответственно.



Р и с. 4. Связь поверхностной концентрации хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$) с соленостью воды в Тихом океане (треугольники) и в Охотском море (кружки) в августе – сентябре 2023 г.

F i g. 4. Relations between the surface concentration of chlorophyll a plus phaeopigments ($TChl-a$) and water salinity in the Pacific Ocean (triangles) and in the Sea of Okhotsk (circles) in August – September, 2023

В районе работ воды были стратифицированы, и вертикальный градиент плотности ($\Delta\sigma_t$) наблюдался в пределах слоя $0-Z_{\text{eu}}$ почти на всех станциях, за исключением нескольких (ст. 77–79) в ОМ (см. рис. 1), где Z_{UML} ($20\text{--}25$ м) достигала Z_{eu} (рис. 5). Стратификация вод определяла вертикальное распределение $TChl-a$ (рис. 5). Можно выделить четыре типа профилей флуоресценции хлорофилла a по положению ее максимума относительно поверхности, градиента плотности, границы зоны фотосинтеза (рис. 5), характеризующиеся следующими особенностями:

1) профили с максимумом флуоресценции в *UML* (7–8 м) и резким уменьшением содержания хлорофилла *a* в нижележащих слоях. Этот тип наблюдался в высокопродуктивных водах Авачинской бухты (ст. 1–3);

2) профили с узким и мощным максимумом флуоресценции в слое градиента плотности $\Delta\sigma_t$ (рис. 5). В водах с высоким градиентом плотности ($\Delta\sigma_t \sim 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-4}$), на ст. 41–44, значения *TChl-a* ($5,1\text{--}16 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$) в максимуме флуоресценции приблизительно на порядок превышали поверхностные ($1,0\text{--}1,7 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$);

3) профили с максимумом флуоресценции глубже слоя градиента плотности $\Delta\sigma_t$, вблизи нижней границы зоны фотосинтеза;

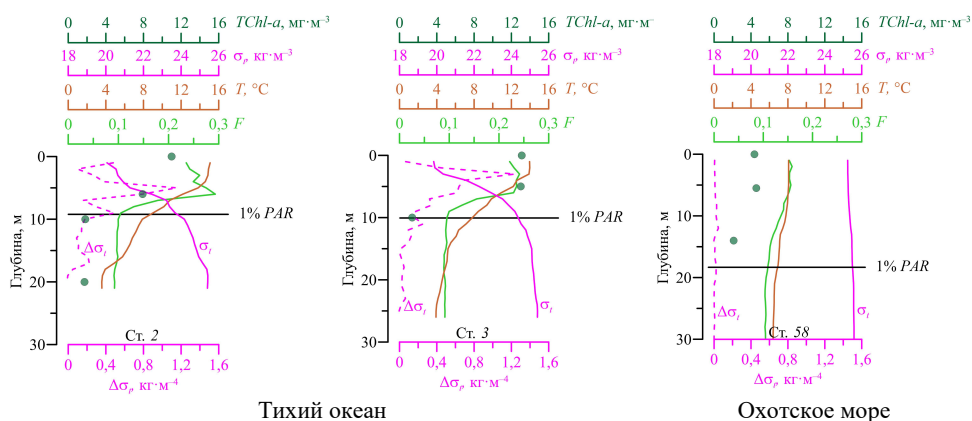
4) профили с равномерным распределением *TChl-a* в пределах зоны фотосинтеза при отсутствии стратификации вод в ее пределах (ст. 77–79 в ОМ).

Профили флуоресценции хлорофилла *a* первого – третьего типа наблюдались как в ТО, так и в ОМ (рис. 5), четвертого типа – только в ОМ на станциях с глубоким перемешиванием. В ТО на всех станциях отмечена стратификация в пределах зоны фотосинтеза. В ОМ она наблюдалась почти на всех станциях, за исключением нескольких (ст. 77–79), где Z_{UML} была близка к Z_{eu} и даже превышала (рис. 5).

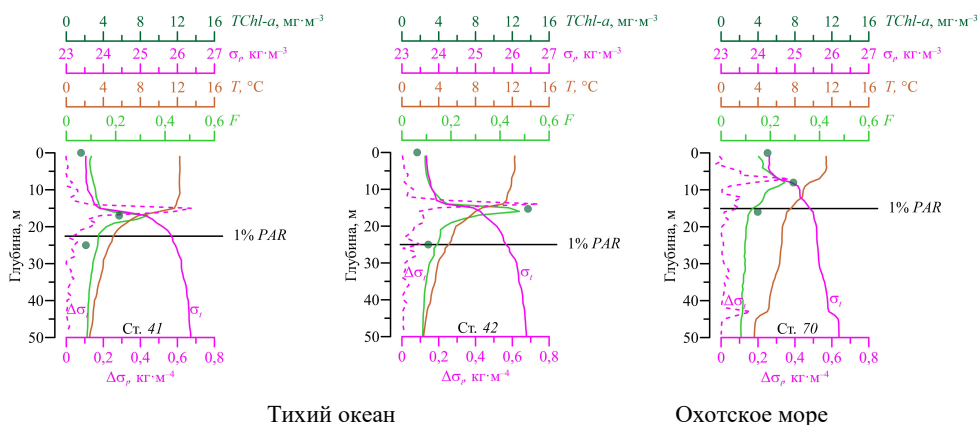
Спектры $a_{ph}(\lambda)$ характеризовались двумя максимумами: в синей области на длине волны 438 нм ($a_{ph}(438)$) и в красной – на длине волны 675 нм ($a_{ph}(675)$). В поверхностном слое значения $a_{ph}(675)$ и $a_{ph}(438)$ варьировали в пределах порядка величины: от 0,018 до 0,20 и от 0,049 до 0,31 м^{-1} соответственно. В *UML* значения $a_{ph}(675)$ и $a_{ph}(438)$ изменялись в более широком диапазоне (0,018 до 0,26 и от 0,049 до 0,50 м^{-1}). Вариабельность $a_{ph}(675)$ и $a_{ph}(438)$ в пределах зоны фотосинтеза Z_{eu} (от 0,018 до 0,26 и от 0,029 до 0,50 м^{-1}) была близка к вариабельности в *UML*. Поглощение света фитопланктоном связано со всеми пигментами, содержащимися в клетках микроводорослей [38]. Однако параметризация поглощения света пигментами фитопланктона направлена на получение зависимости между $a_{ph}(\lambda)$ и *TChl-a* [32]. Это связано с тем, что хлорофилл *a* является основным фотосинтетически активным пигментом, что определяет его экологическую значимость как показателя продуктивности вод.

В результате вертикальной стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза образуются два квазиизолированных слоя, которые различаются по условиям, в частности световым (табл. 2). Связь $a_{ph}(\lambda)$ (в максимумах спектра) с *TChl-a* определяли для трех слоев: *UML*, слой между *UML* и Z_{eu} (глубина с 1%-ным уровнем *PAR*) и слой между Z_{eu} и горизонтом с 0,1%-ным уровнем *PAR* ($Z_{0,1\%}$) (рис. 6, табл. 2).

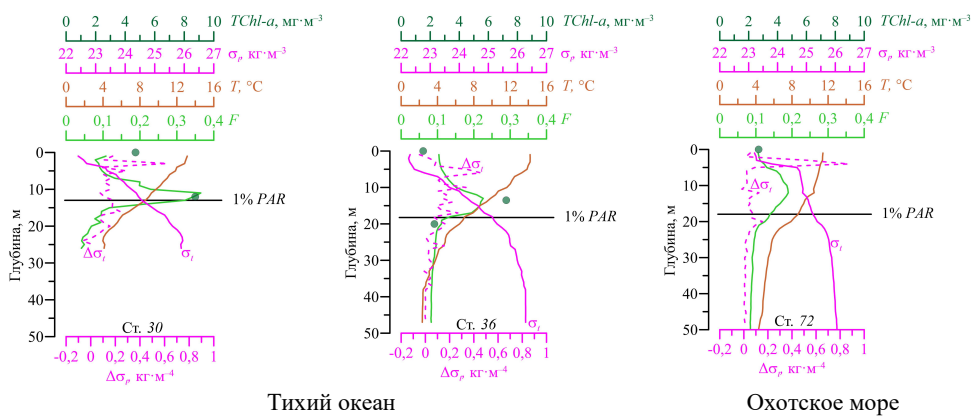
Тип 1



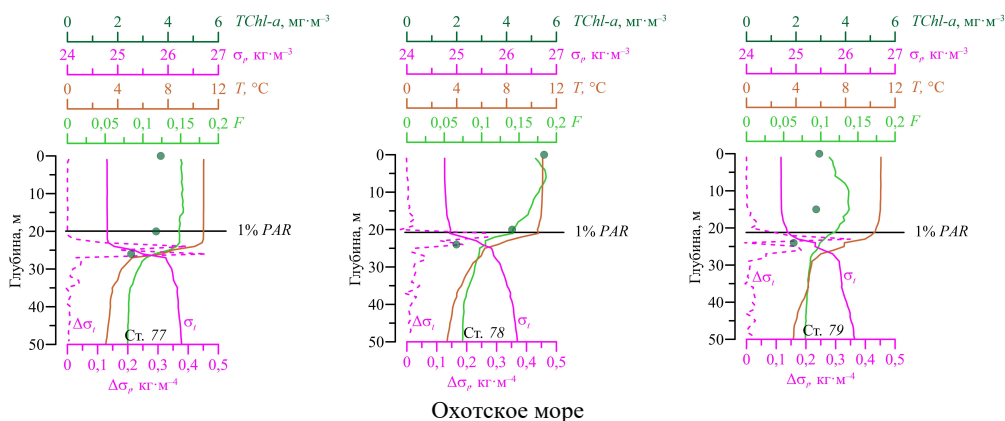
Тип 2



Тип 3

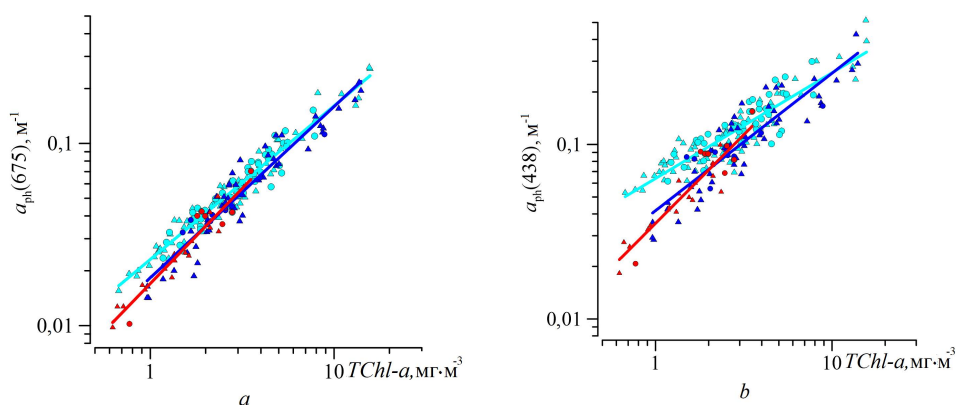


Тип 4



Р и с. 5. Типы вертикального распределения хлорофилла a на основе флуоресценции хлорофилла a (F) и концентрации хлорофилла a в сумме феопигментами, измеренной спектрофотометрическим методом ($TChl-a$), температуры воды (T), плотности воды (σ_t), вертикального градиента σ_t ($\Delta\sigma_t$) на отдельных станциях в Тихом океане (с 19 по 30 августа 2023 г.) и Охотском море (с 31 августа по 9 сентября 2023 г.) вблизи Камчатского п-ова. Черной линией обозначена зона фотосинтеза (1 % PAR)

F i g. 5. Types of the chlorophyll a vertical distribution based on chlorophyll a fluorescence (F) and concentration of chlorophyll a plus phaeopigments measured by a spectrophotometrical method ($TChl-a$), water temperature (T), water density (σ_t), vertical gradient of σ_t ($\Delta\sigma_t$) at particular stations in the Pacific Ocean (August 19–30 August, 2023) and in the Sea of Okhotsk (August 31 – September 9, 2023) off the Kamchatka Peninsula. The black line indicates the euphotic zone (1 % PAR)



Р и с. 6. Степенная зависимость показателя поглощения света фитопланктоном на длинах волн 675 нм ($a_{ph}(675)$) (a) и 438 нм ($a_{ph}(438)$) (b) от концентрации хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$) в Тихом океане (треугольники) и Охотском море (кружки) для UML (бирюзовый цвет), слоя между UML и нижней границей зоны фотосинтеза Z_{eu} (синий цвет) и слоя между Z_{eu} и глубиной с 0,1 % PAR (красный цвет).

F i g. 6. Power dependence of phytoplankton light absorption coefficient at the 675 nm ($a_{ph}(675)$, m^{-1}) (a) and 438 nm ($a_{ph}(438)$, m^{-1}) (b) wavelengths upon the concentration of chlorophyll a plus phaeopigments ($TChl-a$) in the Pacific Ocean (triangles) and in the Sea of Okhotsk (circles) for UML (turquoise colour), the layer between UML and bottom of the euphotic zone Z_{eu} (blue colour), and the layer between Z_{eu} and depth with 0.1 % PAR (red colour)

Коэффициенты зависимости $a_{ph}(\lambda)$ (на длине волны 438, 675 нм) от $TChl-a$ для UML отличались от коэффициентов для слоя между UML и Z_{eu} ($p < 0,0001$) и слоя между Z_{eu} и $Z_{0,1\%}$ ($p < 0,0001$) (рис. 6), при этом различий между ТО и ОМ в пределах конкретного слоя статистически не обнаружено ($p < 0,1$). Значение коэффициента $A(\lambda)$ уменьшалось с глубиной от слоя к слою, что было более выраженным в синей области спектра: 0,058; 0,043 и 0,034 $m^2 \cdot mg^{-1}$ (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Коэффициенты $A(\lambda)$, $m^2 \cdot mg^{-1}$, и $B(\lambda)$ степенной зависимости $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) TChl-a^{(B(\lambda))}$ для разных слоев
Coefficients $A(\lambda)$, $m^2 \cdot mg^{-1}$, and $B(\lambda)$ of the power relationship $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) TChl-a^{(B(\lambda))}$ for different water layers

Слой / Layers	$PAR \pm SD$	n	$A(438)$	$B(438)$	r^2	$A(675)$	$B(675)$	r^2
UML	$11,0 \pm 7,3$	122	0,058	0,606	0,81	0,0231	0,843	0,94
$Z_{UML} - Z_{eu}$	$2,3 \pm 3,0$	60	0,043	0,788	0,81	0,0203	0,94	0,92
$Z_{eu} - Z_{0,1\%}$	$0,48 \pm 1,30$	25	0,0340	1,03	0,78	0,0162	1,03	0,83

П р и м е ч а н и е : UML – верхний квазиизолированный слой; Z_{UML} – нижняя граница UML ; Z_{eu} – нижняя граница зоны фотосинтеза; $Z_{0,1\%}$ – глубина с 0,1%-ным уровнем фотосинтетически активной радиации (PAR); n – количество данных; $PAR \pm SD$ – среднее значение PAR для слоя и среднее квадратическое отклонение, $Э \cdot m^{-2} \cdot cут^{-1}$.

Comments: UML is upper mixed layer; Z_{UML} is lower boundary of UML ; Z_{eu} is bottom of the euphotic zone; $Z_{0,1\%}$ is depth with 0.1 % level of photosynthetically available radiation (PAR); n – number of data; $PAR \pm SD$ is average PAR value for the layer and standard deviation, $E \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$.

Значение коэффициента $A(\lambda)$ соответствует $a_{ph}^*(\lambda)$ при $TChl-a$, равном 1 $mg \cdot m^{-3}$. Следовательно, уменьшение $A(\lambda)$ отражает снижение $a_{ph}^*(\lambda)$ с глубиной. Сравнение значений $a_{ph}^*(\lambda)$ между слоями в пределах зоны фотосинтеза (UML и слой между Z_{UML} и Z_{eu}) показывает, что средние величины $a_{ph}^*(\lambda)$ значительно различались между слоями.

Зависимость между $a_{ph}(\lambda)$ (на длине волны 438 и 675 нм) и $TChl-a$ в слоях зоны фотосинтеза описана степенной функцией с коэффициентами $B(\lambda) < 1$ (табл. 2), что отражает уменьшение $a_{ph}^*(\lambda)$ с увеличением $TChl-a$ (рис. 6). Коэффициент $B(\lambda)$, полученный для UML , был ниже, чем для более глубоких слоев (табл. 2), что указывает на более выраженное снижение $a_{ph}^*(\lambda)$ при увеличении $TChl-a$ в этом слое.

Значения Z_{UML} изменялись в широком диапазоне: от 2 до 11 м в ТО и от 2 до 24 м в ОМ (см. табл. 1). В связи с высокой вариабельностью величин Z_{UML} и Z_s , которые определяют условия освещенности в UML , значения PAR_{UML} изменялись в пределах порядка величины и более: от 3 до 27 и от 0,77 до 22 $Э \cdot m^{-2} \cdot cут^{-1}$ в ТО и ОМ соответственно (см. табл. 1). Отмечен тренд к увеличению $a_{ph}^*(675)$ с ростом PAR_{UML} (рис. 7). Изменение $a_{ph}^*(675)$ при одинаковых световых условиях в UML связано с влиянием $TChl-a$. Так, в ОМ при ана-

логичном значении PAR_{UML} (12–16 $\text{Э} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) значения $a_{ph}^*(675)$ уменьшились почти в два раза в связи с ростом $TChl-a$ приблизительно в пять раз (рис. 7, точки в эллипсе). Следует отметить, что уменьшение $a_{ph}^*(675)$ сопровождалось уменьшением R (рис. 7), что отражает более значительное снижение $a_{ph}^*(\lambda)$ в синей части спектра при увеличении $TChl-a$.

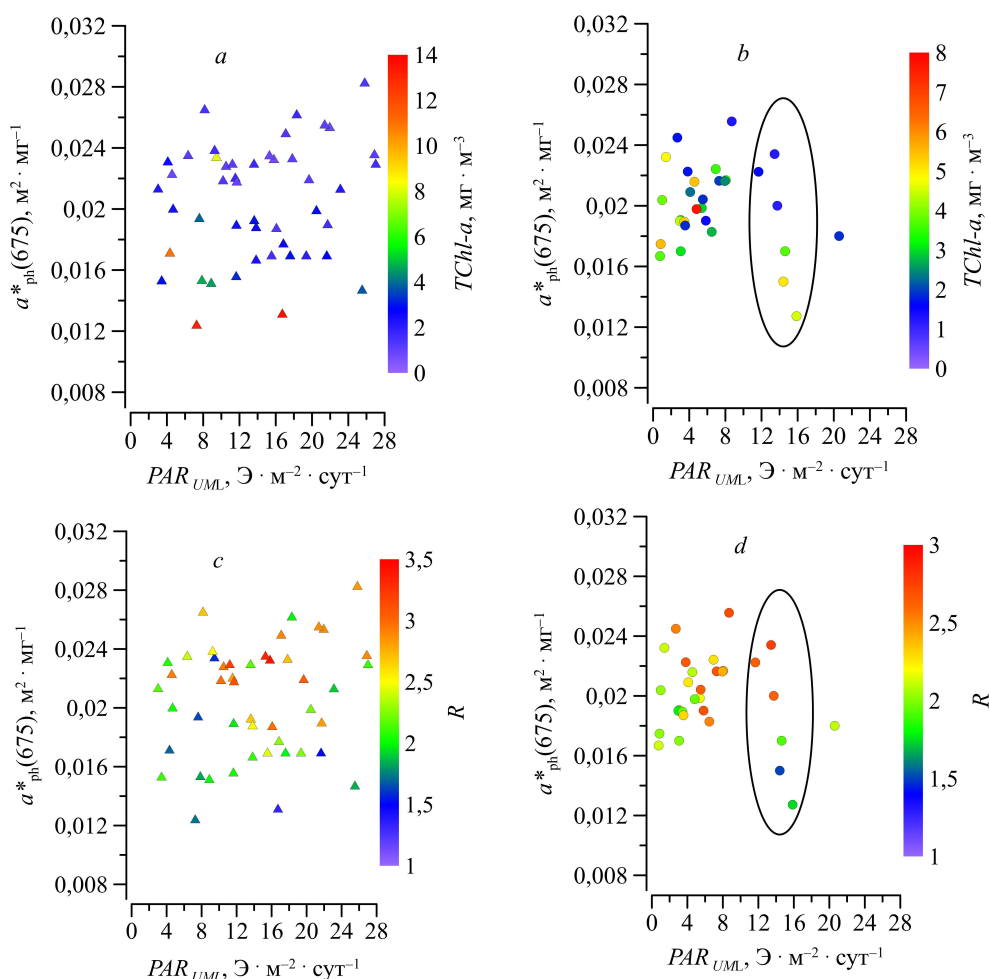


Рис. 7. Связь удельного показателя поглощения света фитопланктоном на длине волны 675 нм ($a_{ph}^*(675)$) со средним уровнем фотосинтетически активной радиации в верхнем квазиоднородном слое (PAR_{UML}) в Тихом океане (треугольники) (a, c) и Охотском море (кружки) (b, d)

Fig. 7. Relations between the chlorophyll *a* specific coefficient of phytoplankton light absorption at the 675 nm ($a_{ph}^*(675)$) wavelength and the average photosynthetically available radiation in the upper mixed layer (PAR_{UML}) in the Pacific Ocean (triangles) (a, c) and in the Sea of Okhotsk (circles) (b, d)

Для восстановления спектров $a_{ph}(\lambda)$ на основе данных $TChl-a$ для выделенных слоев была получена зависимость $a_{ph}(\lambda)$ vs $TChl-a$ в видимом диапазоне излучения (400–700 нм) с разрешением спектра 2 нм (рис. 8, приложения 1, 2).

Значения $A(\lambda)$ для слоев зоны фотосинтеза превышают значения $A(\lambda)$ для океанических вод [32]. Для слоя глубже Z_{eu} значения $A(\lambda)$ совпадают с литературными данными для океанских вод [32] (рис. 8).

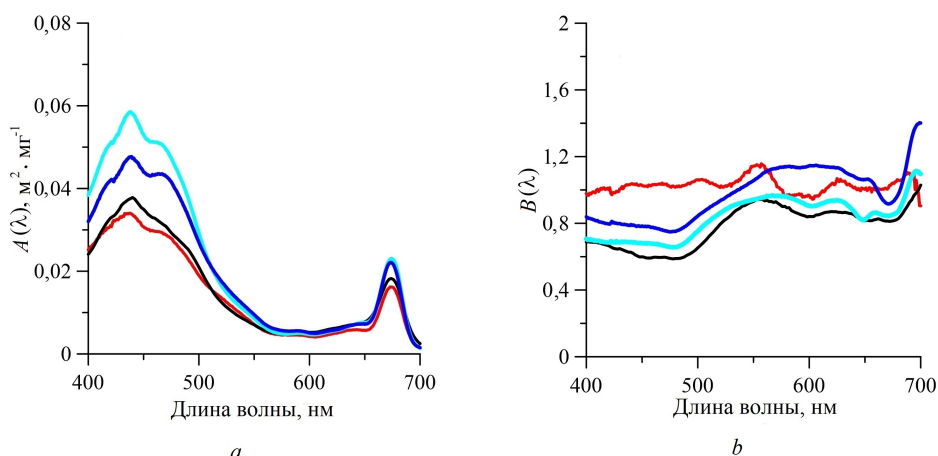


Рис. 8. Спектральные коэффициенты ($A(\lambda)$ (a) и $B(\lambda)$ (b)) зависимости показателя поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) от концентрации хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a^3$): $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ – для UML (бирюзовый цвет), слоя между UML и нижней границей зоны фотосинтеза Z_{eu} (синий цвет) и слоя между Z_{eu} и глубиной с 0,1%-ным уровнем фотосинтетически активной радиации (красный цвет) в шельфовых водах вблизи п-ова Камчатка. Черная линия соответствует коэффициентам зависимости, полученным для Мирового океана [32]

Fig. 8. Spectral coefficients ($A(\lambda)$ (a) and $B(\lambda)$ (b)) of the dependence of phytoplankton light absorption coefficient ($a_{ph}(\lambda)$) upon the concentration of chlorophyll a plus phaeopigments ($TChl-a^3$) – $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ – for UML (turquoise colour), the layer between UML and bottom of the euphotic zone Z_{eu} (blue colour), and the layer between Z_{eu} and depth with 0.1 % photosynthetically active radiation (red colour) in shelf waters near the Kamchatka Peninsula. Black line corresponds to the relationship coefficients obtained for the global ocean [32]

Обсуждение

Район работ отличался высокой неоднородностью по исследованным показателям. Значения $TChl-a$ в поверхностном слое (0–1 м) изменялись в пределах одного – двух порядков (от 0,67 до 14 мг·м⁻³). Повышенные значения $TChl-a$ отмечены в прибрежных опресненных водах (см. рис. 3), что связано с береговым и речным стоком [12–14], который приносит необходимые для развития фитопланктона [39] биогенные элементы (P, Si, N и Fe) в основном вулканического происхождения [12, 13].

Наблюдаемое разнообразие вертикальных профилей $TChl-a$ (см. рис. 5) является результатом взаимодействия комплекса факторов: биогенной обеспеченности и гидрофизических характеристик, таких как интенсивность света, вертикальная стратификация и перемешивание вод [33, 40, 41]. Изменение ключевых факторов среды приводит к формированию профиля $TChl-a$ определенного типа [42].

В условиях стратификации вод в пределах зоны фотосинтеза профиль $TChl-a$ характеризуется наличием максимума, положение которого зависит от условий среды. Профиль $TChl-a$ с глубинным максимумом вблизи Z_{eu} (*deep*

chlorophyll a maximum, DCM) (тип 3 на рис. 5) формируется в результате активного роста фитопланктона в *UML*, который приводит к снижению содержания биогенных элементов в *UML* [33, 43]. Относительно высокие значения *TChl-a* в слое *DCM* обусловлены преимущественно адаптивным увеличением содержания пигментов в клетках микроводорослей и только частично – ростом биомассы фитопланктона [42, 43]. Профиль с подповерхностным максимумом *TChl-a* (тип 1 на рис. 5) обусловлен постоянным поступлением биогенных элементов в поверхностные воды (распределение Авачинского залива можно рассматривать как показатель постоянного поступления биогенных элементов) [33, 42]. В стратифицированных водах выделен еще один тип профиля (тип 2 на рис. 5) с локальным максимумом *TChl-a* в слое градиента плотности, что обусловлено благоприятными условиями (по освещенности и обеспеченности биогенными элементами) для роста фитопланктона [40, 41].

При отсутствии стратификации в пределах зоны фотосинтеза происходит равномерное распределение *TChl-a* (тип 4, рис. 5) вследствие активного вертикального перемешивания вод [33, 43].

Значения $a_{ph}(\lambda)$ и *TChl-a* изменялись в широком диапазоне, что позволило установить зависимость между этими параметрами для двух слоев зоны фотосинтеза и нижележащего слоя в диапазоне длин волн 400–700 нм с шагом в 2 нм (приложения 1, 2) (рис. 8). Результаты параметризации позволяют восстанавливать спектры $a_{ph}(\lambda)$ по *TChl-a*, что требуется для моделирования спектральной облученности в море и расчета первичной продукции фитопланктона. Поскольку на большинстве станций первая оптическая глубина (Z_{1opt}) находится в пределах *UML* (см. рис. 2), биооптические показатели вод *UML* определяют спектральные характеристики излучения, восходящего из водной толщи [44]. Следовательно, коэффициенты зависимости $a_{ph}(\lambda)$ от *TChl-a* для *UML* (приложения 1, 2), могут быть использованы для разработки регионального спутникового алгоритма, в частности для оценки *TChl-a* на основе значений $a_{ph}(\lambda)$, восстановленных с использованием спутниковых данных и алгоритмов, таких как трехканальный алгоритм [24]. Применение региональной параметризации обеспечит более точную оценку *TChl-a* по сравнению со стандартными спутниковыми продуктами, которые значительно (более чем на 260 %) превышали значение *TChl-a* в ОМ [19, 45].

Снижение $a_{ph}^*(\lambda)$ с увеличением *TChl-a* (см. рис. 7), вероятно, связано с ростом доли крупноклеточных видов в фитопланктоне. Исследования в водах с разным статусом трофности (от гиперолиготрофных до эвтрофных) показали, что рост содержания хлорофилла *a* сопровождается увеличением среднего размера клеток фитопланктона [46–49]. Отмеченное в наших исследованиях двукратное снижение $a_{ph}^*(675)$ (с 0,025 до 0,012 м²·мг^{–1}) с повышением *TChl-a* при близких значениях *PAR_{UML}* (см. рис. 7), вероятно, было связано с увеличением среднего размера клеток фитопланктона с ~ 5 до ~ 20 мкм [50, 51]. Снижение $a_{ph}^*(675)$ и *R* с ростом размера клеток микроводорослей [46, 52] обусловлено увеличением степени самозатенения пигментов в клетках [53].

Установленные различия между слоями зоны фотосинтеза по значениям коэффициентов (*A*(λ) и *B*(λ)) в зависимости $a_{ph}(\lambda)$ от *TChl-a* (см. рис. 8,

табл. 2) связаны с уменьшением $a_{ph}^*(\lambda)$ (при одинаковых $TChl-a$) с глубиной от одного слоя к другому (см. рис. 6) в результате изменения внутриклеточной концентрации пигментов, содержания вспомогательных пигментов (относительно $TChl-a$) [32, 54–57] и размерной (видовой) структуры фитопланктона [56–59] в процессе адаптации к факторам среды (свет, температура и доступность питательных веществ) [60–62]. Наибольшая изменчивость концентрации пигментов в клетках обусловлена световыми условиями [61]. Сравнение параметризации поглощения света пигментами фитопланктона (коэффициенты $A(438)$ и $A(675)$) в разных регионах, а также в отдельные сезоны показало зависимость от световых условий ($r^2 = 0,99$ и $r^2 = 0,94$) (рис. 9). Значения $A(438)$ и $A(675)$ были почти одинаковыми в разных регионах (в UML Черного моря зимой и в слое между Z_{UML} и Z_{eu} в исследуемой акватории) при близких световых условиях существования фитопланктона. Это означает, что различия в параметризации поглощения света пигментами фитопланктона между слоями зоны фотосинтеза, сезонами и между регионами были обусловлены адаптивным изменением на клеточном (внутриклеточная концентрация пигментов) и популяционном (видовая/размерная структура фитопланктона) уровнях под влиянием главным образом светового фактора.

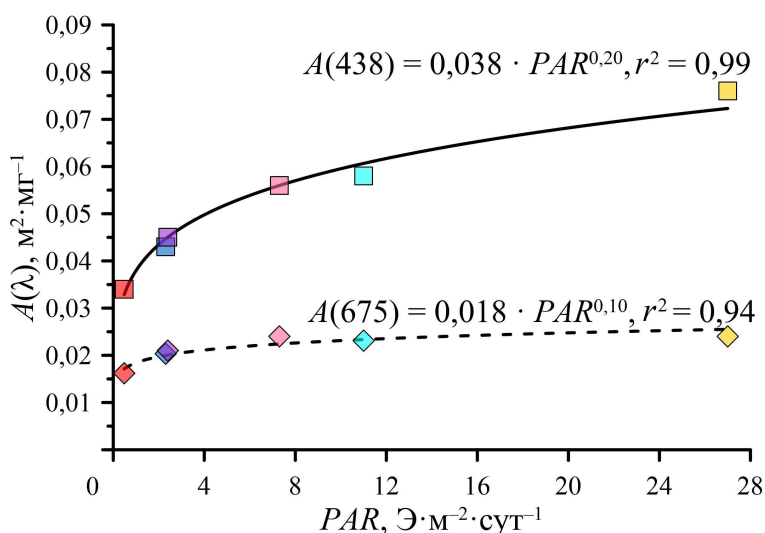


Рис. 9. Влияние фотосинтетически активной радиации (PAR) на коэффициент $A(\lambda)$ в уравнении $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ в исследуемой акватории (бирюзовым цветом) для верхнего квазиоднородного слоя (UML), синим – для слоя между UML и оптической глубиной 4,6, красным – для слоя между оптической глубиной 4,6 и 6,9); в UML Черного моря (желтым цветом – летом, фиолетовым – зимой) [56]; в UML Баренцева и Норвежского морей и прилегающего района Северного Ледовитого океана (розовым цветом) [63]. Показаны значения $A(438)$ (квадрат) и $A(675)$ (ромб)

Fig. 9. Impact of photosynthetically available radiation (PAR) on coefficient $A(\lambda)$ in equation $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{B(\lambda)}$ in the study area for UML (turquoise), for the layer between UML and optical depth 4.6 (blue), and for the layer between optical depths 4.6 and 6.9 (red); in UML of the Black Sea (summer is in yellow, and winter – in purple) [56]; in UML of the Barents and Norwegian seas and the adjacent Arctic Ocean (pink) [63]. Values $A(438)$ (square) and $A(675)$ (rhombus) are shown

Заключение

Впервые для шельфовых вод вблизи южной части п-ова Камчатка выполнены исследования variability спектральных показателей поглощения света пигментами фитопланктона и их связи с концентрацией хлорофилла *a*. Район исследования характеризовался высокой изменчивостью значений этих параметров (в пределах порядка и более). Показано влияние берегового и речного стока на пространственное распределение этих параметров. Выявлено четыре типа вертикального распределения концентрации хлорофилла *a* в зависимости от факторов среды. Установлена зависимость удельных показателей от уровня *PAR* и концентрации хлорофилла *a*, что обусловлено фотоадаптивным изменением внутриклеточной концентрации пигментов и увеличением степени их упаковки в крупноклеточном фитопланктоне, доля которого в общей биомассе фитопланктона растет с повышением трофности вод.

Впервые для района исследований выполнена параметризация поглощения света пигментами фитопланктона в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм (с разрешением в 2 нм) для двух слоев в зоне фотосинтеза, разделенных плотностной стратификацией, и нижележащего слоя. Выявлены статистически достоверные различия между этими слоями по коэффициентам параметризации. Установленные степенные коэффициенты связи $a_{ph}(\lambda)$ – *TChl-a* позволяют корректно восстанавливать спектры $a_{ph}(\lambda)$ по *TChl-a* для всей зоны фотосинтеза, что имеет решающее значение для моделирования спектральной облученности в море и расчета первичной продукции фитопланктона, а также для разработки регионального спутникового алгоритма оценки концентрации хлорофилла *a*. Полученные результаты могут быть использованы при организации системы оперативного мониторинга продуктивности и экологического состояния вод вблизи п-ова Камчатка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Seasonal variability of phytoplankton pigment concentration in the Okhotsk Sea / S. Saitoh [et al.] // Journal of the Remote Sensing Society of Japan. 1996. Vol. 16, iss. 2. P. 86–92.
2. Sorokin Yu. I., Sorokin P. Yu. Production in the Sea of Okhotsk // Journal of Plankton Research. 1999. Vol. 21, iss. 2. P. 201–230. EDN LFSRRV. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.201>
3. Shiimoto A., Hashimoto S., Murakami T. Primary productivity and solar radiation off Sanriku in May 1997 // Journal of Oceanography. 1998. Vol. 54, iss. 5. P. 539–544. EDN QDSAPC. <https://doi.org/10.1007/BF02742455>
4. Classification of optical water groups in the subarctic pacific and adjacent seas using satellite-derived light absorption spectra of chromophoric dissolved organic matter / J. Oida [et al.] // Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 2024. Vol. 208. 104313. EDN PLBIGW. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2024.104313>
5. A review of the oceanographic structure and biological productivity in the southern Okhotsk Sea / R. Mundo [et al.] // Progress in Oceanography. 2024. Vol. 221. 103194. EDN ZITSRX. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103194>
6. Biogeochemical and physical processes in the Sea of Okhotsk and the linkage to the Pacific Ocean / J. Nishioka [et al.] // Progress in Oceanography. 2014. Vol. 126. P. 1–7. EDN UEPIZH. <https://doi.org/doi:10.1016/j.pocean.2014.04.027>
7. Phytoplankton provision with nutrients in the northern part of the Sea of Okhotsk / N. V. Arzhanova [et al.] // Oceanology. 2002. Vol. 42, iss. 2. P. 185–196.

8. Seasonal change of oceanographic conditions and chlorophyll *a* vertical distribution in the southwestern Okhotsk Sea during the non-iced season / H. Kasai [et al.] // *Journal of Oceanography*. 2010. Vol. 66. P. 13–26. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0002-3>
9. Агатова А. И., Лапина Н. М., Торгунова Н. И. Органическое вещество, скорости его трансформации и продуктивность различных районов Охотского моря // *Труды ВНИРО: Среда обитания водных биологических ресурсов. Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов*. 2010. Т. 164. С. 41–61.
10. Primary productivity and phytoplankton community structure in surface waters of the western subarctic Pacific and the Bering Sea during summer with reference to bloom stages / H. Waga [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2022. Vol. 201. 102738. EDN NHNQQN. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2021.102738>
11. Цхай Ж. Р., Шевченко Г. В. Особенности распределения концентрации хлорофилла *a* у восточного побережья Камчатки осенью 2020 года по спутниковым данным // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022. Т. 19, № 1. С. 226–238. EDN MWSZTP. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-226-238>
12. Nutrient flux under the influence of melt water runoff from volcanic territories and ecosystem response of Vilyuchinskaya and Avachinskaya Bays in Southeastern Kamchatka / P. Semkin [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023. Vol. 11, iss. 7. 1299. EDN LJIGFS. <https://doi.org/10.3390/jmse11071299>
13. Nutrient fluxes from the Kamchatka and Penzhina Rivers and their impact on coastal ecosystems on both sides of the Kamchatka Peninsula / P. Semkin [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, iss. 3. 569. EDN KZOVVC. <https://doi.org/10.3390/jmse13030569>
14. Study of abiotic factors controlling marine ecosystem dynamics and formation of anomalous conditions in coastal waters of the Far East in the 80th cruise of the R/V *Professor Gagarinskiy* / V. B. Lobanov [et al.] // *Oceanology*. 2023. Vol. 63, iss. 6. P. 931–933. EDN BVOOFR. <https://doi.org/10.1134/S0001437023060085>
15. Detection and analysis of the causes of intensive harmful Algal bloom in Kamchatka based on satellite data / V. Bondur [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, iss. 10. 1092. EDN GWZIDZ. <https://doi.org/10.3390/jmse9101092>
16. Harmful algal blooms on the eastern coast of Russia / T. Y. Orlova [et al.] // *Harmful algal blooms in the PICES region of the North Pacific* / eds. F. J. R. “Max” Taylor, V. L. Trainer. Sidney, Canada : PICES, 2002. P. 47–73. (PICES Scientific Report No. 23). EDN YMDWGP.
17. A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 / T. Y. Orlova [et al.] // *Harmful Algae*. 2022. Vol. 120. 102337. EDN XBQBLC. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2022.102337>
18. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters / G. E. Adjovu [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 7. 1938. EDN KWERBS. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
19. Bio-optical properties during the summer season in the Sea of Okhotsk / S. Takao [et al.] // *Progress in Oceanography*. 2014. Vol. 126. P. 233–241. EDN UUBNSH. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.010>
20. Первичная продукция Авачинской бухты летом 2017 г. / С. П. Захарков [и др.] // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2020. № 1. С. 83–89. EDN HDEUCJ. <https://doi.org/10.25808/08697698.2020.209.1.009>
21. Optical modeling of ocean waters: Is the Case 1 - Case 2 classification still useful? / C. D Mobley [et al.] // *Oceanography*. 2004. Vol. 17, no. 2. P. 60–67. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.48>
22. Watercolors in the coastal zone: What can we see? / O. Schofield [et al.] // *Oceanography*. 2004. Vol. 17, no. 2. P. 24–31. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2004.44>
23. Challenges of modeling depth-integrated marine primary productivity over multiple decades: A case study at BATS and HOT / V. S. Saba [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2010. Vol. 24, iss. 3. GB3020. EDN OLODMZ. <https://doi.org/10.1029/2009GB003655>

24. *Suslin V., Churilova T.* A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-*a* and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners // *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 37, iss. 18. P. 4380–4400. EDN WVFMHR. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
25. *Jeffrey S. W., Humphrey G. F.* New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*₁ and *c*₂ in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975. Vol. 167, iss. 2. P. 191–194. [https://doi.org/10.1016/S0015-3796\(17\)30778-3](https://doi.org/10.1016/S0015-3796(17)30778-3)
26. *Lorenzen C. J.* Determination of chlorophyll and phaeo-pigments: Spectrophotometric equations // *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12, iss. 2. P. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>
27. *Yentsch C. S.* Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean // *Limnology and Oceanography*. 1962. Vol. 7, iss. 2. P. 207–217. <https://doi.org/10.4319/lo.1962.7.2.0207>
28. *Mitchell B. G.* Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique // *Proceedings of SPIE*. Tomsk, 1990. Vol. 1302 : *Ocean Optics X*. P. 137–148. <https://doi.org/10.1117/12.21440>
29. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea / M. Kishino [et al.] // *Bulletin of Marine Science*. 1985. Vol. 37, no. 2. P. 634–642.
30. *Roesler C. S., Perry M. J.* In situ phytoplankton absorption, fluorescence emission, and particulate backscattering spectra determined from reflectance // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C7. P. 13279–13294. <https://doi.org/10.1029/95JC00455>
31. Correction of pathlength amplification in the filter-pad technique for measurements of particulate absorption coefficient in the visible spectral region / D. Stramski [et al.] // *Applied Optics*. 2015. Vol. 54, iss. 22. P. 6763–6782. EDN VGJHJR. <https://doi.org/10.1364/AO.54.006763>
32. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1995. Vol. 100, iss. C7. P. 13321–13332. <https://doi.org/10.1029/95JC00463>
33. *Morel A., Berthon J-F.* Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications // *Limnology and Oceanography*. 1989. Vol. 34, iss. 8. P. 1545–1562. <https://doi.org/10.4319/lo.1989.34.8.1545>
34. *Kirk J. T. O.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge University Press, 2010. EDN URYFWB. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139168212>
35. The Oceanic optics book / C. D. Mobley (ed.). Dartmouth, NS, Canada : International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 2022. 924 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1710>
36. *Brainerd K. E., Gregg M. C.* Surface mixed and mixing layer depths // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42, iss. 9. P. 1521–1543. EDN APZBIF. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00068-H](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00068-H)
37. Nitrogen- and irradiance-dependent variations of the maximum quantum yield of carbon fixation in eutrophic, mesotrophic and oligotrophic marine systems / M. Babin [et al.] // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1996. Vol. 43, iss. 8. P. 1241–1272. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(96\)00058-1](https://doi.org/10.1016/0967-0637(96)00058-1)
38. Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern methods / S. W. Jeffrey, R. F. C. Mantoura, S. W. Wright. UNESCO Publishing, 1997. 661 p.
39. The role of airborne volcanic ash for the surface ocean biogeochemical iron-cycle: a review / S. Duggen [et al.] // *Biogeosciences*. 2010. Vol. 7, iss. 3. P. 827–844. <https://doi.org/10.5194/bg-7-827-2010>
40. Phytoplankton distribution and survival in the thermocline / J. Sharples [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 2001. Vol. 46, iss. 3. P. 486–496. <https://doi.org/10.4319/lo.2001.46.3.0486>
41. Distribution and chromatic adaptation of phytoplankton within a shelf sea thermocline / A. E. Hickman [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 2009. Vol. 54, iss. 2. P. 525–536. <https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.2.0525>
42. *Cullen J. J.* The deep chlorophyll maximum: Comparing vertical profiles of chlorophyll *a* // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 1982. Vol. 39, iss. 5. P. 791–803. <https://doi.org/10.1139/f82-108>

43. *Finenko Z. Z., Churilova T. Ya., Lee R. I.* Dynamics of the vertical distributions of chlorophyll and phytoplankton biomass in the Black Sea // *Oceanology*. 2005. Vol. 45, Suppl. 1. P. 112–126. EDN LWLGOF.
44. *Loisel H., Stramski D.* Estimation of the inherent optical properties of natural waters from the irradiance attenuation coefficient and reflectance in the presence of Raman scattering // *Applied Optics*. 2000. Vol. 39, iss. 18. P. 3001–3011. <https://doi.org/10.1364/AO.39.003001>
45. О региональных алгоритмах восстановления концентрации хлорофилла А по данным сканера SeaWiFS для Охотского моря / М. С. Пермяков [и др.] // *Исследовано в России*. 2004. Т. 7. С. 972–981. EDN ZEKVFX.
46. *Ciotti Á. M., Lewis M. R., Cullen J. J.* Assessment of the relationships between dominant cell size in natural phytoplankton communities and the spectral shape of the absorption coefficient // *Limnology and Oceanography*. 2002. Vol. 47, iss. 2. P. 404–417. EDN LVCWDZ. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0404>
47. *Ras J., Claustre H., Uitz J.* Spatial variability of phytoplankton pigment distributions in the subtropical South Pacific Ocean: Comparison between in situ and predicted data // *Biogeosciences*. 2008. Vol. 5, iss. 2. P. 353–369. <https://doi.org/10.5194/bg-5-353-2008>
48. Light absorption properties and absorption budget of Southeast Pacific waters / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2010. Vol. 115, iss. C8. C08009. <https://doi.org/10.1029/2009JC005517>
49. *Chen B., Liu H.* Relationships between phytoplankton growth and cell size in surface oceans: Interactive effects of temperature, nutrients, and grazing // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55, iss. 3. P. 965–972. <https://doi.org/10.4319/lo.2010.55.3.0965>
50. *Roy S., Sathyendranath S., Platt T.* Retrieval of phytoplankton size from bio-optical measurements: theory and applications // *Journal of the Royal Society Interface*. 2011. Vol. 8, iss. 58. P. 650–660. <https://doi.org/10.1098/rsif.2010.0503>
51. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data / S. Roy [et al.] // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 139. P. 185–197. EDN RQVIKR. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.004>
52. *Ciotti Á. M., Cullen J. J., Lewis M. R.* A semi-analytical model of the influence of phytoplankton community structure on the relationship between light attenuation and ocean color // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1999. Vol. 104, iss. C1. P. 1559–1578. <https://doi.org/10.1029/1998JC900021>
53. *Morel A., Bricaud A.* Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton // *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*. 1981. Vol. 28, iss. 11. P. 1375–1393. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(81\)90039-X](https://doi.org/10.1016/0198-0149(81)90039-X)
54. In-vivo absorption properties of algal pigments / R. R. Bidigare [et al.] // *Proceedings of SPIE*. Tomsk, 1990. Vol. 1302 : Ocean Optics X. P. 290–302. <https://doi.org/10.1117/12.21451>
55. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations / A. Bricaud [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2004. Vol. 109, iss. C11. C11010. EDN WJVLDC. <https://doi.org/10.1029/2004JC002419>
56. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the Black Sea: Seasonality and parametrization / T. Churilova [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2017. Vol. 4. 90. EDN ZSKVJL. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00090>
57. Phytoplankton light absorption in the deep chlorophyll maximum layer of the Black Sea / T. Churilova [et al.] // *European Journal of Remote Sensing*. 2019. Vol. 52, suppl. 1. P. 123–136. EDN HVEVFX. <https://doi.org/10.1080/22797254.2018.1533389>
58. *Sosik H. M., Mitchell B. G.* Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 1995. Vol. 42, iss. 10. P. 1717–1748. EDN APXYNJ. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00081-g](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00081-g)
59. *Allali K., Bricaud A., Claustre H.* Spatial variations in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 1997. Vol. 102, iss. C6. P. 12413–12423. <https://doi.org/10.1029/97jc00380>

60. *Geider R. J., MacIntyre H. L., Kana T. M.* Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: Responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient limitation and temperature // *Marine Ecology Progress Series*. 1997. Vol. 148. P. 187–200. <https://doi.org/10.3354/meps148187>
61. Photoacclimation of photosynthesis irradiance response curves and photosynthetic pigments in microalgae and cyanobacteria / H. L. MacIntyre [et al.] // *Journal of Phycology*. 2002. Vol. 38, iss. 1. P. 17–38. EDN BAOKNB. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2002.00094.x>
62. *Flynn K. J.* Do we need complex mechanistic photoacclimation models for phytoplankton? // *Limnology and Oceanography*. 2003. Vol. 48, iss. 6. P. 2243–2249. <https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.6.2243>
63. Light absorption by optically active components in the Arctic Region (August 2020) and the possibility of application to satellite products for water quality assessment / T. Efimova [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 17. 4346. EDN QGPMMZ. <https://doi.org/10.3390/rs15174346>

Об авторах:

Чурилова Татьяна Яковлевна, ведущий научный сотрудник, лаборатория фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), ведущий научный сотрудник, лаборатория экологии и эволюционной биологии водных организмов Института Мирового океана (школы), ДВФУ (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), кандидат биологических наук, **ResearcherID: O-8437-2016, ORCID ID: 0000-0002-0045-7284, Scopus Author ID: 6603622802, SPIN-код: 2238-9533**, tanya.churilova@ibss-ras.ru

Скореход Елена Юрьевна, научный сотрудник, лаборатория фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т. Нахимова, д. 2), младший научный сотрудник, лаборатория экологии и эволюционной биологии водных организмов Института Мирового океана (школы), ДВФУ (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), **ResearcherID: A-6831-2019, ORCID ID: 0000-0002-3057-3964, Scopus Author ID: 57215009764, SPIN-код: 3314-5775**, elenaskorokhod@ibss-ras.ru

Моисеева Наталия Александровна, научный сотрудник, лаборатория фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т. Нахимова, д. 2), **ResearcherID: AAN-2819-2019, ORCID ID: 0000-0003-1356-7981, Scopus Author ID: 57194431032, SPIN-код: 8946-3315**, moiseeva@ibss-ras.ru

Бучельников Анатолий Сергеевич, ведущий научный сотрудник, лаборатория фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т Нахимова, д. 2), доцент, кафедра «физика», СевГУ (299053, Россия, г. Севастополь, ул. Университетская, 33), кандидат физико-математических наук, доцент, **ResearcherID: B-2280-2013, ORCID ID: 0000-0002-1853-4671, Scopus Author ID: 38661041800, SPIN-код: 4364-8832**, buchelnikov@ibss-ras.ru

Ефимова Татьяна Владимировна, старший научный сотрудник, лаборатория фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр-т. Нахимова, д. 2), старший научный сотрудник, лаборатория экологии и эволюционной биологии водных организмов Института Мирового океана (школы), ДВФУ (690922, Россия, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10), кандидат биологических наук, **ResearcherID: X-1355-2019, ORCID ID: 0000-0003-3908-4160, Scopus Author ID: 57194423783, SPIN-код: 1668-0742**, tefimova@ibss-ras.ru

Салюк Павел Анатольевич, заведующий лабораторией, лаборатория спутниковой океанологии и лазерного зондирования, ТОИ ДВО РАН (690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: E-8592-2014, ORCID ID: 0000-0002-3224-710X, Scopus Author ID: 9737122900, SPIN-код: 1454-3891**, pavel.salyuk@gmail.com

Яцук Андрей Вадимович, ведущий научный сотрудник, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, НТУ «Сириус» (354340, Россия, ФТ «Сириус», Олимпийский пр., д. 1), кандидат геолого-минералогических наук, **ResearcherID: I-3720-2017, ORCID ID: 0000-0003-3975-5438, Scopus Author ID: 55189937800, SPIN-код: 5704-5884**, yatsuk.av@talantiuspeh.ru

Приложение 1

Значения спектральных коэффициентов, полученных для зависимости между $a_{ph}(\lambda)$ и концентрацией хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$), описываемой степенным уравнением $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot (TChl-a)^{B(\lambda)}$, для верхнего квазиоднородного слоя (UML), коэффициент детерминации (r^2)

Values of spectral coefficients obtained for the relationship between $a_{ph}(\lambda)$ and $TChl-a$ described by the power equation $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot (TChl-a)^{B(\lambda)}$ for the upper mixed layer (UML); determination coefficient (r^2)

λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2	λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2
400	0,038	0,702	0,775	402	0,040	0,700	0,776
404	0,041	0,699	0,781	406	0,042	0,696	0,787
408	0,044	0,694	0,788	410	0,045	0,692	0,796
412	0,047	0,690	0,798	414	0,048	0,687	0,800
416	0,049	0,684	0,803	418	0,050	0,683	0,804
420	0,051	0,683	0,807	422	0,051	0,691	0,802
424	0,052	0,683	0,798	426	0,053	0,682	0,802
428	0,054	0,685	0,808	430	0,055	0,684	0,809
432	0,056	0,688	0,815	434	0,057	0,687	0,813
436	0,058	0,687	0,814	438	0,059	0,684	0,811
440	0,058	0,685	0,812	442	0,058	0,682	0,811
444	0,056	0,684	0,810	446	0,055	0,680	0,804
448	0,054	0,680	0,801	450	0,053	0,678	0,794
452	0,052	0,679	0,792	454	0,052	0,677	0,787
456	0,051	0,679	0,788	458	0,051	0,677	0,785
460	0,051	0,676	0,784	462	0,051	0,675	0,782
464	0,051	0,675	0,781	466	0,051	0,670	0,775
468	0,050	0,667	0,770	470	0,050	0,665	0,766
472	0,049	0,660	0,760	474	0,048	0,659	0,757
476	0,047	0,656	0,752	478	0,046	0,656	0,752
480	0,045	0,655	0,751	482	0,043	0,659	0,758
484	0,042	0,664	0,763	486	0,041	0,669	0,771
488	0,039	0,680	0,784	490	0,038	0,688	0,792
492	0,036	0,701	0,803	494	0,035	0,713	0,813
496	0,033	0,726	0,821	498	0,031	0,740	0,830
500	0,029	0,751	0,834	502	0,028	0,763	0,840
504	0,026	0,777	0,846	506	0,024	0,789	0,850
508	0,023	0,799	0,851	510	0,022	0,809	0,853
512	0,021	0,821	0,857	514	0,019	0,831	0,860
516	0,018	0,839	0,861	518	0,018	0,848	0,864
520	0,017	0,859	0,867	522	0,016	0,867	0,870
524	0,015	0,876	0,871	526	0,015	0,883	0,874
528	0,014	0,890	0,877	530	0,013	0,898	0,880
532	0,013	0,903	0,882	534	0,012	0,908	0,885
536	0,012	0,912	0,887	538	0,011	0,916	0,888
540	0,011	0,919	0,891	542	0,010	0,923	0,894
544	0,010	0,926	0,895	546	0,009	0,930	0,897

λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2	λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2
548	0,009	0,931	0,897	550	0,009	0,935	0,898
552	0,008	0,937	0,899	554	0,008	0,941	0,899
556	0,007	0,944	0,900	558	0,007	0,946	0,899
560	0,006	0,947	0,897	562	0,006	0,956	0,899
564	0,006	0,954	0,894	566	0,005	0,955	0,892
568	0,005	0,955	0,889	570	0,005	0,953	0,888
572	0,005	0,954	0,884	574	0,005	0,954	0,882
576	0,005	0,953	0,880	578	0,005	0,950	0,875
580	0,005	0,950	0,872	582	0,005	0,943	0,867
584	0,005	0,940	0,861	586	0,005	0,936	0,856
588	0,005	0,929	0,848	590	0,005	0,924	0,841
592	0,005	0,918	0,835	594	0,005	0,914	0,830
596	0,005	0,908	0,829	598	0,005	0,900	0,826
600	0,005	0,896	0,830	602	0,005	0,893	0,836
604	0,005	0,893	0,841	606	0,005	0,894	0,851
608	0,005	0,900	0,861	610	0,005	0,905	0,871
612	0,005	0,910	0,875	614	0,005	0,916	0,884
616	0,005	0,922	0,892	618	0,005	0,926	0,896
620	0,005	0,927	0,901	622	0,006	0,927	0,903
624	0,006	0,928	0,905	626	0,006	0,929	0,903
628	0,006	0,927	0,901	630	0,006	0,921	0,900
632	0,006	0,914	0,901	634	0,007	0,903	0,898
636	0,007	0,894	0,894	638	0,007	0,879	0,890
640	0,007	0,867	0,883	642	0,007	0,849	0,877
644	0,007	0,833	0,872	646	0,008	0,821	0,869
648	0,008	0,814	0,876	650	0,008	0,817	0,884
652	0,008	0,829	0,892	654	0,008	0,840	0,895
656	0,008	0,854	0,896	658	0,009	0,859	0,891
660	0,011	0,861	0,889	662	0,013	0,855	0,888
664	0,015	0,851	0,890	666	0,017	0,846	0,894
668	0,019	0,844	0,900	670	0,021	0,843	0,906
674	0,023	0,847	0,920	672	0,023	0,844	0,913
676	0,023	0,852	0,926	678	0,022	0,860	0,931
680	0,020	0,870	0,935	682	0,017	0,894	0,938
684	0,014	0,924	0,939	686	0,011	0,958	0,936
688	0,008	0,999	0,921	690	0,006	1,038	0,896
692	0,004	1,070	0,858	694	0,003	1,087	0,819
696	0,002	1,092	0,788	698	0,002	1,081	0,761
700	0,001	1,060	0,751				

Приложение 2

Значения спектральных коэффициентов, полученных для зависимости между $a_{ph}(\lambda)$ и концентрацией хлорофилла a в сумме с феопигментами ($TChl-a$), описываемой степенным уравнением $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot (TChl-a)^{B(\lambda)}$, для слоя Z_{UML} – оптическая глубина 4,6, коэффициент детерминации (r^2)

Values of spectral coefficients obtained for the relationship between $a_{ph}(\lambda)$ and $TChl-a$ described by the power equation $a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot (TChl-a)^{B(\lambda)}$ for the layer Z_{UML} – optical depth 4.6; determination coefficient (r^2)

λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2	λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2
400	0,032	0,740	0,834	402	0,033	0,732	0,827
404	0,034	0,731	0,830	406	0,035	0,729	0,825
408	0,037	0,726	0,822	410	0,038	0,728	0,822
412	0,039	0,721	0,816	414	0,040	0,719	0,815
416	0,041	0,717	0,812	418	0,041	0,715	0,811
420	0,042	0,713	0,808	422	0,042	0,721	0,812
424	0,042	0,721	0,810	426	0,043	0,720	0,807
428	0,044	0,719	0,801	430	0,045	0,721	0,798
432	0,046	0,717	0,791	434	0,047	0,719	0,791
436	0,047	0,717	0,784	438	0,048	0,714	0,782
440	0,047	0,718	0,781	442	0,047	0,715	0,781
444	0,046	0,709	0,775	446	0,046	0,705	0,773
448	0,045	0,702	0,768	450	0,044	0,703	0,767
452	0,044	0,699	0,762	454	0,043	0,697	0,760
456	0,043	0,698	0,760	458	0,043	0,692	0,755
460	0,043	0,692	0,755	462	0,043	0,689	0,752
464	0,044	0,684	0,746	466	0,044	0,679	0,741
468	0,043	0,676	0,738	470	0,043	0,670	0,731
472	0,043	0,666	0,728	474	0,042	0,660	0,722
476	0,041	0,657	0,721	478	0,040	0,658	0,721
480	0,039	0,656	0,721	482	0,038	0,660	0,726
484	0,037	0,664	0,731	486	0,036	0,670	0,738
488	0,035	0,677	0,748	490	0,034	0,684	0,755
492	0,032	0,693	0,764	494	0,031	0,703	0,772
496	0,030	0,712	0,780	498	0,028	0,721	0,787
500	0,027	0,729	0,794	502	0,026	0,738	0,802
504	0,025	0,744	0,807	506	0,024	0,750	0,812
508	0,022	0,758	0,818	510	0,022	0,762	0,822
512	0,021	0,770	0,828	514	0,020	0,776	0,834
516	0,019	0,780	0,838	518	0,018	0,785	0,844
520	0,018	0,792	0,849	522	0,017	0,796	0,853
524	0,016	0,801	0,858	526	0,016	0,809	0,863
528	0,015	0,813	0,869	530	0,015	0,821	0,874
532	0,014	0,826	0,879	534	0,013	0,829	0,884
536	0,013	0,835	0,886	538	0,012	0,836	0,890
540	0,012	0,842	0,894	542	0,011	0,846	0,895
544	0,011	0,849	0,897	546	0,010	0,856	0,898

λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2	λ , нм / λ , nm	$A(\lambda)$	$B(\lambda)$	r^2
548	0,010	0,857	0,898	550	0,009	0,860	0,897
552	0,009	0,864	0,896	554	0,009	0,865	0,895
556	0,008	0,868	0,895	558	0,008	0,873	0,893
560	0,007	0,873	0,888	562	0,007	0,872	0,889
564	0,007	0,870	0,887	566	0,006	0,868	0,882
568	0,006	0,865	0,878	570	0,006	0,859	0,874
572	0,006	0,857	0,865	574	0,006	0,860	0,864
576	0,006	0,858	0,858	578	0,006	0,859	0,849
580	0,006	0,859	0,846	582	0,005	0,859	0,840
584	0,006	0,853	0,830	586	0,006	0,854	0,824
588	0,006	0,848	0,811	590	0,006	0,845	0,802
592	0,006	0,841	0,795	594	0,005	0,839	0,792
596	0,005	0,835	0,794	598	0,005	0,832	0,797
600	0,005	0,833	0,806	602	0,005	0,830	0,815
604	0,005	0,831	0,825	606	0,005	0,839	0,840
608	0,005	0,842	0,849	610	0,005	0,849	0,860
612	0,005	0,856	0,870	614	0,005	0,864	0,878
616	0,005	0,870	0,884	618	0,006	0,874	0,890
620	0,006	0,878	0,894	622	0,006	0,882	0,897
624	0,006	0,881	0,897	626	0,006	0,884	0,896
628	0,006	0,880	0,893	630	0,006	0,875	0,890
632	0,006	0,864	0,891	634	0,007	0,857	0,889
636	0,007	0,849	0,889	638	0,007	0,842	0,885
640	0,007	0,835	0,881	642	0,007	0,823	0,877
644	0,007	0,813	0,877	646	0,007	0,809	0,883
648	0,007	0,808	0,889	650	0,007	0,812	0,897
652	0,007	0,824	0,901	654	0,008	0,832	0,898
656	0,008	0,841	0,893	658	0,009	0,844	0,886
660	0,011	0,837	0,879	662	0,013	0,828	0,879
664	0,015	0,817	0,880	666	0,017	0,810	0,887
668	0,019	0,806	0,897	670	0,021	0,804	0,907
672	0,022	0,808	0,915	674	0,022	0,816	0,919
676	0,022	0,827	0,918	678	0,020	0,842	0,914
680	0,018	0,860	0,908	682	0,016	0,884	0,902
684	0,013	0,920	0,894	686	0,010	0,959	0,883
688	0,007	1,010	0,868	690	0,005	1,062	0,845
692	0,004	1,108	0,812	694	0,003	1,133	0,786
696	0,002	1,126	0,760	698	0,002	1,092	0,745
700	0,002	1,041	0,729				