

Сравнительная оценка биооптических показателей вод в акваториях с различным трофическим статусом

Т. Я. Чурилова¹, ✉, Т. В. Ефимова¹, Н. А. Моисеева¹,
Е. Ю. Скороход¹, Д. В. Калмыкова¹, И. А. Суторихин²,
В. В. Кириллов²

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

² Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

✉ tanya.churilova@ibss-ras.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024; одобрена после рецензирования 06.04.2024;
принята к публикации 16.05.2024.

Аннотация

Цель. Для развития региональных спутниковых алгоритмов требуется информация о биооптических показателях вод конкретной акватории. Настоящие исследования были нацелены на сравнительный анализ биооптических показателей вод, различающихся по оптическим характеристикам и трофическому статусу.

Методы и результаты. В работе объединены результаты измерений спектральных биооптических показателей вод Черного, Азовского, Баренцева и Норвежского морей, Северного Ледовитого океана, Южного океана (Атлантический сектор), Байкала и Телецкого озера. Спектральные показатели поглощения света пигментами фитопланктона, неживым взвешенным и окрашенным растворенным органическим веществом измеряли в соответствии с современными протоколами *International Ocean Colour Coordinating Group*. Районы исследования включали акватории с уровнем трофности от олиготрофного до эвтрофного (значения концентрации хлорофилла *a* в поверхностных водах варьировали от 0,066 до 24 мг·м⁻³) и с высокой неоднородностью по биооптическим характеристикам: значения показателя суммарного поглощения света взвешенным и растворенным органическим веществом (за исключением воды) на длине волны 438 нм изменялись от 0,021 до 0,97 м⁻¹.

Выводы. Во всех районах отмечена высокая (в пределах порядка и более) пространственная изменчивость значений показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды и их соотношений, что свидетельствует об оптической контрастности вод в каждом из исследованных регионов. Показана региональная специфичность коэффициентов параметризации поглощения света пигментами фитопланктона, неживым взвешенным и окрашенным растворенным органическим веществом. Установленные коэффициенты параметризации поглощения света оптически активными компонентами среды могут быть использованы для развития региональных спутниковых алгоритмов оценки показателей качества и продуктивности вод. На основе эмпирически установленных зависимостей были предложены дополнительные показатели качества водной среды – глубина зоны фотосинтеза и характеристика спектрального состава света в море, которые могут восстанавливаться по спутниковым данным.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, поглощение света, пигменты фитопланктона, неживое взвешенное вещество, растворенное органическое вещество, Черное море, Азовское море, Баренцево море, Норвежское море, Северный Ледовитый океан, Южный океан, озеро Байкал, Телецкое озеро

Благодарности: исследование выполнено в рамках темы госзадания №124030100106-2 «Исследование региональных особенностей биооптических показателей водоемов как основы дешифрования данных дистанционного зондирования для оценки мультимасштабной изменчивости первично продукционных характеристик пелагических экосистем». Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные рекомендации и замечания.

Для цитирования: Сравнительная оценка биооптических показателей вод в акваториях с различным трофическим статусом / Т. Я Чурилова [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2024. Т. 40, № 4. С. 556–575. EDN OBGXYK.

Original article

Comparison of Bio-Optical Properties of Optically Complex Waters with Different Trophic Status

T. Ya. Churilova^{1, ✉}, T. V. Efimova¹, N. A. Moiseeva¹,
E. Yu. Skorokhod¹, D. V. Kalmykova¹, I. A. Sutorikhin²,
V. V. Kirillov²

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

² Institute for Water and Environmental Problems of SB of Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

✉ e-mail: tanya.churilova@ibss-ras.ru

Abstract

Purpose. Development of regional satellite algorithms requires the information on bio-optical properties of a particular water area. The present study is aimed at comparative analyzing the bio-optical properties of optically complex waters differing in their trophic status.

Methods and Results. The study combined the results of measuring the spectral bio-optical properties in the waters of the Black, Azov, Barents and Norwegian seas, the Arctic and Southern oceans (Atlantic sector), and the Baikal and Teletskoye lakes. Spectral coefficients of light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter were measured in accordance with the *International Ocean Colour Coordinating Group* Protocols. The study areas included the waters with trophic levels from the oligotrophic to eutrophic ones (the chlorophyll *a* concentrations in the surface layers varied from 0.066 to 24 mg·m⁻³), and with high heterogeneity in their bio-optical properties: the total non-water light absorption at the wavelength 438 nm varied from 0.021 to 0.97 m⁻¹.

Conclusions. In all the regions, a high (within an order of magnitude or higher) spatial variability in the values of light absorption coefficients by all the optically active components and their ratios was noted. This fact indicates the optical complexity of waters in each of the regions under study. The regional specificity of parameterization coefficients for light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter was shown. The revealed parameterization coefficients for light absorption by the optically active components can be used to develop the regional satellite algorithms for assessing water quality and productivity indicators. Based on the empirically revealed dependencies, the following additional indicators of water quality were proposed: the euphotic zone depth and the spectral characteristics of downwelling irradiance which can be retrieved based on remote sensing data.

Keywords: chlorophyll *a*, light absorption, phytoplankton, non-algal particles, colored dissolved organic matter, Black Sea, Sea of Azov, Barents Sea, Norwegian Sea, Arctic Ocean, Southern Ocean, Lake Baikal, Lake Teletskoye

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the state assignment theme No. 124030100106-2 “Study of regional features of bio-optical properties of water bodies as a basis for decoding remote sensing data to assess multi-scale variability of primary production characteristics of pelagic ecosystems”. The authors are grateful to the reviewers for their useful recommendations and comments.

For citation: Churilova, T.Ya., Efimova, T.V., Moiseeva, N.A., Skorokhod, E.Yu., Kalmykova, D.V., Sutorikhin, I.A. and Kirillov, V.V., 2024. Comparison of Bio-Optical Properties of Optically Complex Waters with Different Trophic Status. *Physical Oceanography*, 31(4), pp. 507-526.

Введение

В условиях изменяющегося климата [1] и возрастающего негативного воздействия человеческой деятельности на природу вопросы оперативного контроля за состоянием водных экосистем и прогнозирования их изменений под воздействием естественных и антропогенных факторов становятся все более актуальными [2, 3]. Дистанционное зондирование Мирового океана из космоса предоставляет уникальную возможность мультимасштабной регистрации параметров водной среды и мониторинга состояния морских акваторий [4, 5]. Однако до настоящего времени полная реализация уникального потенциала данных дистанционного зондирования ограничена возможностями биооптических алгоритмов, стандартные решения которых не обеспечивают корректных оценок показателей качества и продуктивности вод на глобальных масштабах [6], что связано с высокой неоднородностью мирового океана по биооптическим показателям вод [7–9].

Воды, относящиеся ко второму типу по оптической классификации [7], для которых типично высокое содержание неживого взвешенного вещества (*NAP*) и окрашенного растворенного органического вещества (*CDOM*), а также отсутствие корреляции между содержанием хлорофилла *a* (маркер биомассы фитопланктона – третьего оптически активного компонента), являются наиболее сложными для решения задачи трансформации спутникового сигнала в первичные гидрооптические характеристики вод [8, 9]. Для Черного моря (воды 2-го типа [10]) разработан трехканальный алгоритм *Chl-CDM* [11], который обеспечивает точное восстановление первичных гидрооптических характеристик вод Черного моря [12]. Этот алгоритм может быть адаптирован для других водоемов РФ, а также для полярных регионов Мирового океана, которые представляют политический и экономический интерес для нашей страны. Для адаптации *Chl-CDM* алгоритма к другим акваториям требуются эмпирически установленные закономерности изменчивости биооптических показателей вод, в частности параметризация поглощения света всеми оптически активными компонентами среды (фитопланктоном, *NAP* и *CDOM*), оценка вклада каждого компонента в баланс поглощения света на разных длинах волн.

Биооптические исследования, выполненные на современном методологическом и технологическом уровне в разных районах Мирового океана (Азово-Черноморский бассейн, Арктика, Антарктика и озера Байкал и Телецкое) [13–19], позволяют объединить результаты, полученные в водах с разным уровнем трофности (трофическим статусом) и составом оптически активных компонентов среды (оптические характеристики). Трофический статус вод определяется на основании показателей продуктивности: концентрации хлорофилла *a* и пер-

вичной продукции. Азовское море относится к высокотрофному водоему с характерным высоким содержанием фитопланктона, большими значениями концентрации хлорофилла *a* и высокой первичной продукцией [20]. Воды открытой части Черного моря относят к мезотрофным водам [21]. Прибрежные воды Черного моря подвержены влиянию берегового и речного стока и поэтому характеризуются высокой неоднородностью по показателям продуктивности [22], что сопровождается изменением уровня трофности от мезотрофного до эвтрофного. В водах Атлантического сектора Южного океана отмечается уникальная ситуация – высокое содержание биогенных элементов, но при этом низкая концентрация хлорофилла *a* [23], что дает основание сделать вывод об олиготрофности вод в этом районе. Воды Европейского сектора Арктики (Норвежское и Баренцево моря, Северный Ледовитый океан) относятся в большей части (а именно воды Северного Ледовитого океана) к олиготрофным [24, 25]. Воды озера Байкал – уникального прозрачного водоема – относятся к олиготрофным водам. Высокотрофные воды Телецкого озера подвержены интенсивному береговому и речному стоку, что определяет экологическое состояние вод и их оптические свойства [26].

Цель настоящих исследований состоит в обобщении полученных результатов и сравнительном анализе биооптических показателей вод с различным трофическим статусом.

Методы

В работе обобщены данные, полученные в разных районах Мирового океана (рис. 1):

1) в Норвежском море, Баренцевом море, Северном Ледовитом океане – рейс № 80 НИС «Академик Мстислав Келдыш» (август 2020 г.);

2) Атлантическом секторе Южного океана – рейс № 79 НИС «Академик Мстислав Келдыш» (январь – февраль 2020 г.);

3) Черном море, прибрежных водах Крымского полуострова – рейсы № 106 (апрель – май 2019 г.) и № 113 (июнь 2020 г.) НИС «Профессор Водяницкий», регулярный еженедельный биооптический мониторинг на МНИС «Виктория» (период с 2009 по 2022 г.);

4) Черном море, глубоководном районе – рейс № 122 НИС «Профессор Водяницкий» (июнь 2022 г.);

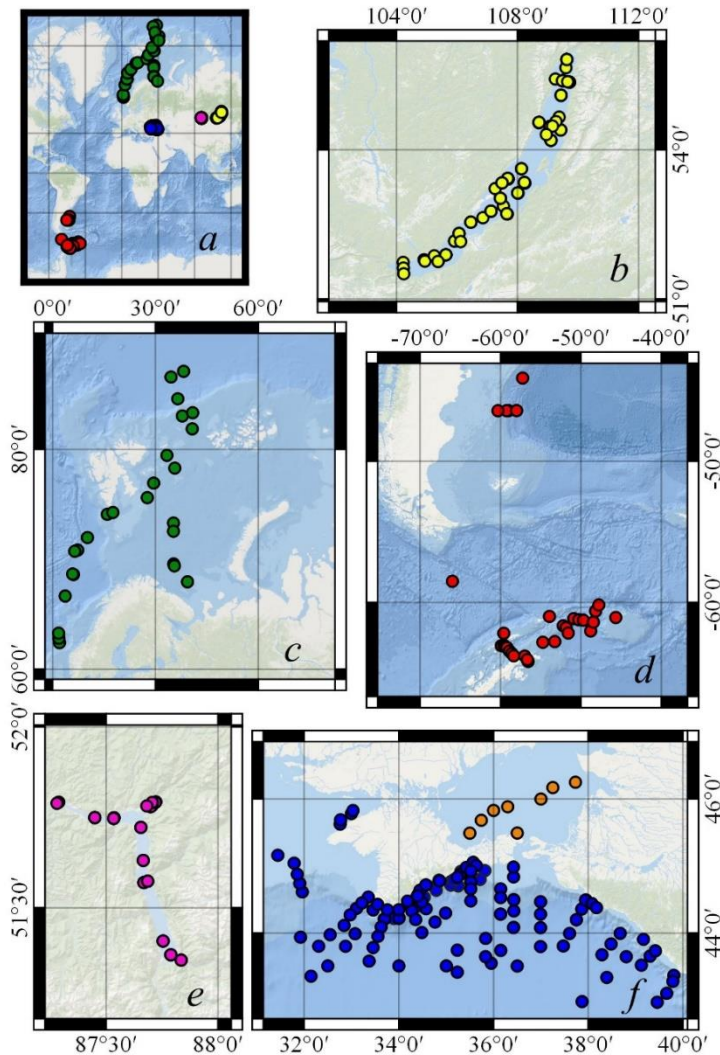
5) Азовском море – научные экспедиции на НИС «Профессор Водяницкий», выполненные в разные сезоны года (период с 2016 по 2020 г.);

6) на озере Байкал – экспедиции на НИС «Г. Ю. Верещагин» (июль 2018 г.) и на НИС «Г. Титов» (сентябрь 2019 г.);

7) на Телецком озере – экспедиция на НИС ИВЭП СО РАН № 209 (тип «Ярославец») (август 2022 г.).

Пробы воды отбирались с помощью кассеты батометров или одиночным батометром (*GO-Flo bottles*). Концентрацию хлорофилла *a* в сумме с феопигментами (*TChl-a*) определяли спектрофотометрическим методом [27, 28]. Пробы воды фильтровали через стекловолокнистые фильтры (*Whatman GF/F*) при вакууме не более 0,2 атм. Фильтры со взвесью складывали, заворачивали в фольгу и хранили в сжиженном азоте до измерений в лаборатории. Пигменты экстрагировали 90%-ным водным раствором ацетона (5 мл) с использованием

для полноты экстракции двухступенчатого подхода и виброгомогенизатора. Пробирки с ацетоновыми экстрактами пигментов хранили в холодильнике (+8 °С) в течение 18 ч. Экстракты пигментов осветляли осаждением взвеси центрифугированием в течение 5 минут (при центробежном ускорении 5000 g). Оптическую плотность (англ. *optical density*, *OD*) ацетоновых экстрактов пигментов определяли на двухлучевом спектрометре *Lambda 35* (*PerkinElmer*).



Р и с. 1. Расположение станций (обозначены цветными кружками) в исследуемых районах Мирового океана (*a*); увеличенное изображение исследуемых районов: *b* – озеро Байкал (желтый цвет), *c* – Баренцева, Норвежского морей и Северного Ледовитого океана (зеленый цвет), *d* – Атлантического сектора Южного океана (красный цвет), *e* – Телецкого озера (лиловый цвет), *f* – Черного (синий цвет) и Азовского (коричневый цвет) морей

Fig. 1. Location of stations (marked with colored circles) in the study areas of the World Ocean (*a*); enlarged image of the study areas: *b* – Lake Baikal (yellow), *c* – Barents and Norwegian seas, and Arctic Ocean (green), *d* – Atlantic sector of the Southern Ocean (red), *e* – Lake Teletskoye (purple), *f* – Black (blue) and Azov (brown) seas

Спектральные показатели поглощения света всеми оптически активными компонентами (ОАК) среды: пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$), неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) и окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(\lambda)$) – измеряли в соответствии с современными протоколами [29, 30] с использованием двухлучевого спектрофотометра *Lambda 35* (*PerkinElmer*), оснащенного интегрирующей сферой. Методология определения $a_p(\lambda)$, $a_{ph}(\lambda)$, $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$ детально описана в статье [17].

Параметризацию поглощения света всеми оптически активными компонентами среды проводили в соответствии с современными подходами [31, 32]. Параметризация поглощения света пигментами фитопланктона направлена на получение связи между $a_{ph}(\lambda)$ и *TChl-a*. Хлорофилл *a* является основным фотосинтетически активным пигментом, что определяет его экологическую значимость и объясняет его использование при анализе вариабельности $a_{ph}(\lambda)$, несмотря на то что поглощение света фитопланктоном связано не только с хлорофиллом *a*, а со всем комплексом пигментов, отличающихся по своему функциональному назначению [33, 34]. Для описания зависимости между $a_{ph}(\lambda)$ и *TChl-a* использовали степенную функцию [31]:

$$a_{ph}(\lambda) = A(\lambda) \cdot TChl-a^{(B(\lambda))}. \quad (1)$$

Коэффициенты $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ определяли методом наименьших квадратов с использованием логарифмической формы уравнения (1).

Спектры показателей поглощения света *NAP* и *CDOM* имеют экспоненциальную форму [35]. Параметризация поглощения света *NAP* и *CDOM* нацелена на определение параметров уравнения, которое описывает формы спектров $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$ [32]:

$$a_i(\lambda) = a_i(\lambda_r) \cdot e^{(-S_i \cdot (\lambda - \lambda_r))}, \quad (2)$$

где i обозначает *NAP* или *CDOM*; длина волны λ_r – это выбранная длина волны (в наших исследованиях использовали 438 нм); S_i обозначает спектральный наклон S_{NAP} или S_{CDOM} .

Спектральный наклон S_{NAP} определяли в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм. Показатель S_{CDOM} , значение которого изменяется в зависимости от выбранного волнового диапазона [36], определяли в диапазоне длин волн от 350 до 500 нм, который используется в большинстве исследований [32, 37], что позволяет проводить сравнительную оценку полученных значений, используя литературные данные.

Вклад фитопланктона, *NAP* и *CDOM* в общее поглощение света взвешенным и растворенным органическим веществом, за исключением воды (a_{tot-w}), оценивали на отдельных длинах волн, выбранных исходя из их значимости: 1) на длине волны 438 нм, которая является физиологически значимой для фитопланктона в связи с тем, что на этой длине волны поглощение света пигментами фитопланктона максимально в пределах видимого диапазона излучения (400–700 нм); 2) на длине волны 490 нм, которая соответствует спектральному каналу оптических сканеров (*SeaWiFS*, *MERIS*, *MODIS*, *VIIRS*, *OLCI*) и ис-

пользуется в разработанном трехканальном алгоритме *Chl-CDM* оценки концентрации хлорофилла *a* по данным дистанционного зондирования Земли из космоса [11].

Спектры подводной облученности $E_d(\lambda)$ (нисходящее излучение) измеряли с шагом в 1 м в пределах освещенного слоя вод с помощью погружного спектрорадиометра *RAMSES (TrioOS, Germany)* или моделировали [38] с использованием в качестве входных параметров результатов измерения спектральных биооптических показателей вод [38]. Значения фотосинтетически активной радиации (ФАР) получали в результате интегрирования $E_d(\lambda)$ в пределах видимого диапазона излучения (400–700 нм). Глубину зоны фотосинтеза (Z_{eu}) оценивали по глубине проникновения 1 % от значения ФАР, падающей на поверхность водоема. Первую оптическую глубину (1_{opt}) определяли в соответствии с формулой [35]

$$1_{opt} = Z_{eu}/4,6.$$

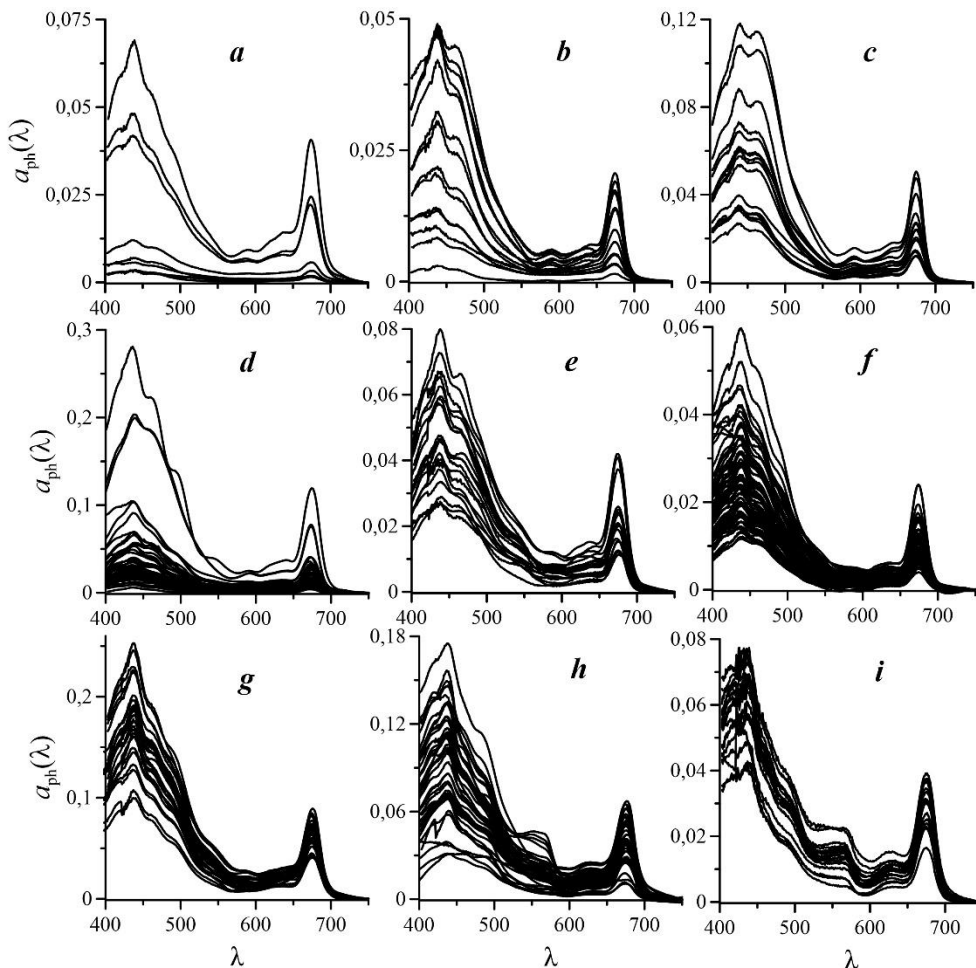
В качестве характеристики спектральных свойств солнечного излучения, проникающего в водную толщу, использовали длину волны максимума спектра $E_d(\lambda)$ (λ_{max}).

Результаты и обсуждение

Спектры показателей $a_{ph}(\lambda)$, $a_{NAP}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$, измеренные в поверхностном слое вод, соответствующем слою 1_{opt} , показаны на рис. 2–4. В Азовском море отмечена высокая (в пределах порядка) вариабельность всех исследованных показателей. Значение *TChl-a* в поверхностном слое моря изменялось в течение года в диапазоне от 1,7 до 22 мг·м⁻³. Установлена зависимость между показателями поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) на отдельных длинах волн и *TChl-a* (табл. 1), которая описана степенной функцией (уравнение (1)). Установлены сезонные различия между значениями коэффициента $A(\lambda)$ (уравнение (1)), наиболее выраженные в синем диапазоне спектра (почти двукратные различия) [19], что обусловлено изменением степени упаковки пигментов в клетках фитопланктона [39] в связи с адаптацией фитопланктона к изменениям условий среды в течение года, которая приводит к изменению состава и концентрации пигментов в клетках [40].

Анализ вариабельности показателей поглощения света *NAP* ($a_{NAP}(\lambda)$) и *CDOM* ($a_{CDOM}(\lambda)$) показал высокую (в пределах порядка) изменчивость $a_{NAP}(438)$ (0,036–0,58 м⁻¹) и $a_{CDOM}(438)$ (0,083–0,54 м⁻¹). Установлено, что поглощение света *CDOM* не коррелировало с *TChl-a*. Значения спектральных наклонов S_{NAP} и S_{CDOM} варьировали в диапазоне от 0,0080 до 0,014 нм⁻¹ (0,010 ± 0,0015 нм⁻¹) и от 0,014 до 0,024 нм⁻¹ (0,018 ± 0,0024 нм⁻¹) (табл. 2) соответственно. Установлена связь между S_{CDOM} и $a_{CDOM}(\lambda)$, описанная степенным уравнением (табл. 3). Аналогичная зависимость получена для показателя суммарного поглощения света *NAP* и *CDOM* ($a_{CDM}(\lambda)$) (табл. 3). Значение $a_{tot-w}(438)$ варьировало в пределах от 0,31 до 0,68 и в среднем составляло 0,61 ± 0,45 м⁻¹ (табл. 2). Относительный вклад фитопланктона в $a_{tot-w}(438)$ изменялся от 7 % весной и осенью до 51 % зимой (в январе) и достигал 70 %

летом (в июле). Вклад $CDOM$ и NAP в $a_{tot-w}(438)$ варьировал в пределах от 13 до 76 % и от 10 до 52 % соответственно.

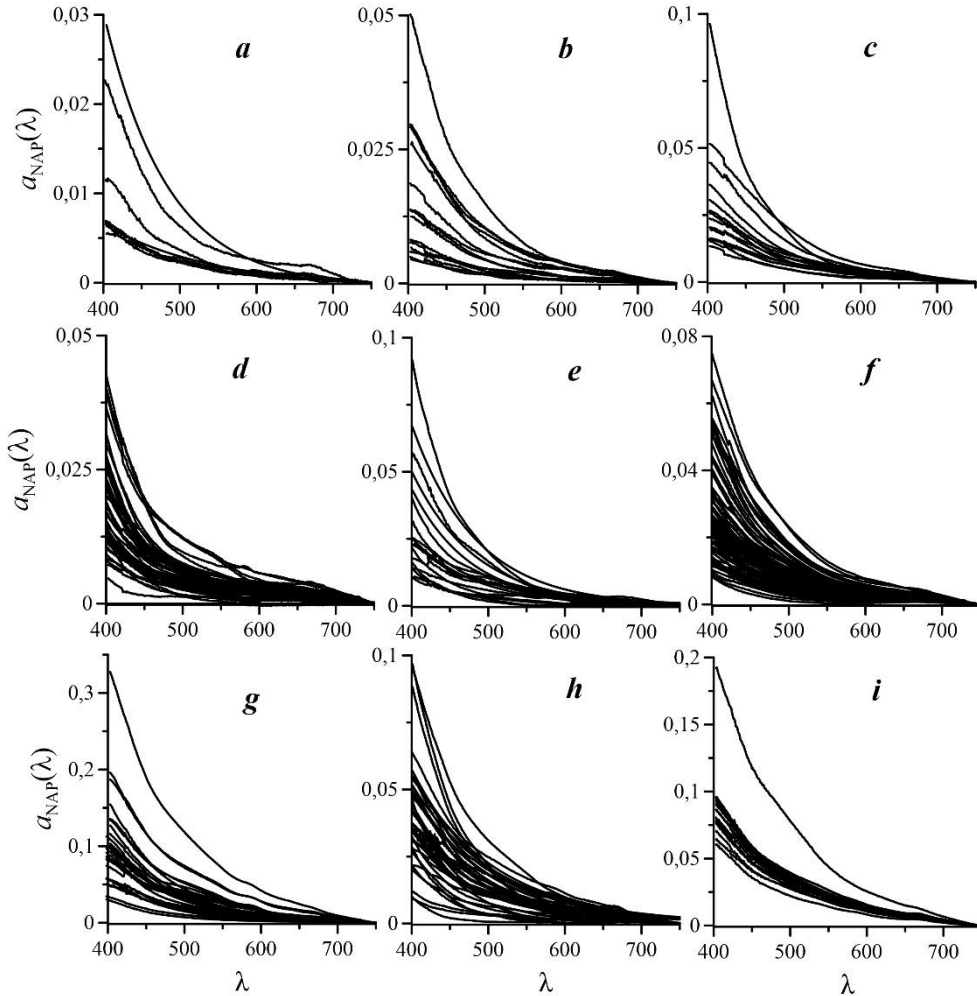


Р и с. 2. Спектры показателей поглощения света пигментами фитопланктона ($a_{ph}(\lambda)$) в поверхностном слое вод Северного Ледовитого океана (a), Баренцева моря (b), Норвежского моря (c), Атлантического сектора Южного океана (d), Черного моря зимой (e) и летом (f), Азовского моря (g), озера Байкал (h), Телецкого озера (i)

Fig. 2. Spectra of light absorption coefficients by phytoplankton ($a_{ph}(\lambda)$) in the surface layers of the Arctic Ocean (a), the Barents (b) and Norwegian (c) seas, Atlantic sector of the Southern Ocean (d), the Black Sea in winter (e) and summer (f), the Sea of Azov (g), and the Baikal (h) and Teletskoye (i) lakes

Прибрежные воды в Севастопольской бухте различались по трофическому статусу. В поверхностном слое (l_{opt}) отмечен высокий диапазон варируемости $TChl-a$ (от 0,19 до 5,6 мг m^{-3}). Значения показателей $a_{ph}(\lambda)$ и $a_{NAP}(\lambda)$ изменялись тоже на порядок. В отличие от взвешенного вещества, для $CDOM$ отмечена меньшая изменчивость показателей поглощения света (табл. 2). Связи между $a_{CDOM}(\lambda)$ и $TChl-a$ не наблюдалось. Установлено, что связь

между $TChl-a$ и $a_{ph}(\lambda)$ отражает единообразие зависимости (в уравнении (1)) в широком диапазоне тропности вод [13]. При этом выявлены сезонные различия между значениями коэффициента A в уравнении (1) для $a_{ph}(\lambda)$ на отдельных длинах волн (табл. 1), что подчеркивает преобладающее влияние условий среды (преимущественно освещенности) на значения удельных (нормированных на $TChl-a$) показателей поглощения света пигментами фитопланктона.



Р и с. 3. Спектры показателей поглощения света неживым взвешенным веществом ($a_{NAP}(\lambda)$) в поверхностном слое вод Северного Ледовитого океана (*a*), Баренцева моря (*b*), Норвежского моря (*c*), Атлантического сектора Южного океана (*d*), Черного моря зимой (*e*) и летом (*f*), Азовского моря (*g*), озера Байкал (*h*), Телецкого озера (*i*)

F i g. 3. Spectra of light absorption coefficients by non-algal particles ($a_{NAP}(\lambda)$) in the surface layers of the Arctic Ocean (*a*), the Barents (*b*) and Norwegian (*c*) seas, Atlantic sector of the Southern Ocean (*d*), the Black Sea in winter (*e*) and summer (*f*), the Sea of Azov (*g*), and the Baikal (*h*) and Teletskoye (*i*) lakes

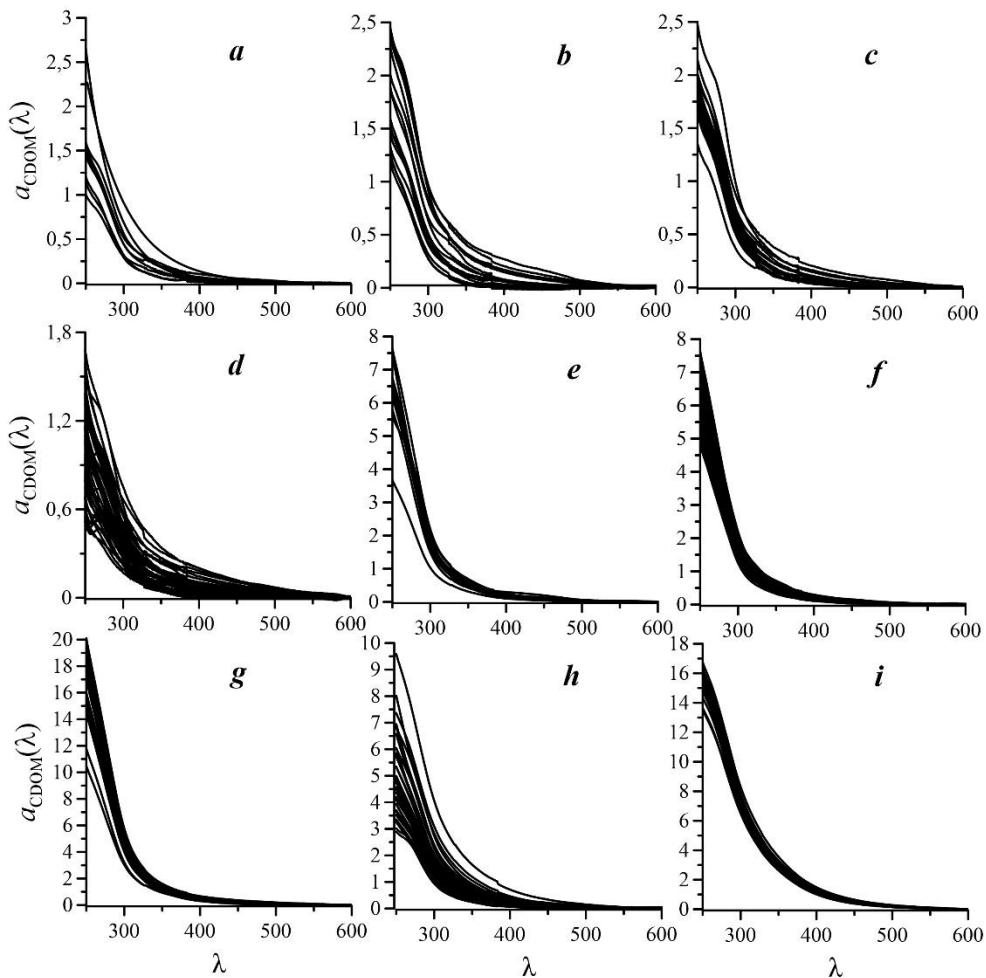


Рис. 4. Спектры показателей поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$) в поверхностном слое вод Северного Ледовитого океана (a), Баренцева моря (b), Норвежского моря (c), Атлантического сектора Южного океана (d), Черного моря зимой (e) и летом (f), Азовского моря (g), озера Байкал (h), Телецкого озера (i)

Fig. 3. Spectra of light absorption coefficients by colored dissolved organic matter ($a_{\text{CDOM}}(\lambda)$) in the surface layers of the Arctic Ocean (a), the Barents (b) and Norwegian (c) seas, Atlantic sector of the Southern Ocean (d), the Black Sea in winter (e) and summer (f), the Sea of Azov (g), and the Baikal (h) and Teletskoye (i) lakes

Значение S_{NAP} в среднем составляло $0,011 \pm 0,002 \text{ nm}^{-1}$ (табл. 2), что соответствует результатам, полученным в других районах Мирового океана [32, 37]. Отмечено снижение S_{CDOM} с увеличением трофности вод от $0,019$ до $0,015 \text{ nm}^{-1}$, что отражает изменение химического состава CDOM , а именно повышение доли высокомолекулярных соединений [36], что, вероятно, связано с влиянием речного стока (стока реки Черной), а также с меньшей степенью фотодеструкции CDOM в мутных трофных водах [35]. Установлена связь между S_{CDOM} (S_{CDM}) и $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ ($a_{\text{CDM}}(\lambda)$) (табл. 3). Значение $a_{\text{tot-w}}(438)$ изменялось зимой от $0,11$ до $0,82 \text{ m}^{-1}$ (в среднем $0,27 \pm 0,12 \text{ m}^{-1}$) и летом от $0,069$

до $0,90 \text{ м}^{-1}$ (в среднем $0,30 \pm 0,16 \text{ м}^{-1}$) (табл. 2). В связи с отсутствием сопряженности в изменении поглощения *CDOM* и *TChl-a* оценка бюджета поглощения света на длине волны 438 нм показала значительную вариабельность доли *CDOM* в общем поглощении света и доминирование фитопланктона в наиболее тропных водах.

Т а б л и ц а 1
T a b l e 1

Коэффициенты степенной зависимости $a_{\text{ph}}(490) = A(490) \cdot TChl-a^{(B(490))}$ показателя поглощения света пигментами фитопланктона на длине волны 490 нм $a_{\text{ph}}(490)$ (м^{-1}) от концентрации хлорофилла *a* в сумме с феопигментами *TChl-a* ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$)

Coefficients of the power-law dependence $a_{\text{ph}}(490) = A(490) \cdot TChl-a^{(B(490))}$ of the light absorption coefficient by phytoplankton at 490 nm ($a_{\text{ph}}(490)$, м^{-1}) upon the chlorophyll *a* concentration in total with phaeopigments (*TChl-a*, mg m^{-3})

Район / Region	$A(490), \text{м}^2 \cdot \text{мг}^{-1} / A(490), \text{м}^2 \cdot \text{mg}^{-1}$	$B(490)$	r^2	n
Южный океан / Southern Ocean	0,021	0,93	0,83	126
Норвежское море / Norwegian Sea	0,033	0,99	0,97	41
Баренцево море / Barents Sea				
Северный Ледовитый океан / Arctic Ocean				
Черное море * / Black Sea *	0,031	0,79	0,78	79
Черное море ** / Black Sea **	0,048	0,78	0,66	39
Азовское море ** / Sea of Azov **	0,050	0,59	0,74	39
Азовское море * / Sea of Azov *	0,016	0,95	0,53	7
Озеро Байкал / Lake Baikal	0,039	0,62	0,83	58
Телецкое озеро / Lake Teletskoye	0,018	0,74	0,54	39

* Измерения проводились в зимний сезон.

* Measurements were taken during a winter season.

** Измерения проводились в летний сезон.

** Measurements were taken during a summer season.

Примечание: r^2 – коэффициент детерминации; n – число измерений.

Note: r^2 is the determination coefficient; n is a number of measurements.

Исследования в поверхностном слое вод Норвежского и Баренцева морей, а также Северного Ледовитого океана [14] показали высокую изменчивость *TChl-a* (от $0,058$ до $1,5 \text{ мг м}^{-3}$) и показателей поглощения света всеми оптически активными компонентами среды: $a_{\text{ph}}(438)$ (от $0,0014$ до $0,12 \text{ м}^{-1}$), $a_{\text{NAP}}(438)$ (от $0,00031$ до $0,068 \text{ м}^{-1}$) и $a_{\text{CDOM}}(438)$ (от $0,0074$ до $0,20 \text{ м}^{-1}$) (табл. 2). Поглощение света *NAP* коррелировало с поглощением света фитопланктоном и с *TChl-a*. Вклад *NAP* в поглощение света взвешенным веществом на длине волны 438 нм в Норвежском и Баренцевом морях и Северном Ледовитом океане составлял в среднем 27, 34 и 39 % соответственно (табл. 2). Корреляции между поглощением света *CDOM* и *TChl-a* не отмечено.

Таблица 2
Table 2

Среднее значение биооптических показателей вод ± стандартное квадратичное отклонение
Mean value of bio-optical water properties ± standard deviation

Регион / Region	$TC/Chl-a$	$a_{NAP}(490)$	$\frac{a_{NAP}(438)}{a_p(438)}$	S_{NAP}	$a_{CDOM}(490)$	S_{CDOM}	$a_{CDM}(490)$	S_{CDM}	$a_{tot-n}(438)$
Южный океан / Southern Ocean	$0,97 \pm 0,47$	$0,0071 \pm 0,0042$	$0,24 \pm 0,12$	$0,011 \pm 0,004$	$0,027 \pm 0,023$	$0,014 \pm 0,008$	$0,034 \pm 0,023$	$0,012 \pm 0,006$	$0,11 \pm 0,076$
Норвежское море / Norwegian Sea	$1,0 \pm 0,44$	$0,011 \pm 0,005$	$0,27 \pm 0,13$	$0,011 \pm 0,003$	$0,028 \pm 0,022$	$0,017 \pm 0,005$	$0,039 \pm 0,024$	$0,016 \pm 0,004$	$0,12 \pm 0,079$
Баренцево море / Barents Sea	$0,41 \pm 0,26$	$0,0073 \pm 0,0046$	$0,34 \pm 0,12$	$0,011 \pm 0,003$	$0,030 \pm 0,032$	$0,017 \pm 0,005$	$0,037 \pm 0,035$	$0,016 \pm 0,004$	$0,12 \pm 0,10$
Северный Ледовитый океан / Arctic Ocean	$0,43 \pm 0,54$	$0,0037 \pm 0,0019$	$0,39 \pm 0,17$	$0,011 \pm 0,003$	$0,011 \pm 0,010$	$0,017 \pm 0,005$	$0,015 \pm 0,010$	$0,016 \pm 0,004$	$0,063 \pm 0,039$
Черное море, прибрежный район* / Black Sea, coastal region*	$1,2 \pm 0,7$	$0,019 \pm 0,018$	$0,33 \pm 0,15$	$0,011 \pm 0,002$	$0,038 \pm 0,018$	$0,019 \pm 0,003$	$0,054 \pm 0,022$	$0,017 \pm 0,002$	$0,27 \pm 0,12$
Черное море, прибрежный район** / Black Sea, coastal region**	$0,50 \pm 0,20$	$0,017 \pm 0,017$	$0,34 \pm 0,11$	$0,011 \pm 0,002$	$0,035 \pm 0,019$	$0,019 \pm 0,003$	$0,049 \pm 0,025$	$0,017 \pm 0,002$	$0,30 \pm 0,16$
Азовское море / Sea of Azov	$6,0 \pm 2,3$	$0,094 \pm 0,079$	$0,41 \pm 0,20$	$0,011 \pm 0,0014$	$0,097 \pm 0,031$	$0,019 \pm 0,0024$	$0,19 \pm 0,15$	$0,015 \pm 0,0026$	$0,61 \pm 0,45$
Озеро Байкал / Lake Baikal	$2,2 \pm 1,2$	$0,023 \pm 0,021$	$0,23 \pm 0,11$	$0,01 \pm 0,0017$	$0,059 \pm 0,038$	$0,018 \pm 0,0028$	$0,081 \pm 0,056$	$0,016 \pm 0,0019$	$0,28 \pm 0,19$
Телецкое озеро / Lake Teletskoye	$1,7 \pm 0,37$	$0,038 \pm 0,012$	$0,54 \pm 0,10$	$0,009 \pm 0,0006$	$0,24 \pm 0,034$	$0,018 \pm 0,0007$	$0,28 \pm 0,044$	$0,017 \pm 0,0008$	$0,72 \pm 0,09$

* Измерения проводились в зимний сезон. / * Measurements were taken during a winter season.

** Измерения проводились в летний сезон. / ** Measurements were taken during a summer season.

П р и м е ч а н и я: $TC/Chl-a$ – концентрация хлорофилла a в сумме с феофитинами, $mg \cdot m^{-3}$; $a_{NAP}(490)$ – показатель поглощения света неживым взвешенным веществом (m^{-1}), $a_{CDOM}(490)$ – показатель поглощения света окрашенным органическим веществом (m^{-1}) и $a_{CDM}(490)$ – показатель поглощения света окрашенным взвешенным и растворенным органическим веществом (m^{-1}) на длине волны 490 нм; $a_{tot-n}(438)$ – общее поглощение света на 438 нм (m^{-1}); $a_{NAP}(438)/a_p(438)$ – отношение показателей $a_{NAP}(438)$ к общему поглощению взвешенным веществом на длине волны 438 нм ($a_p(438)$); S_{NAP} – спектральный наклон поглощения света неживым взвешенным веществом (nm^{-1}), S_{CDOM} – спектральный наклон поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом (nm^{-1}) и S_{CDM} – спектральный наклон поглощения света окрашенным взвешенным и растворенным органическим веществом (nm^{-1}) для верхнего перемешанного слоя.

Н о т е: $TC/Chl-a$ is the chlorophyll a concentration in total with pheophytins, $mg \cdot m^{-3}$; $a_{NAP}(490)$ is the light absorption coefficient by non-algal particles (m^{-1}), $a_{CDOM}(490)$ is the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter (m^{-1}), and $a_{CDM}(490)$ is the light absorption coefficient by colored detrital matter (m^{-1}) at the wavelength 490 nm; $a_{tot-n}(438)$ is the total non-water light absorption at 438 nm (m^{-1}); $a_{NAP}(438)/a_p(438)$ is the ratio of $a_{NAP}(438)$ to the particulate absorption coefficient at the wavelength 438 nm ($a_p(438)$); S_{NAP} is the spectral slope of light absorption by non-algal particles (nm^{-1}), S_{CDOM} is the spectral slope of light absorption by colored detrital matter (nm^{-1}), and S_{CDM} is the spectral slope of light absorption by colored detrital matter (nm^{-1}) for the upper mixed layer.

Таблица 3
Table 3

Коэффициенты степенной зависимости $S = A \cdot a(490)^B$
Coefficients of power-law dependence $S = A \cdot a(490)^B$

Регион / Region	A_{CDOM}	B_{CDOM}	r^2	n	A_{CDM}	B_{CDM}	r^2	n
Южный океан / Southern Ocean	0,0045	-0,27	0,60	126	0,0034	-0,380	0,52	126
Норвежское море */ Norwegian Sea *	0,0056	-0,28	0,81	80	0,0052	-0,320	0,73	80
Баренцево море */ Barents Sea *								
Северный Ледовитый океан */ Arctic Ocean *								
Черное море **/ Black Sea **	0,0065	-0,29	0,77	138	0,009	-0,200	0,63	138
Азовское море **/ Sea of Azov **	0,012	-0,19	0,41	118	0,013	-0,060	0,32	118
Озеро Байкал / Lake Baikal	0,011	-0,15	0,39	82	0,012	-0,091	0,31	82

* Общие зависимости для Норвежского, Баренцева морей и Северного Ледовитого океана

*Common dependencies for the Norwegian and Barents seas, and the Arctic Ocean.

** Общие зависимости для всех сезонов

** Common dependencies for all the seasons.

Примечание: 1. Для Телецкого озера зависимости не установлено.

2. A_{CDOM} , B_{CDOM} – коэффициенты степенной зависимости спектрального наклона поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом (S_{CDOM} , nm^{-1}) от показателей поглощения света окрашенным растворенным органическим веществом ($a_{CDOM}(490)$, m^{-1}); A_{CDM} , B_{CDM} – коэффициенты степенной зависимости спектрального наклона поглощения света окрашенным взвешенным и растворенным органическим веществом (S_{CDM} , nm^{-1}) от показателя поглощения света ($a_{CDM}(490)$, m^{-1}); r^2 – коэффициент детерминации; n – число измерений.

Note: 1. For Lake Teletskoye no dependence was found.

2. A_{CDOM} and B_{CDOM} are the coefficients of power-law dependence of the spectral slope of light absorption by colored dissolved organic matter (S_{CDOM} , nm^{-1}) upon the light absorption coefficient by colored dissolved organic matter ($a_{CDOM}(490)$, m^{-1}); A_{CDM} and B_{CDM} are the coefficients of power-law dependence of the spectral slope of light absorption by colored detrital matter (S_{CDM} , nm^{-1}) upon the light absorption coefficient ($a_{CDM}(490)$, m^{-1}); r^2 is the determination coefficient; n is a number of measurements.

Для Норвежского и Баренцева морей, а также для Северного Ледовитого океана установлена связь между $a_{ph}(\lambda)$ и $TChl-a$, которая для отдельных длин волн описана едиными уравнениями (табл. 1) без статистически значимых различий между акваториями [14]. В результате параметризации (уравнение (2)) получены значения S_{NAP} и S_{CDOM} . Значения этих параметров в среднем равнялись $0,011 \pm 0,003$ и $0,017 \pm 0,004 \text{ nm}^{-1}$ соответственно (табл. 2). Значения S_{CDOM} ($0,010$ – $0,025 \text{ nm}^{-1}$) изменялись в обратной связи с показателем $a_{CDOM}(\lambda)$, которая описана степенным уравнением с одинаковыми коэффициентами для Норвежского, Баренцева морей и Северного Ледовитого океана (табл. 3). Для S_{CDM} и $a_{CDM}(\lambda)$ установлена аналогичная связь (табл. 3). Значение $a_{tot-w}(438)$ в поверхностном слое Норвежского, Баренцева морей и Северного Ледовитого

океана изменялось от $0,067$ до $0,25 \text{ м}^{-1}$ ($0,12 \pm 0,079 \text{ м}^{-1}$), от $0,025$ до $0,24 \text{ м}^{-1}$ ($0,12 \pm 0,10 \text{ м}^{-1}$) и от $0,021$ до $0,15 \text{ м}^{-1}$ ($0,063 \pm 0,039 \text{ м}^{-1}$) (табл. 2) соответственно. Оценка бюджета поглощения на длинах волн 438 и 490 нм показала, что на большей части исследованной акватории *CDOM* доминировал в поглощении света. Доля *CDOM* в общем поглощении $a_{\text{tot-w}}(438)$ изменялась от 80 до 20% . Такой широкий диапазон относительного поглощения света *CDOM* связан с влиянием речного стока на поступление растворенного вещества в воды и увеличением его доли в поглощении [41–43]. Увеличение биомассы фитопланктона, если рассматривать *TChl-a* как маркер биомассы фитопланктона, приводило к доминированию (65%) фитопланктона в поглощении света, а следовательно, к снижению доли *CDOM* в общем поглощении света.

Исследования в Южном океане показали, что биооптические показатели поверхностных вод (слой 1_{opt}) изменялись на порядок и более: *TChl-a* – от $0,20$ до $4,4 \text{ мг м}^{-3}$, $a_{\text{ph}}(438)$ – от $0,0051$ до $0,29 \text{ м}^{-1}$, $a_{\text{NAP}}(438)$ – от $0,0038$ до $0,022 \text{ м}^{-1}$, $a_{\text{CDOM}}(438)$ – от $0,0054$ до $0,19 \text{ м}^{-1}$. Между значениями $a_{\text{ph}}(\lambda)$ и *TChl-a* установлена связь (табл. 1). Отмечена корреляция между $a_{\text{NAP}}(438)$ и *TChl-a* и отсутствие связи между $a_{\text{CDOM}}(438)$ и *TChl-a*. В результате параметризации поглощения света неживыми оптическими компонентами среды были получены спектральные наклоны для $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ и $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$, средние значения которых составляли $S_{\text{NAP}} = 0,010 \pm 0,0021 \text{ нм}^{-1}$ и $S_{\text{CDOM}} = 0,013 \pm 0,0059 \text{ нм}^{-1}$ (табл. 2). Установлена обратная связь между $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ ($a_{\text{CDM}}(\lambda)$) и S_{CDOM} (S_{CDM}), которая описывается степенной зависимостью (табл. 3). Значение $a_{\text{tot-w}}(438)$ в поверхностном слое Южного океана изменялись от $0,039$ до $0,37 \text{ м}^{-1}$ ($0,11 \pm 0,076 \text{ м}^{-1}$) (табл. 2). Оценка бюджета поглощения света на длине волны 438 нм показала, что в условиях высокой некоррелированной с *TChl-a* изменчивости поглощения света *CDOM* происходит смена доминирующего компонента: *CDOM* доминирует (около 60%) в поглощении света в акватории с низкими значениями *TChl-a*, фитопланктон доминирует (около 80%) в акватории с высокими значениями *TChl-a*. Воды Атлантического сектора Южного океана являются оптически контрастными по содержанию как фитопланктона, так и *CDOM* [17].

Исследования на озере Байкал показали высокую (в пределах порядка и более) изменчивость всех биооптических показателей вод [16, 18]. *TChl-a* в поверхностном слое (слой 1_{opt}) изменялась в пределах $0,58$ – $5,3 \text{ мг м}^{-3}$. Установлена связь между $a_{\text{ph}}(\lambda)$ и *TChl-a* на отдельных длинах волн, которая описана степенной зависимостью (табл. 1). Значения $a_{\text{NAP}}(\lambda)$ и $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ на длине волны 438 нм изменялись в пределах $0,0024$ – $0,099 \text{ м}^{-1}$ и $0,035$ – $0,31 \text{ м}^{-1}$. Установлена корреляция между $a_{\text{NAP}}(438)$ и *TChl-a*. Не наблюдалось связи между поглощением света *CDOM* и *TChl-a*. Параметр S_{NAP} в среднем составлял $0,010 \pm 0,0017 \text{ нм}^{-1}$ (табл. 2). Значения S_{CDOM} изменялись от $0,011$ до $0,026 \text{ нм}^{-1}$. Установлена обратная связь между $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ ($a_{\text{CDM}}(\lambda)$) и S_{CDOM} (S_{CDM}), которая описана степенным уравнением (табл. 3). Значения $a_{\text{tot-w}}(438)$ в поверхностном слое вод изменялись в пределах $0,12$ – $0,57 \text{ м}^{-1}$ и в среднем составляли $0,28 \pm 0,19 \text{ м}^{-1}$ (табл. 2). В связи с высокой изменчивостью всех биооптических показателей вод и отсутствием корреляции между показателями поглощения

света $CDOM$ и $TChl-a$ отмечена смена доминирующей компоненты. В отдельных районах в формировании светового поля в озере доминировал $CDOM$, его вклад в общее поглощение достигал $\sim 85\%$. В районах озера, где было отмечено большое содержание $TChl-a$ (более $1,5 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$), доминировал фитопланктон и его вклад в общее поглощение света в озере достигал $\sim 80\%$.

Биооптические исследования на Телецком озере показали высокое содержание фитопланктона, NAP и $CDOM$. Значения $TChl-a$ в период исследований изменялись от $1,1$ до $2,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$. Установлены коэффициенты связи между $a_{ph}(\lambda)$ и $TChl-a$ на отдельных длинах волн (табл. 1). Показатели $a_{NAP}(438)$ и $a_{CDOM}(438)$ изменялись от $0,029$ до $0,14 \text{ м}^{-1}$ и от $0,46$ до $0,76 \text{ м}^{-1}$. Средние значения показателей поглощения света NAP и $CDOM$ на длине волны 490 нм приведены в табл. 2. Значения показателя $a_{tot-w}(438)$ варьировали от $0,56$ до $0,97 \text{ м}^{-1}$, в среднем составляя $0,72 \pm 0,02 \text{ м}^{-1}$ (табл. 2). Для поглощения света $CDOM$ и CDM установлены связи между спектральным наклоном (S_{CDOM} и S_{CDM}) и показателем поглощения света на длине волны 490 нм (табл. 3). В среднем в водах Телецкого озера соотношение $a_{NAP}(438)/a_p(438)$ составляло $0,54 \pm 0,10$, что значительно превышало значения этого соотношения, полученные в других исследованных акваториях (табл. 2).

На основе объединенного массива данных был проведен сравнительный анализ и систематизация районов исследований по всем измеренным биооптическим показателям вод: $TChl-a$ и $a_{tot-w}(438)$ в слое 1_{opt} (табл. 2). Получено, что значения $TChl-a$ изменялись на несколько порядков ($0,066\text{--}24 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$), значения показателя $a_{tot-w}(438)$ изменялись более чем на порядок ($0,021\text{--}0,97 \text{ м}^{-1}$). Средние значения $TChl-a$ изменялись на порядок от $0,41 \pm 0,26 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ до $6,0 \pm 2,3 \text{ мг}\cdot\text{м}^{-3}$ в ряду Баренцево море – Северный Ледовитый океан – крымские прибрежные воды – Южный океан – Норвежское море – Телецкое озеро – озеро Байкал – Азовское море. Показатель $a_{tot-w}(438)$ в среднем изменялся тоже на порядок от $0,063 \pm 0,039 \text{ м}^{-1}$ до $0,90 \pm 0,21 \text{ м}^{-1}$ в ряду Северный Ледовитый океан – Южный океан – Баренцево море – Норвежское море – крымские прибрежные воды – озеро Байкал – Азовское море – Телецкое озеро (табл. 2). На основании средних значений $TChl-a$ (табл. 2) можно сделать вывод, что наиболее трофным регионом из числа исследованных является Азовское море. Во всех регионах в поглощении света преобладала неживая оптически активная компонента среды CDM (равная $NAP + CDOM$). При этом в Телецком озере CDM доминировало в общем поглощении света в большей степени, чем это наблюдали в самых трофных водах – в Азовском море. В результате этого максимальные значения $a_{tot-w}(438)$ отмечены в Телецком озере. Фактически это связано с отличительной особенностью этого водоема, заключающейся в преобладании неживой взвеси в поглощении света всем взвешенным веществом ($a_{NAP}(438) > a_{ph}(438)$), что обусловлено влиянием обильного берегового стока на биооптические показатели озера. Эта особенность Телецкого озера отличает его от других исследованных акваторий, где фитопланктон доминирует в поглощении света взвешенным веществом.

Для всех исследованных акваторий установлено отсутствие сопряженности в изменчивости показателей $a_{ph}(\lambda)$ и $a_{CDOM}(\lambda)$, а следовательно, и отсутствие сопряженности между $TChl-a$ и $a_{tot-w}(\lambda)$.

Обобщенные результаты, полученные в водах (глубоководный и прибрежный район Черного моря, Азовское море и Телецкое озеро) с различающимися более чем на порядок значениями показателя $a_{\text{tot-w}}(\lambda)$, были использованы для получения количественных связей:

1) между Z_{eu} и $a_{\text{tot-w}}(\lambda)$ в поверхностном слое водоема. В связи с тем, что Z_{eu} связана с показателем диффузного ослабления фотосинтетически активной радиации K_d ($K_d = 4,6 / Z_{\text{eu}}$) [35], можно K_d оценивать по $a_{\text{tot-w}}(\lambda)$;

2) между λ_{max} около нижней границы зоны фотосинтеза и $a_{\text{tot-w}}(\lambda)$ в поверхностном слое моря [44]:

$$\lambda_{\text{max}} = 579 \cdot a_{\text{tot-w}}(438)^{0,057}, \quad r^2 = 0,99;$$

$$Z_{\text{eu}} = 7,96 \cdot a_{\text{tot-w}}(438)^{-0,727}, \quad r^2 = 0,96.$$

Принимая во внимание, что $a_{\text{tot-w}}(\lambda)$ представляет сумму показателей $a_{\text{ph}}(\lambda) + a_{\text{CDM}}(\lambda)$, которые восстанавливаются с помощью регионального алгоритма *Chl-CDM*, установленные количественные связи позволяют увеличить число параметров (за счет добавления Z_{eu} , K_d и λ_{max}), восстанавливаемых на основе спутниковых данных, используя региональный алгоритм *Chl-CDM*.

Установленные регионально специфические коэффициенты параметризации поглощения света всеми оптически активными компонентами среды (табл. 1–3) позволяют модифицировать региональный трехканальный алгоритм *Chl-CDM* [11] и расширить географию применения этого алгоритма. Полученные региональные коэффициенты связи между *TChl-a* и $a_{\text{ph}}(\lambda)$ на длине волны 490 нм (табл. 1) позволят корректно определять *TChl-a* на основе восстановленного значения $a_{\text{ph}}(490)$. Регионально установленные коэффициенты связи *TChl-a* и $a_{\text{ph}}(490)$ обусловлены так называемым эффектом упаковки, то есть влиянием упаковки пигментов в клетках на способность этих клеток поглощать свет. Следовательно, связь *TChl-a* и $a_{\text{ph}}(\lambda)$ учитывает (косвенно) адаптивные изменения фитопланктона на уровне клетки и сообщества в ответ на изменения факторов среды конкретной акватории. Установленные региональные связи между $a_{\text{CDM}}(490)$ и спектральным наклоном S_{CDM} (табл. 3) позволят корректно восстанавливать $a_{\text{CDM}}(490)$. Регионально специфические коэффициенты этой связи позволят (косвенно) учитывать соотношение между *NAP* и *CDOM*, а также химическую структуру *CDOM* [36], которая определяет спектральный наклон $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ в конкретной акватории. Регионально специфические коэффициенты параметризации поглощения света оптически активными компонентами среды (табл. 1–3) позволят адаптировать алгоритм *Chl-CDM* [11] к исследованным акваториям.

Выводы

Региональные связи между показателями $a_{\text{ph}}(\lambda)$ и *TChl-a* позволят корректно определять *TChl-a* на основе значения $a_{\text{ph}}(\lambda)$, восстанавливаемого с помощью региональных алгоритмов (в том числе и трехканального алгоритма *Chl-CDM*), так как параметризация связи между показателями $a_{\text{ph}}(\lambda)$ и *TChl-a* учитывает (косвенно) влияние условий среды на состав и concentra-

цию пигментов в клетках фитопланктона, а также на размерно-видовую структуру фитопланктона. Установленные регионально специфические связи между $a_{\text{CDM}}(490)$ ($a_{\text{CDM}}(490) = a_{\text{NAP}}(490) + a_{\text{CDOM}}(490)$) и S_{CDM} используются при восстановлении параметра $a_{\text{CDM}}(490)$. Регионально специфические коэффициенты параметризации поглощения света *NAP* и *CDOM* позволяют учитывать соотношение между *NAP* и *CDOM*, а также химическую структуру *CDOM*, которая определяет спектральный наклон поглощения света *CDOM* в конкретном регионе.

На основе эмпирически установленных зависимостей были предложены дополнительные индикаторы качества водной среды (глубина зоны фотосинтеза и спектральные свойства света в море), которые можно оценивать с использованием спутниковых данных.

Развитие региональных алгоритмов на основе эмпирически установленных зависимостей открывает перспективу оперативного мониторинга состояния водных экосистем на основе набора индикаторов качества и продуктивности вод. Это позволит отслеживать распространение органического растворенного вещества и взвешенного вещества в прибрежных водах, подверженных бытовым и промышленным стокам. А также оценивать влияние стоков на прозрачность вод, что критично для функционирования первично продукционного звена экосистемы, а следовательно, и в целом для водной экосистемы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate change impacts on marine ecosystems / S. C. Doney [et al.] // Annual Review of Marine Science. 2012. Vol. 4. P. 11–37. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-041911-111611>
2. Satellite Ocean Colour: current status and future perspective / S. Groom [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2019. Vol. 6. 485. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00485>
3. An ocean-colour time series for use in climate studies: the experience of the Ocean-Colour Climate Change Initiative (OC-CCI) / S. Sathyendranath [et al.] // Sensors. 2019. Vol. 19, iss. 19. 4285. <https://doi.org/10.3390/s19194285>
4. 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. <https://doi.org/10.3390/rs15071938>
5. The Oceanic Optics Book / Ed. C. D. Mobley. Dartmouth: International Ocean Colour Coordinating Group (IOCCG), 2022. 924 p. <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-1710>
6. Uncertainties in Ocean Colour Remote sensing / Ed. F. Mélin. Dartmouth : International Ocean Colour Coordinating Group, 2019. 170 p. (IOCCG Report Series ; no. 18).
7. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color // Limnology and Oceanography. 1977. Vol. 22, iss. 4. P. 709–722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
8. 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. 60–68. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2004.48>
9. Mélin F., Vantrepotte V. How optically diverse is the coastal ocean? // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 160. P. 235–251. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.023>
10. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas / O. V. Kopelevich [et al.] // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. Vol. 51, iss. 10–11. P. 1063–1091. [http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645\(04\)00101-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0967-0645(04)00101-8)

11. *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. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1211350>
12. Концентрация хлорофилла-*a* в Черном море: сравнение спутниковых алгоритмов / В. В. Суслин [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 3. С. 64–72. EDN VALADQ. <https://doi.org/10.7868/S2073667318030085>
13. Dynamics in pigment concentration and light absorption by phytoplankton, non-algal particles and colored dissolved organic matter in the Black Sea coastal waters (near Sevastopol) / T. V. Efimova [et al.] // *Proceedings of SPIE. SPIE, 2024. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 108336C. <https://doi.org/10.1117/12.2504657>
14. 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. <https://doi.org/10.3390/rs15174346>
15. Spectral bio-optical properties of Lake Teletskoye in summer / N. A. Moiseeva [et al.] // *Proceedings of SPIE. SPIE, 2023. Vol. 12780 : 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. 1278049. <https://doi.org/10.1117/12.2690958>
16. Preliminary results of bio-optical investigations at Lake Baikal / T. Ya. Churilova [et al.] // *Limnology and Freshwater Biology*. 2018. № 1. P. 58–61. <http://dx.doi.org/10.31951/2658-3518-2018-A-1-58>
17. Parameterization of light absorption of phytoplankton, non-algal particles and coloured dissolved organic matter in the Atlantic Region of the Southern Ocean (Austral Summer of 2020) / T. Ya. Churilova [et al.] // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, iss. 3. 634. <http://dx.doi.org/10.3390/rs15030634>
18. Study of absorption characteristics of phytoplankton, particles and colored dissolved organic matter in Lake Baikal (July 2018 and September 2019) / T. Ya. Churilova [et al.] // *Limnology and Freshwater Biology*. 2020. Iss. 2. P. 387–390. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-2-387>
19. Спектральные показатели поглощения света взвешенным веществом и растворенным органическим веществом в Азовском море / Т. Я. Чурилова [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 73–83. <https://doi.org/10.59887/fpg/ex1p-9vtp-phu8>
20. Оценки концентрации хлорофилла *a* и первичной продукции в Азовском море с использованием спутниковых данных / Г. Г. Матишов [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2010. Т. 432, № 4. С. 563–566. EDN MSQXQT.
21. Long-term variations of surface chlorophyll *a* and primary production in the open Black Sea / O. A. Yunev [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. 2002. Vol. 230. P. 11–28. <https://doi.org/10.3354/meps230011>
22. *Стельмах Л. В.* Интенсивность фотосинтеза двух размерных фракций фитопланктона в евтрофных водах Севастопольской бухты // *Гидробиологический журнал*. 1992. Т. 28, № 3. С. 14–20.
23. *Pitchford J. W., Brindley J.* Iron limitation, grazing pressure and oceanic high nutrient-low chlorophyll (HNLC) regions // *Journal of Plankton Research*. 1999. Vol. 21, iss. 3. P. 525–547. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.3.525>
24. Modeling plankton ecosystem functioning and nitrogen fluxes in the oligotrophic waters of the Beaufort Sea, Arctic Ocean: a focus on light-driven processes / V. Le Fouest [et al.] // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10, iss. 7. P. 4785–4800. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4785-2013>
25. Parameterization of vertical chlorophyll *a* in the Arctic Ocean: impact of the subsurface chlorophyll maximum on regional, seasonal, and annual primary production estimates / M. Ardyna [et al.] // *Biogeosciences*. 2013. Vol. 10, iss. 6. P. 4383–4404. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4383-2013>

26. Экологическое состояние Телецкого озера при современных изменениях окружающей среды / Т. М. Кудерина [и др.] // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. 2019. № 1. С. 86–91. EDN RQHHDYG.
27. 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)
28. Lorenzen C. J. Determination of chlorophyll and pheo-pigments: spectrophotometric equations // *Limnology and Oceanography*. 1967. Vol. 12, iss. 2. P. 343–346. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.2.0343>
29. Inherent optical property measurements and protocols: absorption coefficient / Ed. A. R. Neeley, A. Mannino. Dartmouth, NS, Canada, 2018. 83 p. (IOCCG Protocol series ocean optics & biogeochemistry protocols for satellite ocean colour sensor validation ; vol. 1). <http://dx.doi.org/10.25607/OBP-119>
30. Measurement protocol of absorption by chromophoric dissolved organic matter (CDOM) and other dissolved materials / A. Mannino [et al.]. Dartmouth, Canada : IOCCG, 2019. 77 p. (Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient). URL: https://ioccg.org/wp-content/uploads/2019/10/cdom_abs_protocol_public_draft-19oct-2019-sm.pdf (date of access: 30.07.2024).
31. 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>
32. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe / M. Babin [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2003. Vol. 108, iss. C7. 3211. <http://dx.doi.org/10.1029/2001JC000882>
33. Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern method / Ed. S. W. Jeffrey, R. F. C. Mantoura, S. W. Wright. Paris : UNESCO publishing, 1997, 661 p.
34. Чурилова Т. Я., Финенко З. З., Акимов А. И. Пигменты микроводорослей // *Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования*. Севастополь : ЭКОСИ-гидрофизика, 2008. Глава 11. С. 301–319.
35. Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2011. 665 p.
36. Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter / J. R. Helms [et al.] // *Limnology and Oceanography*. 2008. Vol. 53, iss. 3. P. 955–969. <https://doi.org/10.4319/lo.2008.53.3.0955>
37. Nelson N. B., Siegel D. A. The Global Distribution and Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter // *Annual Review of Marine Science*. 2013. Vol. 5. P. 447–476. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-120710-100751>
38. Влияние взвешенного и растворенного органического вещества на спектральные характеристики облученности и эффективность поглощения света пигментами фитопланктона в прибрежных водах Черного моря / Т. Я. Чурилова [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020. Т. 13, № 2. С. 43–50. EDN PASVZI. <http://dx.doi.org/10.7868/S2073667320020057>
39. 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)
40. Phytoplankton carbon to chlorophyll a ratio: response to light, temperature and nutrient limitation / Z. Z. Finenko [et al.] // *Морской экологический журнал*. 2003. Т. 2, № 2. С. 40–64.
41. Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean / C. G. Fichtot [et al.] // *Scientific Reports*. 2013. Vol. 3. 1053. <https://doi.org/10.1038/srep01053>

42. Inventories and behavior of particulate organic carbon in the Laptev and East Siberian seas / L. Sánchez-García [et al.] // *Global Biogeochemical Cycles*. 2011. Vol. 25, iss. 2. GB2007. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GB003862>
43. The upper desalinated layer in the Kara Sea / A. G. Zatsepin [et al.] // *Oceanology*. 2010. Vol. 50, iss. 5. P. 657–667. <http://dx.doi.org/10.1134/S0001437010050036>
44. Water transparency and spectral downwelling irradiance in the Black and Azov seas and in Lake Teletskoye / T. Ya Churilova [et al.] // *Proceedings of SPIE*. SPIE, 2023. Vol. 12780 : 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1278047. <https://doi.org/10.1117/12.2690845>

Об авторах:

Чурилова Татьяна Яковлевна, ведущий научный сотрудник, руководитель лаборатории фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), кандидат биологических наук, **ORCID ID: 0000-0002-0045-7284**, **Scopus Author ID: 6603622802**, **ResearcherID: O-8437-2016**, **SPIN-код: 2238-9533**, tanya.churilova@ibss-ras.ru

Ефимова Татьяна Владимировна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0003-3908-4160**, **Scopus Author ID: 57194423783**, **WoS ResearcherID: X-1355-2019**, **SPIN-код: 1668-0742**, tefimova@ibss-ras.ru

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

Скорород Елена Юрьевна, научный сотрудник лаборатории фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **ORCID ID: 0000-0002-3057-3964**, **Scopus Author ID: 57215009764**, **WoS ResearcherID: A-6831-2019**, **SPIN-код: 3314-5775**, elenaskorokhod@ibss-ras.ru

Калмыкова Дарья Владимировна, младший научный сотрудник лаборатории фотосинтеза и биооптики моря, ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Нахимова, д. 2), **Scopus Author ID: 58688288100**, daria-k.kalmykova@ibss-ras.ru

Суторихин Игорь Анатольевич, главный научный сотрудник лаборатории гидрологии и геоинформатики, ИВЭП СО РАН (Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1), доктор физико-математических наук, профессор, **ORCID ID: 0000-0002-7037-4812**, **SPIN-код: 2990-6901**, sia@iwep.ru

Кириллов Владимир Викторович, кандидат биологических наук, доцент, заведующий Лабораторией водной экологии, ИВЭП СО РАН (Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, д. 1), **ORCID ID: 0000-0003-1080-737X**, **SPIN-код: 7749-7710**, vkirillov@iwep.ru