

УДК 551.468

© Д. Н. Дерягин^{*1,2}, С. В. Вазюля¹, Д. И. Глуховец^{1,2}, 2024

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 141701, Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская область, Россия

*dmitriy.deryagin@phystech.edu

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В КАРСКОМ МОРЕ НА ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А БИООПТИЧЕСКИМИ АЛГОРИТМАМИ

Статья поступила в редакцию 15.04.2024, после доработки 24.09.2024, принята в печать 25.09.2024

Аннотация

Представлены результаты настройки гидрооптической модели в программе HydroLight для трёх станций в Карском море, выбранных внутри, на границе и вне поверхностного опреснённого слоя, отличающихся различными вертикальными распределениями значений биооптических характеристик. Выбранные распределения типичны для областей Карского моря, находящихся под влиянием речного стока. Модель с хорошей точностью (средняя относительная ошибка менее 10 %) воспроизводит измеренные в экспедициях спектры коэффициента яркости моря, вертикальные профили показателя ослабления света морской водой и фотосинтетически активной радиации. Полученные результаты позволили провести оценку точности различных алгоритмов определения концентрации хлорофилла-а в интервале значений, характерных для акватории Карского моря. С той же целью выполнены аналогичные расчеты для различных значений показателя поглощения окрашенным растворенным органическим веществом. Показано, что региональный алгоритм ИО РАН позволяет проводить оценку величин концентрации хлорофилла-а в области значений, превышающих 0,5 мг/м³, с существенно меньшей относительной ошибкой (менее 50 %), чем полуаналитический алгоритм GIOR (более 100 %). При этом вариации показателя поглощения желтого вещества оказывают существенно меньшее воздействие на результаты регионального алгоритма. Значительное влияние начального приближения значений концентрации хлорофилла-а на результаты работы полуаналитического алгоритма GIOR делает его непригодным для использования в области влияния речного стока в Карском море. Реализован численный метод определения толщины слоя, формирующего 90 % яркости выходящего из воды излучения, что в дальнейшем позволит более детально оценивать влияние параметров поверхностного слоя на точность оценки концентрации хлорофилла-а в Карском море по данным спутниковых сканеров цвета.

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, региональные биооптические алгоритмы, концентрация хлорофилла-а, показатель поглощения ОРОВ, HydroLight, Карское море

UDC 551.468

© D. N. Deryagin^{*1,2}, S. V. Vazyulya¹, D. I. Glukhovets^{1,2}, 2024

¹Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 117997, Nakhimovsky pr., 36, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 141701, Institutskiy per., 9, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

*dmitriy.deryagin@phystech.edu

INFLUENCE OF THE KARA SEA SURFACE LAYER PARAMETERS ON THE ACCURACY OF CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION ESTIMATION BY THE BIO-OPTICAL ALGORITHMS

Received 15.04.2024, Revised 24.09.2024, Accepted 25.09.2024

Abstract

The results of the hydro-optical model setup in the HydroLight software for three stations in the Kara Sea characterized by different vertical distributions of the values of bio-optical properties are presented. The selected distributions are typical for the areas of the Kara Sea influenced by the river runoff. The stations are located inside, outside and at the boundary of the surface

Ссылка для цитирования: Дерягин Д.Н., Вазюля С.В., Глуховец Д.И. Влияние параметров поверхностного слоя в Карском море на точность оценки концентрации хлорофилла-а биооптическими алгоритмами // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2024. Т. 16, № 3. С. 91–101. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-8

For citation: Deryagin D.N., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I. Influence of the Kara Sea Surface Layer Parameters on the Accuracy of Chlorophyll-a Concentration Estimation by the Bio-optical Algorithms. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024;16(3):91–101. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-8

desalinated layer. The model reproduces the spectra of remote sensing reflectance, vertical profiles of light attenuation coefficient of sea water and photosynthetically available radiation measured in expeditions with good accuracy (average relative error less than 10 %). The results obtained made it possible to evaluate the accuracy of different algorithms for determining chlorophyll-*a* concentration in the range of values typical for the Kara Sea. For the same purpose, similar calculations were performed for different values of the absorption coefficient of colored dissolved organic matter. It is shown that the IO RAS regional algorithm allows estimation of chlorophyll-*a* concentration in the range of values exceeding 0.5 mg/m³ with a significantly smaller relative error (less than 50 %) than the semi-analytical GIOP algorithm (more than 100 %). At the same time, variations in the yellow matter absorption coefficient have a significantly smaller impact on the results of the regional algorithm. The significant influence of the initial approximation of chlorophyll-*a* concentration values on the results of the semi-analytical GIOP algorithm makes it unsuitable for use in the area of influence of river runoff in the Kara Sea. A numerical method for determining the thickness of the layer forming 90 % of the water-leaving radiance was implemented, which will allow a more detailed assessment of the influence of surface layer parameters on the accuracy of chlorophyll-*a* concentration estimation in the Kara Sea based on satellite ocean color data in the future.

Keywords: remote sensing reflectance, regional bio-optical algorithms, chlorophyll-*a* concentration, CDOM absorption coefficient, HydroLight, Kara Sea

1. Введение

Концентрация хлорофилла-*a* — важнейший параметр, характеризующий биомассу фитопланктона и использующийся для расчета первичной продукции океанов и морей, а также экологического мониторинга морских экосистем [1] и внутренних водных объектов. Оценка концентрации хлорофилла-*a* (Хл-*a*) в больших пространственных и временных масштабах может достигаться при помощи данных спутниковых сканеров цвета с использованием биооптических алгоритмов¹. На точность этих алгоритмов значительное влияние могут оказывать региональные особенности исследуемых акваторий. Один из ярких примеров — влияние поверхностного опресненного речным стоком слоя в Карском море, приводящее к завышению оценок Хл-*a* при использовании стандартных алгоритмов в разы [2, 3]. Причина этого состоит в том, что речные воды насыщены окрашенным растворенным органическим веществом (ОРОВ), поглощение света которым относится стандартными эмпирическими алгоритмами к поглощению хлорофиллом-*a*. Для получения более точных оценок Хл-*a* по спутниковым данным разрабатываются и используются региональные алгоритмы [4–6]. Различные факторы, в первую очередь, объем речного стока и ветер, оказывают влияние на характеристики поверхностного опресненного слоя, как пространственные — площадь и толщину [7–9], так и гидрооптические [8, 10]. Очевидно, что это влияние должно отразиться на точности оценок биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды, выполняемых по данным спутниковых сканеров цвета. Целью исследования является анализ влияния биооптических характеристик поверхностного слоя Карского моря на точность оценки концентрации хлорофилла-*a* с помощью алгоритмов, широко используемых для обработки данных спутниковых сканеров цвета.

2. Материалы и методы

2.1. Данные судовых измерений

В работе используются данные комплексных гидрооптических измерений на трёх станциях, выполненных в Карском море и отличающихся различной структурой вертикальной стратификации биооптических характеристик. Станции 6240 (75,33° с. ш., 72,58° в. д.) и 6241 (74,66° с. ш., 72,83° в. д.) выполнены на разрезе от северной оконечности Новой Земли до устья Оби в 76-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море 14 июля 2019 года. Станция 7440 выполнена 10 сентября 2022 г. (71,96° с. ш., 67,44° в. д.) в ходе первого этапа 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море [11]. На всех станциях измерены спектральные показатели поглощения света компонентами морской воды, вертикальный профиль показателя ослабления света морской водой, а также величины концентрации хлорофилла-*a*. Станция 6240 находилась на границе распространения пресноводного стока (солёность вод поверхностного слоя составляла 24 ЕПС), станция 6241 — в поверхностном опреснённом слое (ПОС) с солёностью 7 ЕПС. Согласно работе [7] пороговым значением определения ПОС является солёность 25 ЕПС. Если рассматривать в качестве критерия границы ПОС значение показателя поглощения ОРОВ в поверхностном слое $a_g(443) = 0,3 \text{ м}^{-1}$, то согласно результатам прямых измерений этой величины обе станции также находятся внутри опресненного слоя: $a_g(443) = 0,7 \text{ м}^{-1}$ и $3,7 \text{ м}^{-1}$ для станций 6240 и 6241 соответственно.

¹ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> (дата обращения: 15.03.2024)

Станция 7440, выполненная в Байдарацкой губе вблизи полуострова Ямал, находится на удалении от ПОС. Это подтверждается данными как гидрологических, так и гидрооптических измерений: значение солёности составило 31 ЕПС, $a_g(443) = 0,2 \text{ м}^{-1}$. Однако станция расположена в области материкового стока Приямальского шельфа, на ней отмечаются повышенные значения спектрального показателя поглощения взвешенным веществом и малая концентрация хлорофилла-*a* на поверхности и в толще. Поэтому станцию 7440 следует относить к второму типу вод, где нельзя параметризовать первичные гидрооптические характеристики при помощи концентрации Хл-*a*.

Для создания моделей гидрооптических характеристик на станциях использованы результаты измерений Хл-*a* на горизонтах, выбранных по данным зондирования показателя ослабления света морской водой. Для этих же глубин при помощи интегрирующей сферы ICAM [12, 13] определены спектральные показатели поглощения ОРОВ и взвеси (a_g и a_p). Кроме того, использовались измеренные автономным прозрачмером ПУМ-200 [14] профили показателя ослабления $c(530)$ на длине волны 530 нм. Валидация модели на станциях 7440 и 6240 проводилась по спектрам коэффициента яркости моря (R_{rs}), полученным с помощью плавающего спектро радиометра ПРО-1 [15]. Также для проверки корректности работы модели для станции 6241, где отсутствовали измерения R_{rs} по причине малого угла солнца над горизонтом (около 10°), использован вертикальный профиль фотосинтетически активной радиации (ФАР), измеренный погружным датчиком Li-COR.

2.2. Настройка гидрооптической модели

Программа HydroLight (HL) [16] позволяет рассчитать параметры световых полей в толще морской воды и над поверхностью, путём численного решения уравнения переноса излучения. При моделировании мы использовали модель для вод 2 оптического типа [17], в которой для 4 компонентов — чистой воды, фитопланктона, ОРОВ и нефитопланктонной взвеси были определены соответствующие им первичные гидрооптические характеристики. Поглощение и рассеяние чистой морской водой в HL задаются стандартным образом [18, 19]. Параметры моделей в программе HL для станций 7440 и 6240 были подобраны так, чтобы моделируемые спектр R_{rs} и профиль $c(530)$ соответствовали измеренным. Для станции 6241 параметры подбирались исходя из соответствия моделируемых и измеренных профилей $c(530)$ и ФАР.

Оптические свойства фитопланктонной взвеси параметризованы с помощью Хл-*a*. Параметры поглощения для всех станций определены с использованием стандартных моделей, доступных в HydroLight [16]. По данным натурных измерений для станции 7440, на поверхности и глубине 13 метров величины Хл-*a* равны $0,4 \text{ мг/м}^3$. Учитывая это и однородный профиль $c(530)$ в слое 0–13 м (рис. 1), модельное значение Хл-*a* принято постоянным для всех глубин. Такое упрощение применимо для моделирования коэффициента яркости при относительно высоких значениях поглощения, поскольку вклад слоя воды ниже 13 метров в яркость выходящего из воды излучения незначителен (см. раздел 4.1). На станциях 6240 и 6241 Хл-*a* меняется значительно на различных горизонтах (от 0,2 до $3,6 \text{ мг/м}^3$). Для определения профиля Хл-*a* на этих станциях использованы измерения на горизонтах и профили флуоресценции. При помощи полученной корреляции для Хл-*a* и значений флуоресценции был восстановлен профиль Хл-*a* для этих станций.

Стандартные модели поглощения фитопланктоном в HL разработаны для вод первого типа, без учёта особенностей фитопланктона в арктическом регионе [16]. Поэтому для станции 7440 был опробован другой способ моделирования гидрооптических характеристик фитопланктона. Во втором варианте модели в программе HydroLight поглощение фитопланктонной взвесью определялось при помощи спектра удельного поглощения $a_p^*(\lambda)$:

$$a_p^*(\lambda) = a_p(\lambda) / \text{Хл-}a, \quad (1)$$

где спектр поглощения взвесью $a_p(\lambda)$ был получен в результате измерений интегрирующей сферы ICAM. Такой вариант модели на рис. 1 и далее в тексте обозначен как HL_ICAM, стандартный обозначен как HL. Параметры индикатрисы рассеяния фитопланктонной взвесью определены с помощью модели Мореля для «крупных частиц» [20].

Величина $a_g(443)$ и показатель наклона спектра ОРОВ определены по результатам измерений ICAM, их значения использовались для настройки гидрооптической модели каждой станции.

Поглощение нефитопланктонной взвесью для станций 6240, 6241 и в случае HL для станции 7440 считалось незначительным по сравнению с поглощением ОРОВ, а в HL_ICAM учитывалось за счет вклада в спектр $a_p(\lambda)$. Показатель рассеяния взвешенными частицами в HydroLight задаётся следующим образом:

$$b_p(\lambda) = b_{p0} \times X \times (\lambda_0/\lambda)^m. \quad (2)$$

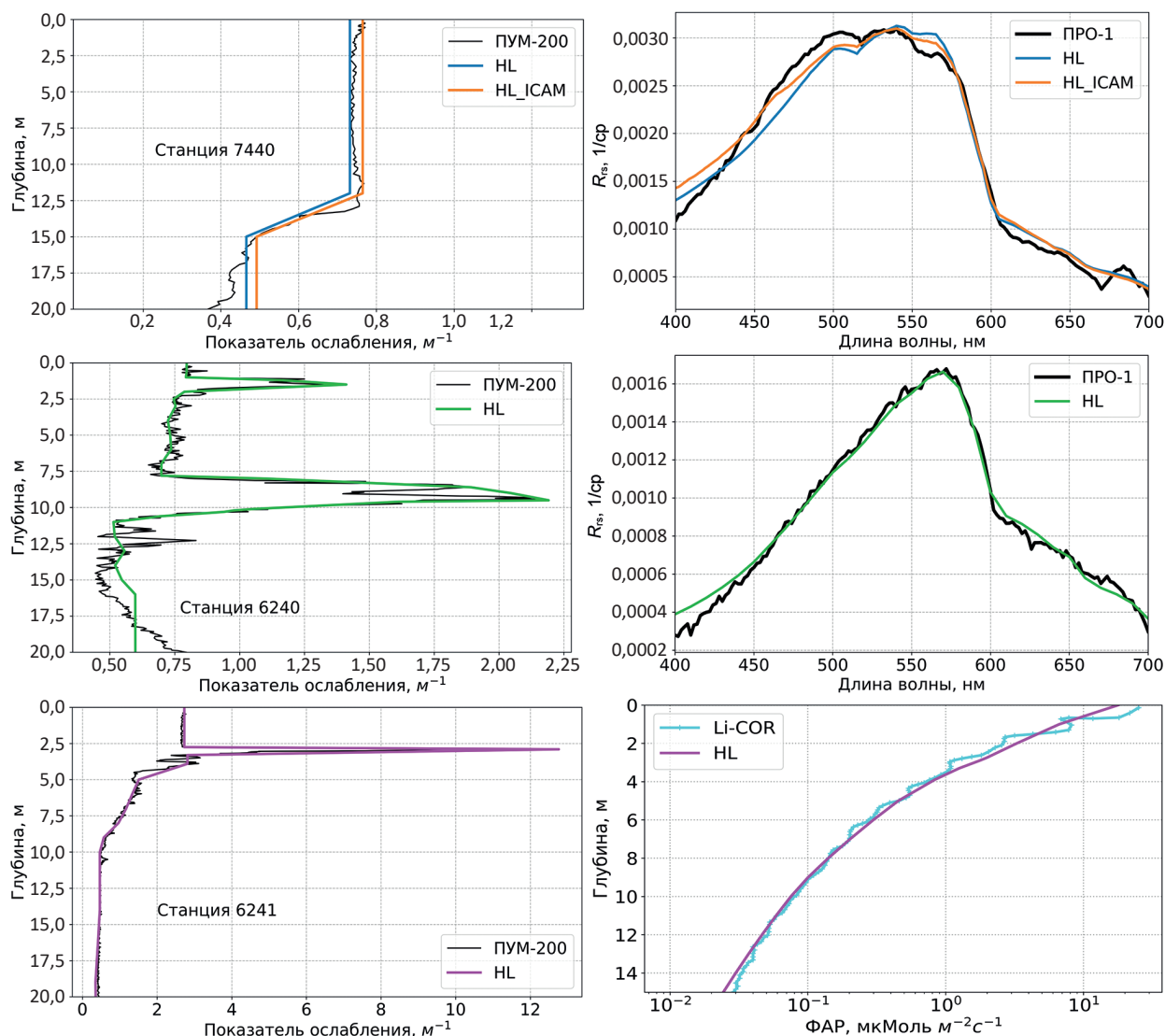


Рис. 1. Слева: сравнение профилей $c(530)$: моделируемого при помощи HL и измеренного ПУМ-200, для станций 7440, 6240 и 6241 сверху-вниз соответственно. Справа: сравнение спектров R_{rs} моделируемого при помощи HL и измеренного ПРО-1 (верхние два графика), сравнение моделируемого и измеренного профиля ФАР (нижний график)

Fig. 1. Left: top-down comparison of $c(530)$ profiles: modeled with HL and measured by PUM-200, for stations 7440, 6240 and 6241, respectively. Right: comparison of R_{rs} spectra: modeled with HL and measured by PRO-1 (upper two graphs), comparison of modeled and measured PAR profile (lower graph)

Параметры в формуле (2), а также величина отношения показателя рассеяния назад к общему показателю рассеяния b_{bp}/b_p были подобраны так, чтобы обеспечить наилучшее соответствие модельных и измеренных спектров R_{rs} , профилей $c(530)$ и ФАР. Величина b_{bp}/b_p определяет индикатрису рассеяния нефитопланктонной взвеси. Значения параметров b_{bp}/b_p , b_{p0} и m указаны в табл. 1. Множитель X для всех станций подбирался относительно измеренных профилей $c(530)$. Таким образом индикатриса рассеяния морской воды в моделях формируется вкладами трёх компонент — фитопланктонной и нефитопланктонной взвеси, а также чистой водой [16].

Рассчитанные спектры R_{rs} , профили $c(530)$ и ФАР для моделей первичных гидрооптических характеристик представлены на рис. 1. Все моделируемые спектры и профили демонстрируют хорошее соответствие данным измерений. Средняя относительная ошибка полученных радиометрических величин не превышает 10 %, что соответствует точности контактных измерений. Для станции 7440 оба варианта моделирования поглощения фитопланктонной взвесью дают близкие значения R_{rs} .

Параметры моделирования рассеяния нефитопланктонной взвесью
Values of parameters for modeling scattering by non-phytoplankton suspended matter

Станция	b_{bp}/b_p	m	$b_{p0}, \text{м}^{-1}$
6240	0,02	0,8	0,2
6241	0,013	0,8	0,2
7440_HL	0,014	0,663	0,48
7440_ICAM	0,016	1,5	0,48

2.3. Алгоритмы оценки концентрации хлорофилла-а

В исследовании чувствительности алгоритмов оценки Хл-а к изменчивости различных биооптических параметров использовались региональный регрессионный алгоритм ИО РАН К17 [21] и полуаналитический алгоритм GIOR [22].

Региональный регрессионный алгоритм К17 разработан на основе данных натурных измерений Хл-а в 2007–2015 гг. и близких по времени измерения данных спутникового сканера цвета океана MODIS. Вычисление Хл-а проводится по регрессионной формуле через индекс цвета $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$. В сравнении с предыдущей версией регионального алгоритма [2], К17 позволяет с лучшей точностью делать оценки Хл-а по спутниковым данным для вод с Хл-а < 1 мг/м³.

Алгоритм GIOR позволяет рассчитать спектральные показатели поглощения и рассеяния назад компонентами морской воды. При этом разделяется поглощение ОРОВ и фитопланктоном. Для расчётов при помощи GIOR используются спектры R_{rs} в диапазоне 400–700 нм. Оценка Хл-а выполняется через величину показателя поглощения фитопланктоном с помощью модели [23]. В качестве исходного значения Хл-а задавалась величина, полученная при помощи алгоритма К17.

3. Результаты

Для оценки точности алгоритмов оценки Хл-а использована модель HL_ICAM, настроенная для станции 7440, так как на этой станции наблюдался наиболее простой случай двухслойной стратификации. Оптимальные параметры модели Хл-а* = 0,4 мг/м³, $a_g(443) = 0,2 \text{ м}^{-1}$ позволили получить наилучшее соответствие с данными измерений. С вариацией значений этих параметров, рассчитаны наборы модельных спектров R_{rs} . Диапазон изменений Хл-а составил 0,2–1,6 мг/м³, $a_g(443) = 0,06–0,54 \text{ м}^{-1}$.

На рис. 2 сравниваются значения концентрации хлорофилла-а, использованные при моделировании R_{rs} и рассчитанные с помощью исследуемых алгоритмов GIOR и К17. Для обоих алгоритмов диапазон восстановленных значений Хл-а значительно отличается от используемого при моделировании. Если модельный Хл-а варьировался в диапазоне 0,2–1,6 мг/м³, то восстановленные с помощью К17 величины Хл-а менялись от 0,7 до 1,0 мг/м³, при использовании GIOR диапазон оценок Хл-а составил 1,0–3,5 мг/м³.

При данных значениях $a_g(443)$ и b_0 , полученные оценки К17 близки к модельным в диапазоне 0,6–1,0 мг/м³, занижены для модельных Хл-а > 1 мг/м³ и завышены для Хл-а < 0,6 мг/м³. В результате относительные ошибки восстановления Хл-а этим алгоритмом не превышали 50 % для Хл-а > 0,5 мг/м³. Для вод с Хл-а < 0,5 мг/м³ согласно расчетам по модельным спектрам относительная точность К17 (>100 %) далека от приемлемой.

Алгоритм GIOR плохо справляется с задачей оценки Хл-а для Карского моря. Это обусловлено, прежде всего, малым вкладом поглощения фитопланктоном в поглощение оптическими активными компонентами (см. раздел 4.2).

Чтобы более детально изучить чувствительность рассматриваемых алгоритмов в водах с большей концентрацией хлорофилла-а, проведены модельные расчеты спектров $R_{rs}(\lambda)$ для Хл-а, равных 1,0 и 1,5 мг/м³. Оценки Хл-а, рассчитанные с помощью исследуемых алгоритмов для трех модельных значений Хл-а в зависимости от содержания ОРОВ, представлены на рис. 3.

Независимо от алгоритма и величины модельного Хл-а, увеличение $a_g(443)$ приводит к возрастанию значений Хл-а. Для GIOR даже для самой малой модельной величины $a_g(443) = 0,06 \text{ м}^{-1}$ оценки Хл-а завышены почти в 2 раза. С ростом $a_g(443)$ значения восстановленного Хл-а получаются больше модельных значений Хл-а уже в 3–5 раз.

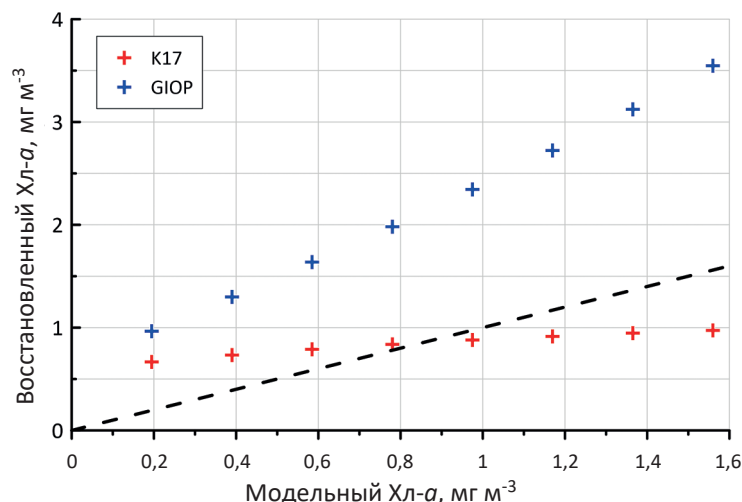


Рис. 2. Сопоставление величин концентрации Хл, задаваемых в модели и восстановленных с помощью алгоритмов GIOP и K17. Пунктир – линия идеального соответствия 1:1. Использована гидрооптическая модель HL_ICAM для станции 7440

Fig. 2. Comparison of Chl concentration values used in the model and retrieved with the GIOP and K17 algorithms. The dotted line is the line of perfect 1:1 match. The HL_ICAM hydro-optical model for station 7440 was used

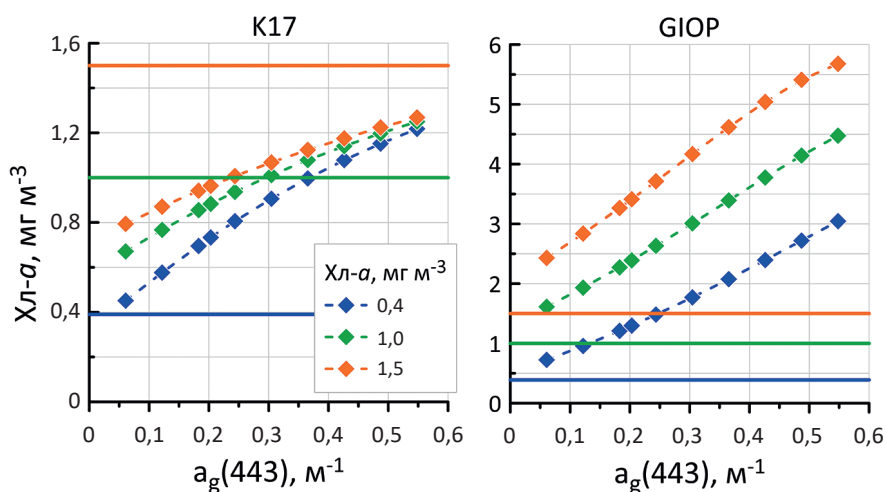


Рис. 3. Оценки Хл в зависимости от величин $a_g(443)$, используемых в модельных расчетах спектров $R_{rs}(\lambda)$. Слева представлены результаты для алгоритма K17, справа – GIOP. Цветными сплошными линиями показаны модельные величины Хл. Использована гидрооптическая модель HL_ICAM для станции 7440

Fig. 3. Chl estimates as a function of the $a_g(443)$ values used in the model calculations of the $R_{rs}(\lambda)$ spectra. The results for the K17 algorithm are presented on the left and the results for the GIOP algorithm – on the right. The colored solid lines show the model values of Chl. The HL_ICAM hydro-optical model for station 7440 was used

В случае использования K17 для модельного $\text{Хл-}a = 0,4 \text{ мг/м}^3$ близкие оценки $\text{Хл-}a$ получаются только для малых величин $a_g(443)$. Для модельного $\text{Хл-}a = 1 \text{ мг/м}^3$ минимальные ошибки оценки $\text{Хл-}a$ получаются при $a_g(443)$ в диапазоне $0,2\text{--}0,4 \text{ м}^{-1}$, а для $\text{Хл-}a = 1,5 \text{ мг/м}^3$ — при более высоких величинах $a_g(443) \geq 0,5 \text{ м}^{-1}$. Что свидетельствует о том, что регрессионный алгоритм K17, разработанный по данным измерений в Карском море, учитывает характерное соответствие между величинами $\text{Хл-}a$ и ОРОВ в этом море. Близость получаемых с помощью регионального алгоритма оценок $\text{Хл-}a$ в области больших значений $a_g(443)$ при-

водит к тому, что даже в области сильного влияния речного стока этот алгоритм в отличие от стандартного не будет показывать аномально высоких значений Хл-а. Это безусловно следует отнести к преимуществам регионального алгоритма.

Расчет Хл-а в зависимости от толщины h верхнего слоя с большим содержанием ОРОВ и нефитопланктонной взвеси показал, что при увеличении h от 0 до 4 м получаемые оценки Хл-а для обоих алгоритмов растут. Это связано с ростом значений $a_g(443)$ в слое, где формируется выходящее из воды излучение. Для $h \geq 4$ м различия получаемых оценок Хл-а составляют менее 10 %.

4. Обсуждение

4.1. Расчёт толщины слоя, формирующего яркость выходящего из воды излучения

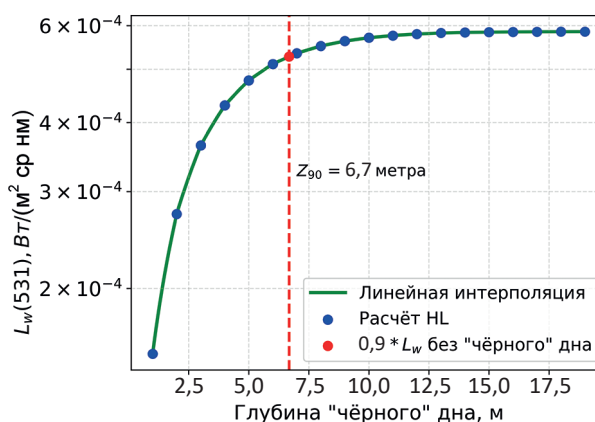
Для исследования влияния речного стока, в частности, толщины поверхностного опреснённого слоя на результат работы биооптических спутниковых алгоритмов необходимо иметь представление о толщине слоя воды, которую «видит» спутник. В работе [24] предлагается считать нижней границей этого слоя глубину Z_{90} , выше которой формируется 90 % выходящего из-под поверхности излучения. Величину Z_{90} можно определить для настроенной модели в программе HydroLight напрямую, варьируя глубину с полностью поглощающим «чёрным» дном до тех пор, пока яркость выходящего из воды излучения L_w не будет соответствовать значению $0,9 \cdot L_w$ в случае «бесконечно глубокого» океана. Результаты расчётов Z_{90} по модели HL станции 7440, для длин волн, используемых в алгоритме K17: $Z_{90}(531) = 6,7$ м, $Z_{90}(547) = 6,9$ м. При более тонком поверхностном слое, подверженном влиянию речного стока, водная толща под ним будет оказывать влияние на результаты измерений R_{rs} спутниковыми сканерами цвета и, соответственно, на дальнейшие расчёты значений биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды. Пример расчёта Z_{90} для длины волны 531 нм показан на рис. 4. В дальнейшем предложенный метод расчёта позволит провести оценку влияния толщины поверхностного опреснённого слоя на точность восстановления биооптических характеристик по спутниковым данным. Известен другой способ оценки влияния стратификации на точность биооптических алгоритмов [25–27] он требует дополнительных расчётов. Сравнение этих двух методов может быть проведено в дальнейшем.

4.2. Особенности использования полуаналитического алгоритма для оценки концентрации хлорофилла-а в Карском море

В процессе работы алгоритма GIOP определяются 3 биооптических параметра (показатель рассеяния назад взвесью b_{bp} , показатель поглощения ОРОВ совместно с детритом a_{dg} и Хл-а) так, чтобы минимизировать расхождение между исходным и рассчитанным по этим параметрам спектрами R_{rs} . При этом надо задать начальное значение концентрации хлорофилла-а (Хл-а₀), которое обычно вычисляется по одному из стандартных алгоритмов, разработанных для спутниковых данных. В табл. 2 показаны результаты применения полуаналитического алгоритма GIOP к спектру R_{rs} , измеренному на станции 7440, в зависимости от начальных значений Хл-а. Эта станция выбрана для расчетов, так как на ней наблюдалось минимальное влияние речного стока среди рассмотренных станций. При этом поглощение фитопланктоном на ней играет большую роль, чем на других станциях, поэтому полученные ниже результаты будут справедливы

Рис. 4. Определение глубины Z_{90} , путём изменения глубины «чёрного дна». Синими точками модельные вариации глубины дна. Красной штриховой линией обозначена глубина, при которой достигнуто значение $0,9 \cdot L_w$ (красная точка) в случае бесконечной глубины. Зелёная линия — интерполяция между модельными точками, для нахождения точного значения Z_{90}

Fig. 4. Calculation of Z_{90} depth, by varying the “black bottom” depth. Blue dots are model variations of the bottom depth. The red dashed line indicates the depth at which the value of $0,9 \cdot L_w$ (the red dot) is reached in the case of infinite depth. The green line is the interpolation between model points to find the exact value of Z_{90}



и для станций 6240 и 6241. Видно, что получаемые в результате величины b_{bp} и a_{dg} практически не зависят от исходной величины $Xл-a_0$. Ещё более стабильной величиной является показатель поглощения оптически активными компонентами $a_{pg} = a_{dg} + a_{ph}$. Так, для длины волны 443 нм получаемая величина a_{pg} меняется менее чем на 1 % (табл. 2). Также близки получаемые модельные спектры R_{rs} : максимальное различие 12,5 % наблюдается на длине волны 400 нм. При этом получаемые оценки $Xл-a$ различаются почти в 4 раза и сильно зависят от величины $Xл-a_0$. Нестабильный результат для $Xл-a$ обусловлен тем, что вклад поглощения фитопланктоном в суммарное поглощение оптически активными компонентами невелик. Даже для длины волны 443 нм, где происходит максимальное поглощение фитопланктоном, этот вклад не превышает 20 %, для других длин волн его вклад ещё меньше. Таким образом, при использовании полуаналитического алгоритма удастся с хорошей точностью определить величины показателя рассеяния света назад и суммарного поглощения оптически активными компонентами, так как за счет этих характеристик определяется модельный спектр R_{rs} . При этом нет возможности точно оценить поглощение фитопланктоном, а, следовательно, и концентрацию хлорофилла-а.

Стоит отметить, что описанные выше трудности оценки поглощения фитопланктоном и $Xл-a$ при помощи полуаналитического алгоритма только возрастут в случае использования спектров R_{rs} по данным измерений спутниковыми сканерами цвета. Во-первых, из-за ошибок алгоритма атмосферной коррекции получаемые спектры R_{rs} не точны. Во-вторых, для задания начального $Xл-a_0$ обычно используются величины $Xл-a$, рассчитанные стандартными алгоритмами, для которых характерны большие ошибки в водах второго типа. Всё это делает не целесообразным использование полуаналитических алгоритмов для оценки $Xл-a$ по данным спутникового зондирования в таких акваториях, как Карское море.

5. Выводы

Для трёх станций в Карском море, выбранных внутри, на границе и вне поверхностного опреснённого слоя, настроены гидрооптические модели для вод второго типа. Полученные результаты с хорошей точностью (средняя относительная ошибка менее 10 %) воспроизводят измеренные в экспедициях спектры коэффициента яркости моря, а также профили показателя ослабления света морской водой и фотосинтетически активной радиации. Проведена оценка чувствительности биооптических алгоритмов определения концентрации хлорофилла-а к изменению величин показателя поглощения ОРОВ в интервалах характерных для акватории Карского моря значений этих параметров. Региональный алгоритм К17 позволяет получать оценки $Xл-a$ с относительной ошибкой менее 50 % для вод с $Xл-a > 0,5$ мг/м³ независимо от количества ОРОВ. Продemonстрировано существенное влияние входных параметров на результат работы полуаналитического алгоритма GIOP. Даже при относительно слабом для Карского моря влиянии речного стока, за-

Таблица 2

Table 2

Результаты применения алгоритма GIOP к измеренному на станции 7440 спектру R_{rs}
в зависимости от начального значения концентрации $Xл_0$
Results of applying the GIOP algorithm to the R_{rs} spectrum measured at station 7440 as
a function of the initial value of Chl_0 concentration

$Xл-a_0$, мг/м ³	Результаты GIOP				
	b_{bp} , м ⁻¹	$Xл-a$, мг/м ³	$a_{dg}(443)$, м ⁻¹	$a_{pg}(443)$, м ⁻¹	$a_{ph}(443) / a_{pg}(443)$
0,2	0,0050	0,21	0,186	0,198	6 %
0,4	0,0051	0,33	0,178	0,197	9 %
0,6	0,0051	0,42	0,173	0,197	12 %
0,8	0,0051	0,49	0,170	0,197	14 %
1	0,0052	0,55	0,167	0,197	15 %
1,2	0,0052	0,60	0,165	0,198	16 %
1,4	0,0052	0,64	0,164	0,198	18 %
1,6	0,0053	0,68	0,162	0,199	19 %
1,8	0,0053	0,71	0,161	0,200	19 %
2	0,0054	0,74	0,160	0,200	20 %

регистрированного на одной из рассмотренных станций, ГИОР не позволяет оценивать вклад поглощения фитопланктоном с достаточной точностью. Это приводит к нецелесообразности использования данного класса алгоритмов для оценки Хл-*a* в водах, подверженных сильному влиянию речного стока. Полученные результаты подтверждают необходимость использования региональных алгоритмов для получения данных о концентрации хлорофилла-*a* в Карском море. Реализован численный метод определения Z_{90} , что может быть полезным для дальнейшего исследования влияния толщины поверхностного слоя Карского моря на определяемые по данным спутниковых сканеров цвета значения биооптических характеристик.

Финансирование

Гидрооптическое моделирование выполнено в рамках соглашения № 169-15-2023-002 в ходе реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ», анализ полученных результатов — в рамках государственного задания по теме № FMWE-2024-0015. Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Funding

Hydro-optical modeling was performed under Agreement No. 169-15-2023-002 in the course of implementation of the most important innovative project of state importance “Unified National System for Monitoring of Climate Active Substances”, analysis of the obtained results — under the state assignment on the topic No. FMWE-2024-0015. The grant was provided through the P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences.

Литература

1. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
2. Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Мошаров С.А., Демидов А.Б. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 21–31.
3. Салинг И.В., Вазюля С.В., Демидов А.Б., Глуховец Д.И. Модификация регионального алгоритма для расчета концентрации хлорофилла в Карском море // Труды XXX Юбилейного Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск.: ИОА СО РАН, 2024. С. С57–С60.
4. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / Под ред. О.В. Копелевича. М.: ИО РАН, 2018. 140 с.
5. Li J., Matsuoka A., Hooker S.B., Maritorena S., Pang X., Babin M. A tuned ocean color algorithm for the Arctic Ocean: a solution for waters with high CDM content // Optics Express. 2023. Vol. 31, N 23. P. 38494–38512. doi:10.1364/OE.500340
6. Lewis K.M., Arrigo K.R. Ocean color algorithms for estimating chlorophyll a, CDOM absorption, and particle back-scattering in the Arctic Ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2020. Vol. 125, N 6. P. e2019JC015706. doi:10.1029/2019JC015706
7. Зацепин А.Г., Завьялов П.О., Кременецкий В.В., Поярков С.Г., Соловьев Д.М. Поверхностный опресненный слой в Карском море // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 698–708.
8. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2020. Vol. 62, № 3. P. 364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Osadchiev A., Zabudkina Z., Rogozhin V., Frey D., Gordey A., Spivak E., Salyuk A., Semiletov I., Sedakov R. Structure of the Ob-Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation // Frontiers in Marine Science. 2023. Vol. 10. P. 1129331. doi:10.3389/fmars.2023.1129331
10. Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Артемьев В.А., Шеберстов С.В. Оптические характеристики вод Карского моря по судовым и спутниковым наблюдениям // Океанология. 2010. Т. 50, № 5. С. 716–729.
11. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Глуховец Д.И., Шевченко В.П., Белан Б.Д. 89-й рейс (1-й этап) научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией ТУ-134 “Оптик” в Карском море // Океанология. 2023. Т. 63, № 3. С. 492–495. doi:10.31857/S0030157423030073
12. Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В., Чикунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. 2009. Т. 49. С. 934–939.
13. Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017. № 5. С. 39–43.

14. Артемьев В.А., Таскаев В.Р., Григорьев А.В. Автономный прозрачномер ПУМ-200 // Материалы XVII международной научно-технической конференции «Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021)». М.: ИО РАН, 2021. С. 25–28.
15. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // Океанология. 2000. Т. 40, № 1. С. 148–155.
16. Mobley C.D. Light and water: radiative transfer in natural waters. San Diego: Academic Press, 1994. 592 p.
17. Loisel H., Morel A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination // Limnology and Oceanography. 1998. Vol. 43, N 5. P. 847–858. doi:10.4319/lo.1998.43.5.0847
18. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water II Integrating cavity measurements // Applied Optics. 1997. Vol. 36, N 33. P. 8710. doi:10.1364/AO.36.008710
19. Röttgers R., McKee D., Utschig C. Temperature and salinity correction coefficients for light absorption by water in the visible to infrared spectral region // Optics Express. 2014. Vol. 22, N 21. P. 25093–25108. doi:10.1364/OE.22.025093
20. Morel A., Antoine D., Gentili B. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // Applied Optics. 2002. Vol. 41, N 30. P. 6289. doi:10.1364/AO.41.006289
21. Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: Development and skill assessment of regional algorithms // Journal of Sea Research. 2017. Vol. 125. P. 1–17. doi:10.1016/j.seares.2017.05.004
22. Werdell P.J., Franz B.A., Bailey S.W., Feldman G.C., Boss E., Brando V.E., Dowell M., Hirata T., Lavender S.J., Lee Z.P., Loisel H., Maritorena S., Mélin F., Moore T.S., Smyth T.J., Antoine D., Devred E., d'Andon O.H.F., Mangin A. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // Applied Optics. 2013. Vol. 52, N10. P. 2019–2037. doi:10.1364/AO.52.002019
23. Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., Claustre H. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 31033–31044. doi:10.1029/98JC02712
24. Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Applied Optics. 1975. Vol. 14, N 2. P. 413–416.
25. Gordon H.R., Clark D.K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation // Applied Optics. 1980. Vol. 19, N 20. P. 3428–3430. doi:10.1364/AO.19.003428
26. Zaneveld J.R.V., Barnard A.H., Boss E. Theoretical derivation of the depth average of remotely sensed optical parameters // Optics Express. 2005. Vol. 13, N 22. P. 9052–9061. doi:10.1364/OPEX.13.009052
27. Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Golik I.A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay // Remote Sensing. 2023. Vol. 15, N 23. P. 5600. doi:10.3390/rs15235600

References

1. Lavrova O. Yu., Kostianoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina V.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas*. Moskva: IKI RAN; 2011. 480 p. (in Russian).
2. Kuznetsova O.A., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Mosharov S.A., Demidov A.B. Estimation of chlorophyll concentration in the Kara Sea from data of MODIS-aqua satellite scanner. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2013;5:21–31 (in Russian).
3. Saling I.V., Vazyulya S.V., Demidov A.B. Modification of a regional algorithm for calculating chlorophyll concentration in the Kara Sea. *Proceedings of the XXX International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics”*. Tomsk, IOA SB RAS, 2024: C57–C60 (in Russian).
4. Kopelevich O.V., Sahling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Karalli P.G., Yushmanova A.V. Biooptical characteristics of the seas washing the shores of the western half of Russia, according to satellite color scanners 1998–2017. *Moskva, IO RAN*, 2018. 140 p. (in Russian).
5. Li J., Matsuoka A., Hooker S.B., Maritorena S., Pang X., Babin M. A tuned ocean color algorithm for the Arctic Ocean: a solution for waters with high CDM content. *Optics Express*. 2023;31(23):38494–38512. doi:10.1364/OE.500340
6. Lewis K.M., Arrigo K.R. Ocean color algorithms for estimating chlorophyll a, CDOM absorption, and particle backscattering in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020;125(6): e2019JC015706. doi:10.1029/2019JC015706
7. Zatsepin A.G., Zavialov P.O., Kremenetskiy V.V., Poyarkov S.G., Soloviev D.M. The upper desalinated layer in the Kara Sea. *Oceanology*. 2010;50:657–667. doi:10.1134/S0001437010050036
8. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data. *Oceanologia*. 2020;62(3):364–373. doi:10.1016/j.oceano.2020.04.002
9. Osadchiv A, Zabudkina Z, Rogozhin V, Frey D, Gordey A, Spivak E, Salyuk A, Semiletov I, Sedakov R. Structure of the Ob-Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation. *Frontiers in Marine Science*. 2023;10:1129331.

doi:10.3389/fmars.2023.1129331

10. Burenkov V.I., Goldin Y.A., Artem'ev V.A., Sheberstov S.V. Optical characteristics of the Kara Sea derived from ship-borne and satellite data. *Oceanology*. 2010;50:675–687. doi:10.1134/S000143701005005X
11. Kravchishina M.D., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N., Glukhovets D.I., Shevchenko V.P., Belan B.D. Cruise 89 (First Leg) of the R/V Akademik Mstislav Keldysh: Climate Experiment in Interaction with the Tu-134 Optik Flying Laboratory. *Oceanology*. 2023;63:428–431. doi:10.1134/S0001437023030074
12. Pogosyan S.I., Durgaryan A.M., Konyuhov I.V., Chivkunova O.B., Merzlyak M.N. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity. *Oceanology*. 2009;49:866–871. doi:10.1134/S0001437009060125
13. Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Zajceva A.F., Pogosyan S.I. Measurement of sea water absorption factor using integrating sphere. *Light Engineering*. 2018;26(1):120–126. doi:10.33383/2016–079
14. Artemiev V.A., Taskaev V.R., Grigorev A.V. Autonomous transparency meter PUM-200. *Sovremennye Metody i Sredstva Okeanologicheskikh Issledovaniy (MSOI-2021)*. 2021:95–99 (in Russian).
15. Artemiev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I., Grigoriev A.V., Kopelevich O.V., Khrapko A.N. Sea-truth measurements of ocean color: A new floating spectroradiometer and its metrology. *Oceanology*. 2000;40:139–145.
16. Mobley C.D. *Light and water: radiative transfer in natural waters*. San Diego: Academic Press, 1994. 592 p.
17. Loisel H., Morel A. Light scattering and chlorophyll concentration in case 1 waters: A reexamination. *Limnology and Oceanography*. 1998;43(5):847–858. doi:10.4319/lo.1998.43.5.0847
18. Pope R.M., Fry E.S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water II Integrating cavity measurements. *Applied Optics*. 1997;36(33):8710. doi:10.1364/AO.36.008710
19. Röttgers R., McKee D., Utschig C. Temperature and salinity correction coefficients for light absorption by water in the visible to infrared spectral region. *Optics Express*. 2014;22(21):25093–25108. doi:10.1364/OE.22.025093
20. Morel A., Antoine D., Gentili B. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function. *Applied Optics*. 2002;41(30):6289. doi:10.1364/AO.41.006289
21. Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: Development and skill assessment of regional algorithms. *Journal of Sea Research*. 2017;125:1–17. doi:10.1016/j.seares.2017.05.004
22. Werdell P.J., Franz B.A., Bailey S.W., Feldman G.C., Boss E., Brando V.E., Dowell M., Hirata T., Lavender S.J., Lee Z.P., Loisel H., Maritorena S., Mélin F., Moore T.S., Smyth T.J., Antoine D., Devred E., d'Andon O.H.F., Mangin A. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. *Applied Optics*. 2013;52(10):2019–2037. doi:10.1364/AO.52.002019
23. Bricaud A., Morel A., Babin M., Allali K., Claustre H. Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll *a* concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models. *Journal of Geophysical Research*. 1998;103: 31033–31044. doi:10.1029/98JC02712
24. Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing. *Applied Optics*. 1975;14(2):413–416.
25. Gordon H.R., Clark D.K. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation. *Applied Optics*. 1980;19(20):3428–3430. doi:10.1364/AO.19.003428
26. Zaneveld J.R.V., Barnard A.H., Boss E. Theoretical derivation of the depth average of remotely sensed optical parameters. *Optics Express*. 2005;13(22):9052–9061. doi:10.1364/OPEX.13.009052
27. Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Golik I.A. Variations and Depth of Formation of Submesoscale Eddy Structures in Satellite Ocean Color Data in the Southwestern Region of the Peter the Great Bay. *Remote Sensing*. 2023;15(23):5600. doi:10.3390/rs15235600

Об авторах

ДЕРЯГИН Дмитрий Николаевич, младший научный сотрудник ИО РАН, аспирант Московского физико-технического института (национального исследовательского университета),

ORCID: 0000-0003-1893-8358, WoS ResearcherID: LNP-5769-2024, Scopus Author ID: 57960680800, e-mail: dmitriy.deryagin@phystech.su

ВАЗЮЛЯ Светлана Васильевна, старший научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0000-0001-7792-8489, WoS ResearcherID: G-1423-2014, Scopus Author ID: 6507188979, SPIN-код (РИНЦ): 6531-0345, e-mail: svershova@mail.ru

ГЛУХОВЕЦ Дмитрий Ильич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ИО РАН, доцент Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), ORCID: 0000-0001-5641-4227, WoS ResearcherID: AAE-9599-2019, Scopus AuthorID: 57193736311, SPIN-код (РИНЦ): 6755-2450, e-mail: glukhovets@ocean.ru