

УДК 551.464.797.9

© П. А. Салюк^{1*}, Д. И. Глуховец^{2,3}, А. Ю. Майор⁴, Н. А. Моисеева⁵, Е. А. Штрайхерт¹, А. А. Латушкин⁶,
Н. А. Липинская¹, И. А. Голик¹, С. А. Мошаров², М. И. Горбов¹, 2024

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, 690041, Россия, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, 36

³Московский физико-технический институт, 141700, Россия, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9

⁴Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, д. 5.

⁵Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, проспект Нахимова, д. 2.

⁶Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2

*psalyuk@poi.dvo.ru

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ЭМПИРИЧЕСКИХ БИООПТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» ИЗ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО ЦВЕТУ МОРЯ В ВОДАХ ВОКРУГ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА

Статья поступила в редакцию 27.05.2024, после доработки 20.09.2024, принята в печать 25.09.2024

Аннотация

Проанализированы особенности работы эмпирических биооптических алгоритмов в водах вокруг Антарктического полуострова на основе сравнения калиброванных данных судового проточного измерительного комплекса и спутниковых данных спектрорадиометра OLCI со спутников Sentinel-3A и Sentinel-3B в период антарктического лета в январе-феврале 2020 и 2022 гг. Показано, что стандартный биооптический алгоритм OC4 существенно занижает спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а (Хл-а) от ~1,5 до ~9 раз (в среднем в ~3,1 раза). Известный региональный алгоритм OC4-SO обеспечивает приемлемые ошибки оценки концентрации Хл-а и может быть использован для исследований, связанных с анализом концентрации Хл-а в водах вокруг Антарктического полуострова. Разработанный в данной работе новый региональный алгоритм OC4-AP имеет значительно меньшую ошибку по сравнению с известным стандартным и региональным алгоритмами. Он может быть использован в случае, если необходимо получить дистанционную оценку концентрации Хл-а, максимально приближенную к накопленному мировому опыту определения этой величины стандартными экстрактными спектрофотометрическим и флуориметрическим методами. Наблюдаемое занижение спутниковых оценок концентрации Хл-а по стандартному эмпирическому биооптическому алгоритму OC4 можно связать, как минимум, с тремя характерными для исследованной акватории причинами: малое относительное содержание ОРОВ, высокое содержание фикоэритрина и более сильный эффект упаковки пигментов в клетках фитопланктона по сравнению со средними значениями в Мировом океане.

Ключевые слова: эмпирический биооптический алгоритм, концентрация хлорофилла-а, коэффициент яркости моря, индекс цвета, показатель поглощения света, первичные гидрооптические характеристики, оптически-активные компоненты, атлантический сектор Южного океана, пролив Брансфилд, море Уэдделла

UDC 551.464.797.9

© P. A. Salyuk^{1*}, D. I. Glukhovets^{2,3}, A. Yu. Mayor⁴, N. A. Moiseeva⁵, E. A. Shtraikhert¹, A. A. Latushkin⁶,
N. A. Lipinskaya¹, I. A. Golik¹, S. A. Mosharov², M. I. Gorbov¹, 2024

¹V.I. Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 690041, Baltiyskaya Str., 43, Vladivostok, Russia

²Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nakhimovsky prospect, 36, Moscow, Russia

Ссылка для цитирования: Салюк П.А., Глуховец Д.И., Майор А.Ю., Моисеева Н.А., Штрайхерт Е.А., Латушкин А.А., Липинская Н.А., Голик И.А., Мошаров С.А., Горбов М.И. Особенности работы эмпирических биооптических алгоритмов для оценки концентрации хлорофилла «а» из спутниковых данных по цвету моря в водах вокруг Антарктического полуострова // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2024. Т. 17, № 3. С. 102–114. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-9

For citation: Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Mayor A. Yu., Moiseeva N.A., Shtraikhert E.A., Latushkin A.A., Lipinskaya N.A., Golik I.A., Mosharov S.A., Gorbov M.I. Features of Empirical Bio-Optical Algorithms for Estimating Chlorophyll-a Concentration from Satellite Ocean Color Data in Waters around the Antarctic Peninsula. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2024; 17(3):102–114. doi:10.59887/2073-6673.2024.17(3)-9

³Moscow Institute of Physics and Technology, 141700, Institutskiy pereulok, 9, Dolgoprudny, Russia

⁴Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 690041, Radio Str., 5, Vladivostok, Russia

⁵A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, 299011, Nakhimova prospect, 2, Sevastopol, Russia

⁶Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol, Russia

*psalyuk@poi.dvo.ru

FEATURES OF EMPIRICAL BIO-OPTICAL ALGORITHMS FOR ESTIMATING CHLOROPHYLL-A CONCENTRATION FROM SATELLITE OCEAN COLOR DATA IN WATERS AROUND THE ANTARCTIC PENINSULA

Received 27.05.2024, Revised 20.09.2024, Accepted 25.09.2024

Abstract

The features of the empirical bio-optical algorithm operation in the waters around the Antarctic Peninsula are analyzed based on a comparison of calibrated data from the shipborne flow fluorimeter and satellite data from the OLCI radiometer on Sentinel-3A and Sentinel-3B satellites during the Antarctic summers of January-February 2020 and 2022. It is shown that the standard OC4 bio-optical algorithm significantly underestimates satellite estimates of *Chl-a* concentration from ~1.5 to ~9 times (on average by a factor of ~3.1). The known regional OC4-SO algorithm provides acceptable errors of *Chl-a* concentration estimates and can be used for studies related to the analysis of *Chl-a* concentration in the waters around the Antarctic Peninsula. The developed in this work new regional algorithm OC4-AP has significantly lower error in comparison with the known standard and regional algorithms. It can be used if it is necessary to obtain a remote estimate of the concentration of *Chl-a*, as close as possible to the accumulated world experience in determining this value by standard extract spectrophotometric and fluorimetric methods. The observed underestimation of satellite estimates of *Chl-a* concentration using the standard empirical bio-optical OC4 algorithm can be attributed to at least three reasons typical for the studied water area: low relative CDOM content, high phycoerythrin content, and stronger effect of pigment packing in phytoplankton cells compared to the average values in the World Ocean.

Keywords: empirical bio-optical algorithm, chlorophyll-*a* concentration, remote-sensed reflectance, band ratio, light absorption coefficient, inherent optical properties, optically active components, Atlantic sector of the Southern Ocean, Bransfield Strait, Weddell Sea

1. Введение

Существует много результатов, подтверждающих, что стандартные эмпирические биооптические алгоритмы занижают оцениваемую концентрацию хлорофилла-*a* (Хл-*a*) из спутниковых данных в Южном океане [1–5]. Коэффициент занижения k , определяемый как отношение судовых измерений к спутниковым оценкам, обычно равен около 1,5–3 [3]. В отдельных случаях занижение может достигать десяти раз [4, 5]. При этом существуют исследования, в которых утверждается, что обнаруживаемое занижение связано с особенностью стандартного флуориметрического метода определения концентрации хлорофилла, который завышает получаемые значения в водах Южного океана [6] и более правильно в качестве опорного использовать метод жидкостной хроматографии (HPLC). Однако в этом вопросе нет консенсуса, поскольку есть также работы, в которых подтверждается, что спутниковые оценки концентрации Хл-*a* все равно значимо занижены относительно измерений HPLC [2,3], по крайней мере для отдельных районов Южного океана. В работе Ferreira A. с соавторами [3] построен региональный спутниковый биооптический алгоритм OC4-SO для вод, окружающих Антарктический полуостров, на основе сравнения спутниковых данных с измерениями HPLC, в котором коэффициент занижения меняется от примерно 1,2 до 2,5 в зависимости от концентрации Хл-*a*.

Отдельным вопросом является определение причин, которые приводят к занижению концентраций Хл-*a* при использовании стандартных биооптических алгоритмов. Среди них выделяют следующие: низкий удельный показатель поглощения света фитопланктоном (эффект «упаковки») [7–9] и низкое содержание окрашенных растворенных органических веществ (ОРОВ) в морской воде [8, 9]. Кроме этого, дополнительно исказить спектры коэффициентов яркости моря может низкое значение доли рассеяния света назад в общем рассеянии света за счет преобладания крупных клеток фитопланктона [10], наличие фикоэритрин-содержащих водорослей [11, 12] и малое количество минеральной взвеси [5]. Вопрос определения вклада каждого конкретного фактора в общее занижение концентрации Хл-*a* спутниковыми методами остается открытым. Скорее всего, влияние перечисленных факторов будет зависеть от района и сезона проведения измерений, а также от типа используемого биооптического алгоритма.

Цель данной работы состоит в анализе коэффициентов занижений спутниковых оценок концентрации Хл-*a*, полученных стандартным эмпирическим биооптическим алгоритмом, относительно контактных измерений в водах вокруг Антарктического полуострова, а также в анализе причин зарегистрированных занижений.

2. Материалы и методы

Основой для написания данной работы стали материалы комплексных биооптических исследований, полученные в 79-м (АМК79) и 87-м (АМК87) рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» в январе-феврале 2020 и 2022 гг. [13–15]. В рейсах проводился широкий перечень гидрооптических исследований, включая проточные измерения, in-situ профилирование, радиометрическое зондирование с борта судна, лабораторные измерения. Задача сравнения спутниковых и подспутниковых данных в Южном океане существенно осложняется частой облачностью, поэтому для получения достаточного количества точек для сравнения были использованы калиброванные данные проточного измерительного комплекса, которые позволяют получить большой объем данных за одну экспедицию.

В проточной системе измерялись спектры флуоресценции морской воды при возбуждении лазерным излучением на длинах волн 355 и 532 нм [16]. Из спектров рассчитывались интенсивности флуоресценции Хл-*a* (*Fchl*), фикоэритрина (*Fphy*) и растворенных органических веществ (РОВ) (*Fdom*), нормированные на интенсивность комбинационного рассеяния (КР) на молекулах воды излучения лазера 532 нм.

Измерения интенсивности флуоресценции Хл-*a* калибровались на прямые определения концентрации Хл-*a* флуориметрическим методом после фильтрации проб морской воды и экстрагирования [17] по формулам из [18]. При этом конечные полученные флуориметрические значения были пересчитаны на спектрофотометрические определения концентрации Хл-*a*, выполненные на спектрофотометре Shimadzu UV-2600 по формулам из [19]. В результате проведенных лабораторных измерений были получены значения концентрации Хл-*a* (*Chl*), а также сумма концентрации Хл-*a* и феофетина (*Tchl*), которая используется в биооптических моделях по оценке показателя поглощения света взвешенными частицами [20]. При сравнении значений *Fchl* с *Chl*, полученных в рейсе АМК79, коэффициент корреляции (*r*) составил 0,59 в доверительном интервале от $r_{1095} = 0,28$ до $r_{up95} = 0,79$ при 95 % уровне значимости, среднеквадратичное отклонение (СКО) равнялось 0,58 мг/м³. Для данных АМК87: $r = 0,81$, $r_{1095} = 0,66$, $r_{up95} = 0,90$, СКО = 0,36 мг/м³. При сравнении *Fchl* с *Tchl* для данных АМК79: $r = 0,64$, $r_{1095} = 0,36$, $r_{up95} = 0,82$, СКО = 0,72 мг/м³. Для данных АМК 87: $r = 0,85$, $r_{1095} = 0,73$, $r_{up95} = 0,92$, СКО = 0,38 мг/м³.

Дополнительно флуориметрические измерения F_{chl} и F_{dom} калибровались на показатели поглощения света взвешенными частицами (клетки фитопланктона и детрит), и ОРОВ на длине волны 443 нм ($a_p(443)$ и $a_g(443)$, соответственно). В рейсе АМК79 $a_p(443)$ и $a_g(443)$ определялись с помощью заполняемой интегрирующей сферы ICAM [21]. В рейсе АМК87 с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-2600 и 60 мм интегрирующей сферы показатель поглощения взвешенными частицами определялся на фильтрах по схеме Т-*R* в соответствии с протоколом ЮСССГ [22], а показатель поглощения ОРОВ определялся по стандартной двухлучевой схеме с применением 100 мм кювет в соответствии с протоколом ЮСССГ [23]. При сравнении *Fchl* с $a_p(443)$ для данных АМК79: $r = 0,88$, $r_{1095} = 0,86$, $r_{up95} = 0,98$, СКО = 0,01 м⁻¹. Для данных АМК87: $r = 0,83$, $r_{1095} = 0,63$, $r_{up95} = 0,93$, СКО = 0,015 м⁻¹. При сравнении *Fdom* с $a_g(443)$ для данных АМК79 $r = 0,68$, $r_{1095} = 0,31$, $r_{up95} = 0,87$, СКО = 0,012 м⁻¹. Для данных АМК87: $r = 0,58$, $r_{1095} = 0,21$, $r_{up95} = 0,80$, СКО = 0,026 м⁻¹.

Все приведенные значения корреляций статистически значимо отличаются от нуля при 95 % доверительном интервале. Невысокие значения коэффициентов корреляций для связи концентрации Хл-*a* с интенсивностью флуоресценции этого пигмента обусловлены влиянием различных факторов — условий освещения, изменчивости видового состава клеток фитопланктона и его физиологического состояния, а также присутствием фикоэритрина. В случае ОРОВ низкие значения коэффициентов детерминации связаны с малым содержанием желтого вещества в водах вокруг Антарктического полуострова и недостаточной чувствительностью спектрофотометрических измерений. Используемые в дальнейшем анализе характеристики, рассчитанные из флуориметрических измерений обозначены путем добавления индекса «flow» к каждой из переменных: Chl_{flow} , $Tchl_{flow}$, $a_{g_flow}(443)$, $a_{p_flow}(443)$, $Fphy_{flow}$.

В качестве спутниковых данных выбраны измерения спектрорадиометром OLCI на спутниках Sentinel-3A (S3A) и Sentinel-3B (S3B) за январь-февраль 2020 и 2022 гг, обработанные в соответствии с методиками NASA, которые были получены с веб-портала Ocean Color Web [24]. Использован второй уровень данных, содержащий значения коэффициентов яркости моря (*Rrs*) в видимом спектральном диапазоне. При этом в анализе использованы только те пиксели, которые проходят более строгий контроль качества

в соответствии с флагами качества третьего уровня: отсутствуют предупреждения сбоя атмосферной коррекции спутниковых данных, отсутствуют интенсивные солнечные блики, угол Солнца над горизонтом более 30 градусов, отсутствуют цветения кокколитофорид, отсутствуют околонулевые значения яркости восходящего излучения моря, отсутствуют сбои при расчете концентрации Хл-а, отсутствуют сбои в географической привязке. Из *Rrs* была определена спутниковая оценка концентрации Хл-а по стандартному алгоритму типа OC4 для OLCI [25,26] (Chl_{sat_OC4}):

$$MBR_{sat_OC4} = \max(Rrs(443), Rrs(490), Rrs(510)) / Rrs(560), \quad (1)$$

$$p_{OC4} = [0,42540; -3,21679; 2,86907; -0,62628; -1,09333], \quad (2)$$

$$\lg(Chl_{sat_OC4}) = \sum_{i=0}^4 p_{OC4} \cdot \lg(MBR_{sat_OC4})^i. \quad (3)$$

Кроме этого, была определена региональная спутниковая оценка концентрации Хл-а по алгоритму OC4-SO [3] ($Chl_{sat_OC4_SO}$), с учетом региональной связи между *Rrs*(560) и *Rrs*(555):

$$Rrs(555) = 1,082 Rrs(560), R^2 = 0,99, \quad (4)$$

$$MBR_{sat_OC4_SO} = \max(Rrs(443), Rrs(490), Rrs(510)) / Rrs(555), \quad (5)$$

$$p1 = [0,60159; -3,20262; 11,17268; -26,78898; 18,64112], \quad (6)$$

$$p3 = [0,63668; -1,94561; 0,15707; -0,5716], \quad (7)$$

$$w1 = (MBR_{sat_OC4_SO} - 3) / (5 - 3), \quad (8)$$

$$w3 = 1 - w1, \quad (9)$$

$$V1 = \sum_{i=0}^4 p1_i \cdot \lg(MBR_{sat_OC4_SO})^i, \quad (10)$$

$$V3 = \sum_{i=0}^3 p3_i \cdot \lg(MBR_{sat_OC4_SO})^i, \quad (11)$$

$$\lg(Chl_{sat_OC4_SO}) = \begin{cases} V1, & \text{если } MBR_{sat_OC4_SO} \leq 3 \\ w1 \cdot V1 + w3 \cdot V3, & \text{если } 3 > MBR_{sat_OC4_SO} > 5. \\ V3, & \text{если } MBR_{sat_OC4_SO} \geq 5 \end{cases} \quad (12)$$

Коэффициент пропорциональности между *Rrs*(560) и *Rrs*(555) в формуле (4) был получен на основе использования результатов прямых измерений спектров *Rrs* ручным радиометром ASD с борта судна в районе исследований во время рейсов АМК79 и АМК87.

Для определения региональной регрессии (OC4-AP) для вод, окружающих Антарктический полуостров, в качестве дистанционных измерений использовались значения MBR_{sat_OC4} , определенные по формуле (1). При этом вид алгоритма для оценки концентрации Хл-а имел следующий вид:

$$\lg(Chl_{sat_OC4_AP}) = \sum_{i=0}^1 p_{OC4_AP_i} \cdot \lg(MBR_{sat_OC4})^i, \quad (13)$$

$$p_{OC4_AP} = [-1,507; 0,6117], \quad (14)$$

где коэффициенты p_{OC4_AP} определены путем минимизации суммы квадратов отклонений между $\lg(Chl_{flow})$ и $\lg(Chl_{sat_OC4_AP})$.

Спутниковые и судовые данные сравнивались в пределах окружности радиусом 4 км относительно координат судовых измерений с максимально допустимой разницей между временем измерений 8 часов — в дальнейшем такая выборка данных обозначается, как квази-синхронные измерения. Разница в 8 часов от времени спутниковых измерений обеспечивала сравнение в пределах светового дня для летнего периода исследований. В качестве статистических метрик для сравнения спутниковых оценок концентрации Хл-а с опорными судовыми измерениями использовались следующие: *R2L* — коэффициент детерминации между логарифмами анализируемых величин; $bias\%_{mean}$ и $bias\%_{med}$ — среднее и медианное значение разницы спутниковых оценок и опорных измерений относительно опорных значений, в процентах; k_{mean} и k_{med} —

средний и медианный коэффициент занижения, равный отношению опорных измерений к спутниковым оценкам; $MAE\%$ — абсолютная ошибка спутниковых оценок относительно опорных значений, в процентах; $RMSE$ — среднеквадратичное отклонение между анализируемыми величинами.

Все расчеты и построение рисунков проведено в программном пакете MatLab.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Анализ калиброванных флуориметрических измерений

На рис. 1 представлено сравнение измеренных значений $Tchl$ и $a_p(443)$ для обоих рейсов. Также добавлена кривая $a_p(443)$, рассчитанная по модели (Bricaud и др., 1998) (B98) [20].

На рис. 1 видно, что полученные региональные линии находятся достаточно близко друг к другу в области разброса основного облака экспериментальных точек. При этом при заданной концентрации $Tchl$ значения $a_p(443)$, получаемые из экспериментальных регрессионных кривых, будут значимо ниже, чем значения $a_p(443)$, рассчитанные по модели B98. Это связано с тем, что модель B98 получена на основе измерений в центральной Атлантике и не включает точки из полярных областей. При этом в Южном океане может наблюдаться как более сильный эффект упаковки пигментов в клетках фитопланктона [7–9], так и меньшее содержание детрита по сравнению с водами центральной Атлантики [8, 27].

Проведенная калибровка данных проточного флуориметра позволяет построить пространственное распределение получаемых флуоресцентных характеристик в единицах концентрации Хл- a и показателя поглощения ОРОВ. Кроме этого, важной характеристикой для анализа особенностей работы спутниковых алгоритмов может быть содержание фикоэритрина, которое в данной работе оценивается через интенсивность флуоресценции в единицах КР воды. Для данного региона наличие фикоэритрина наиболее вероятно связано с наличием криптофитовых водорослей [28]. Соответствующие изображения представлены на рис. 2. По представленным пространственным распределениям видно, что несмотря на то, что рейсы АМК79 и АМК87 проводились в один и тот же сезон в январе и феврале, в 2022 году зарегистрированы более высокие значения показателей поглощения ОРОВ и практически полностью отсутствовали спектры со статистически значимыми интенсивностями флуоресценции фикоэритрина.

3.2 Сравнение контактных и дистанционных оценок концентрации Хл- a

На рис. 3 представлены диаграммы рассеяния между квази-синхронными судовыми измерениями Chl_{flow} и спутниковыми измерениями MBR_{sat_OC4} (рис. 3, а), и $MBR_{sat_OC4_SO}$ (рис. 3, б), накопленными за два рейса АМК79 и АМК87 в водах, прилегающих к Антарктическому полуострову. Также на рис. 3, в дана карта географического положения точек, использованных для сравнения. Существенное сокращение объема данных судовых измерений по сравнению с рисунками выше связано с редкостью квази-синхронных спутниковых данных, что обусловлено частой плотной облачностью над исследованным регионом.

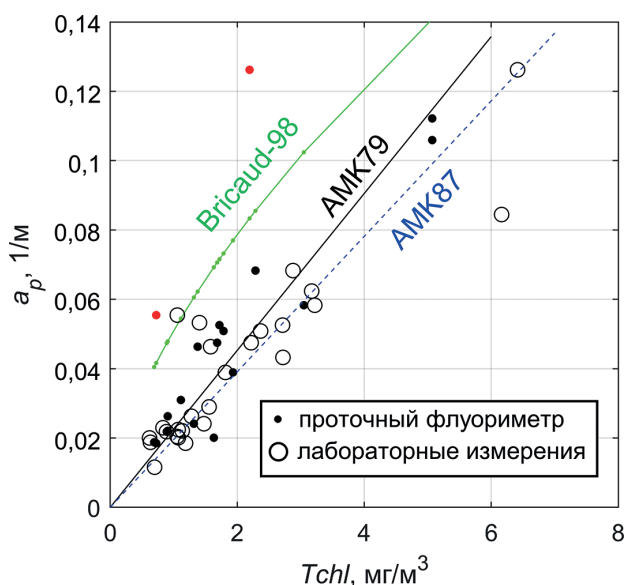


Рис. 1. Сравнение определений $a_p(443)$ и $Tchl$ различными методами по данным рейса АМК79. Сплошная черная линия — эмпирически полученная линейная регрессия пересчета данных $Tchl_{flow}$ в $a_{p_flow}(443)$ для рейса АМК79; пунктирная линия — то же для рейса АМК87; зеленая линия — рассчитанные значения $a_{p_flow_B98}(443)$ по модели (Bricaud и др., 1998) [20] из данных $Tchl_{flow}$. Сплошные точки — калиброванные измерения проточным флуориметром. Красные точки — статистические выбросы. Черные круги — стандартные измерения $a_p(443)$ и $Tchl$

Fig. 1. Comparison of $a_p(443)$ and $Tchl$ estimates by different methods for the AMK79 cruise data. Solid black line — empirically derived linear regression to calculate $a_{p_flow}(443)$ from $Tchl_{flow}$ for the AMK79 cruise; blue dashed line — same for the AMK87 cruise; green line — calculated values of $a_{p_flow_B98}(443)$ using the model (Bricaud et al., 1998) [20] from $Tchl_{flow}$ data. Solid dots are calibrated measurements with a flow fluorimeter. Red dots are statistical outliers. Black circles — $a_p(443)$ and $Tchl$ measurements using standard protocols

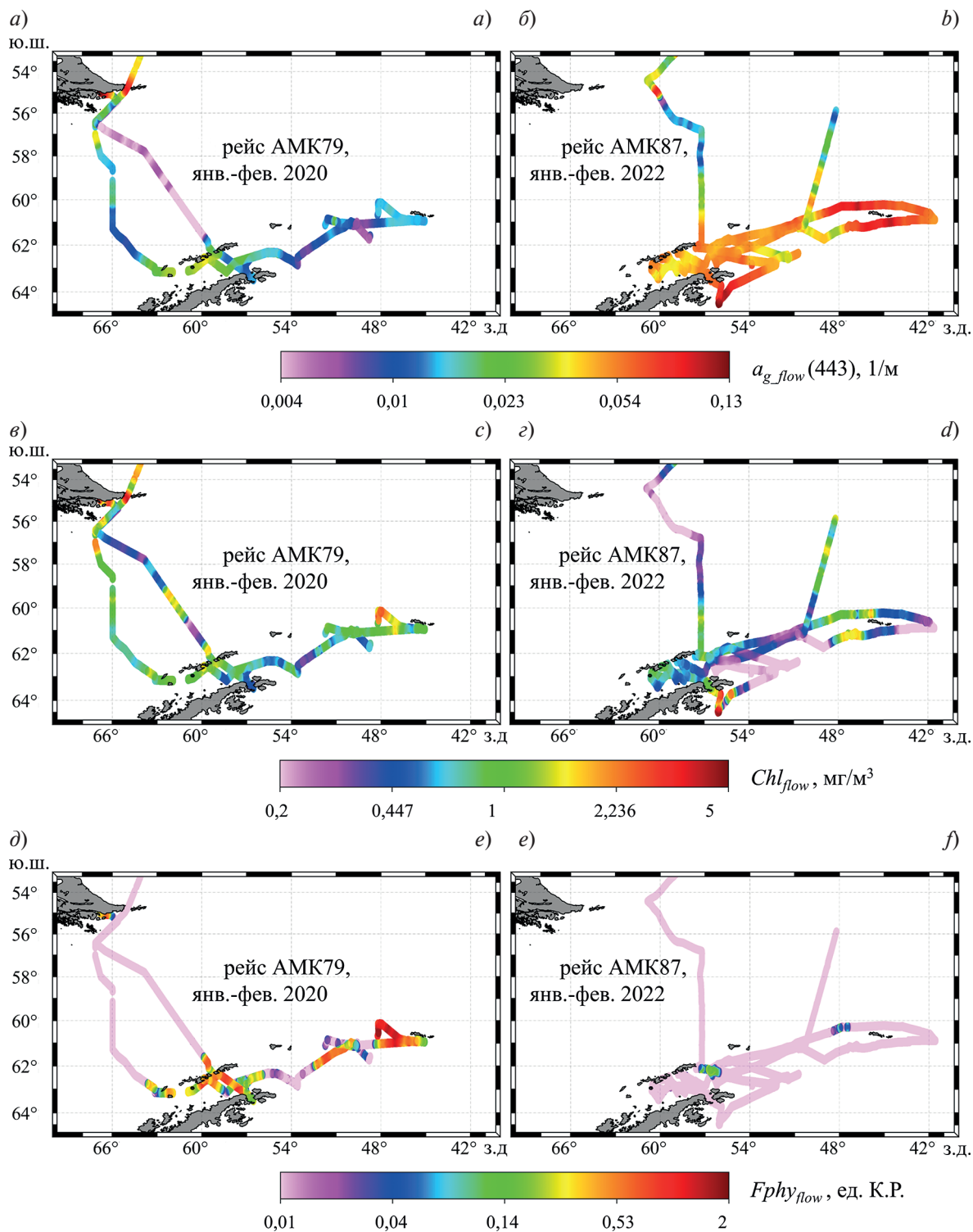


Рис. 2. Пространственное распределение биооптических характеристик, полученных из измерений проточного флуориметра: а, б — показатель поглощения света ОРОВ на 443 нм ($a_{g_flow}(443)$, 1/м); в, г — концентрация Хл-а (Chl_{flow} , мг/м³); д, е — интенсивность флуоресценции фикоэритрина ($Fphy_{flow}$, ед. К.Р.)

Fig. 2. Spatial distribution of bio-optical characteristics obtained from flow fluorimeter measurements: (a), (b) CDOM light absorption coefficient at 443 nm ($a_{g_flow}(443)$, 1/m); (c), (d) Chl-a concentration (Chl_{flow} , mg/m³); (e), (f) phycoerythrin fluorescence intensity ($Fphy_{flow}$, Raman Scattering (RS) units)

На рис. 3 видно, что регрессия стандартного биооптического алгоритма OC4 (формула (3), красный цвет) проходит ниже основного облака измеренных точек, что говорит о занижении стандартных спутниковых

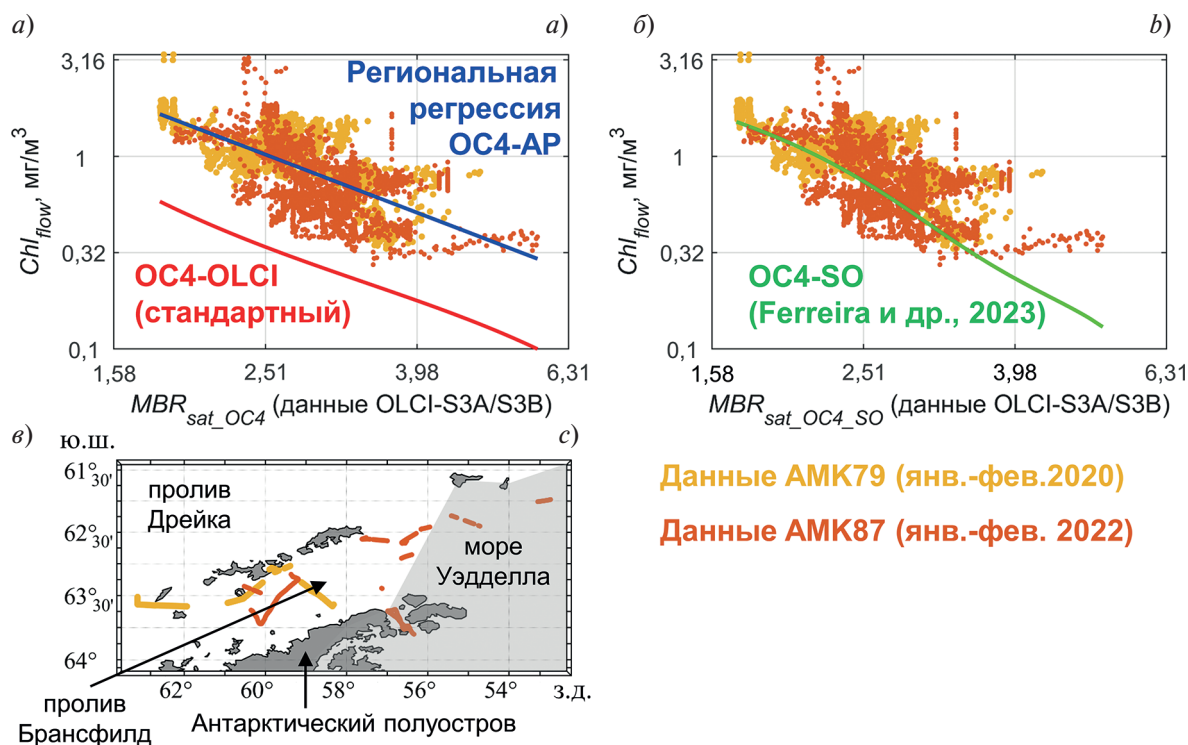


Рис. 3. Сравнение судовых измерений концентрации Хл-а (Chl_{flow}) и спутниковых измерений максимального значения индекса цвета (MBR): *a* — для стандартного алгоритма OC4 и региональной версии OC4-AP; *б* — для известного регионального алгоритма OC4-SO [3]; *в* — карта с местоположением квази-синхронных судовых и спутниковых измерений в районах около Антарктического полуострова

Fig. 3. Comparison of ship measurements of $Chl-a$ concentration (Chl_{flow}) and satellite measurements of maximum band ratio (MBR): (*a*) for the standard bio-optical algorithm OC4 and the regional version of the algorithm — OC4-AP; (*b*) for the well-known regional algorithm OC4-SO [3]; (*c*) map with the location of quasi-synchronous ship and satellite measurements in areas near the Antarctic Peninsula

оценок концентрации Хл-а. При этом региональный алгоритм OC4-SO (формула (12), зеленый цвет) намного лучше описывает экспериментально полученные данные. Для сравнения также показана полученная в данной работе региональная регрессия OC4-AP (формула (13), синий цвет).

В табл. 1 представлены статистические метрики, характеризующие качество работы трех рассматриваемых биооптических алгоритмов. Использование стандартного биооптического алгоритма OC4 приводит к существенному занижению спутниковых оценок концентраций Хл-а, примерно в три раза ниже опорных измерений. Региональный алгоритм OC4-SO [3] также занижает оценки примерно в 1,3 раза. Это может быть связано с особенностями стандартных определений концентрации Хл-а методом HPLC, который использовался для разработки данного алгоритма. По результатам ряда исследователей (например, [6]), в Южном океане использование стандартного экстракционного флуоресцентного метода может приводить к завышению оценок концентрации Хл-а за счет нестандартного соотношения Хл-а и хлорофилла-с. Разра-

Таблица 1

Table 1

Сравнение статистических метрик, характеризующих качество работы биооптических алгоритмов для оценки концентрации Хл-а из спутниковых данных спектрорадиометра OLCI

Comparison of statistical metrics characterising the quality of performance of bio-optical algorithms for estimating $Chl-a$ concentration from OLCI spectroradiometer satellite data

Алгоритм	$R2L$	$bias\%_{mean}$	$bias\%_{med}$	k_{mean}	k_{med}	$MAE\%$	$RMSE$
OC4	0,51	-64,4	-67,1	3,11	3,05	64,4	0,74
OC4-SO	0,48	-17,1	-19,1	1,37	1,24	28,5	0,36
OC4-AP	0,50	5,2	-3,5	1,05	1,04	26,3	0,29

ботанный в данной работе региональный алгоритм OC4-AP имеет значимо меньшие ошибки чем OC4-SO и OC4 для использованного экспериментального массива данных. Этот алгоритм может быть использован в случае, если необходимо получить дистанционную оценку концентрации Хл-а максимально приближенную к накопленному мировому опыту использования стандартных экстрактивных спектрофотометрического и флуориметрического методов.

3.3. Анализ причин занижения спутниковых оценок концентрации Хл-а

Проанализированы биооптические причины, которые приводят к заниженным спутниковым оценкам концентрации Хл-а при использовании стандартного глобального алгоритма OC4 в водах вокруг Антарктического полуострова. На рис. 4 представлены диаграммы рассеяния, по которым можно судить о биооптических особенностях судовых данных, квази-синхронно полученных с качественными спутниковыми данными. Для квази-синхронной выборки, также как и для общих данных, представленных на рис. 2, в рейсе АМК79 наблюдалось меньшее содержание ОРОВ при большем содержании фикоэритрина, который в данном районе является признаком наличия криптофитовых водорослей. Общая значимая линейная связь между Chl_{flow} и $a_{g_flow}(443)$, а также между соленостью и $a_{g_flow}(443)$ отсутствует. При этом в отдельных районах образуются кластеры со значимой линейной связью между данными величинами. Это говорит о наличии разных типов ОРОВ или ОРОВ, находящихся на разных стадиях деградации в районе исследований, и может быть причиной увеличения дисперсии данных при сравнении контактных и дистанционных оценок концентрации Хл-а, представленных на рис. 4.

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента занижения спутниковой оценки концентрации Хл-а по стандартному алгоритму OC4 ($k = Chl_{flow} / Chl_{sat_OC4}$) от трех возможных факторов. Видно, что коэффициент занижения может находиться в диапазоне 1,5–9 раз, и в соответствии с табл. 1 его среднее значение равно примерно 3,1 раза.

Можно выделить три причины, которые приводят к занижению спутниковых оценок концентрации Хл-а стандартным алгоритмом:

1) Уменьшение доли ОРОВ в показателе поглощения света. Коэффициент занижения k зависит от изменения отношения показателя поглощения ОРОВ к показателю поглощения взвешенными частицами (a_{g_flow} / a_{p_flow}) и достигает максимальных значений при минимальной доле ОРОВ (рис. 5, а).

2) Более сильный эффект упаковки пигментов клеток фитопланктона по сравнению с неполярными районами Мирового океана. Коэффициент занижения увеличивается при уменьшении абсолютной разницы между измеренным значением показателя поглощения взвешенными частицами $a_{p_flow}(443)$ и рассчитанным значением $a_{p_flow_B98}(443)$ по стандартной модели [20], построенной по измерениям в центральной Атлантике (рис 5, б).

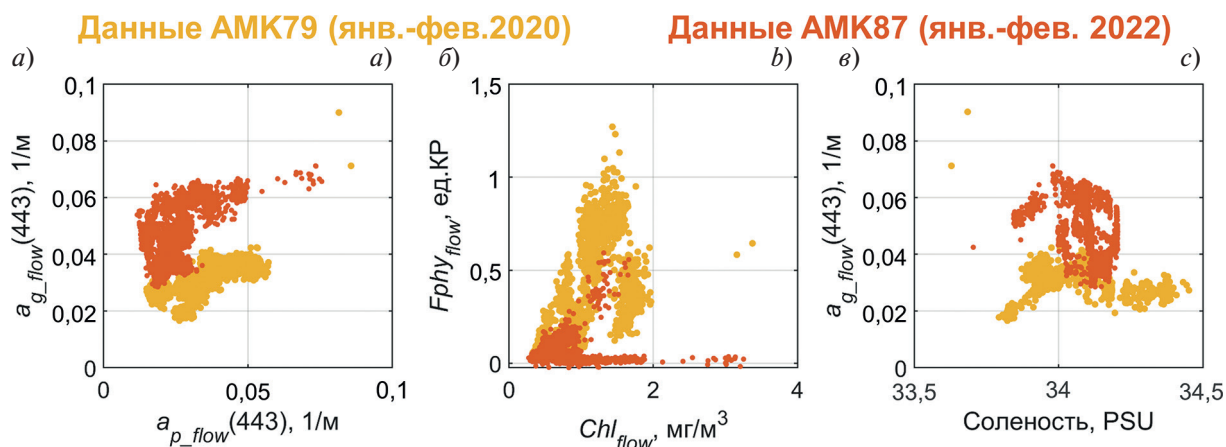


Рис. 4. Диаграммы рассеяния биооптических и гидрологических характеристик, полученных из судовых данных квази-синхронно со спутниковыми измерениями

Fig. 4. Scatter plots of bio-optical and hydro-physical characteristics derived from shipboard data acquired quasi-synchronously with satellite measurements

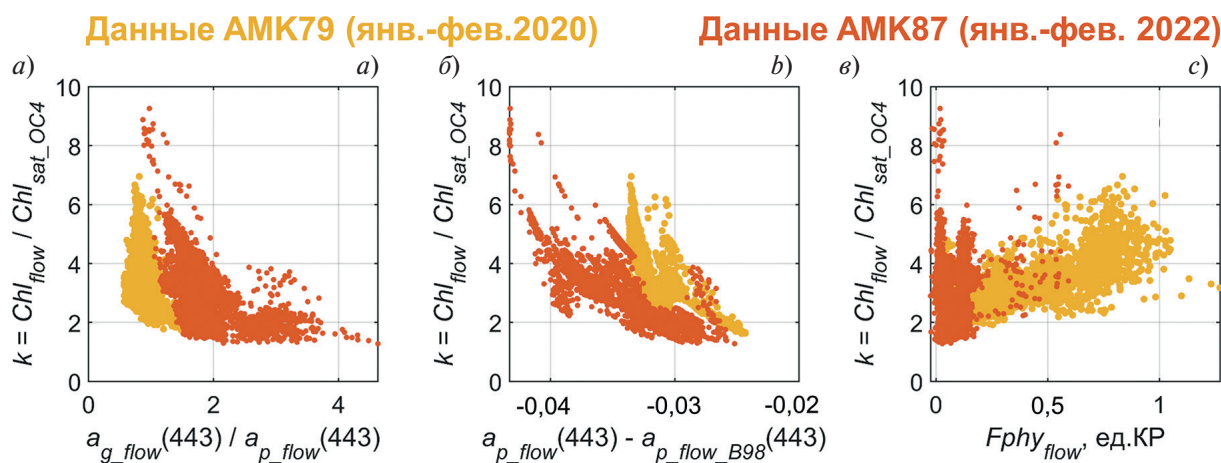


Рис. 5. Анализ причин занижения спутниковых оценок концентрации Хл-а стандартным алгоритмом: *a* — фактор малой доли поглощения ОРОВ относительно поглощения взвесью (в основном фитопланктон); *б* — фактор меньшего поглощения взвесью относительно стандартных значений для неполярных районов; *в* — фактор увеличенного содержания фикоэритрина

Fig. 5. Analysis of the reasons for underestimation of satellite estimates of Chl-a concentration by the standard algorithm: (a) the factor of small fraction of absorption by CDOM relative to the absorption by particulate matter (mainly phytoplankton); (b) the factor of smaller absorption by particulate matter relative to standard values for non-polar regions; (c) the factor of increased phycoerythrin content

3) Увеличение содержания фикоэритрина (признак наличия криптофитовых водорослей для данного района исследований [28]). В случае относительно высоких значений $F\text{phy}_{\text{flow}}$ наблюдается повышение коэффициента занижения (рис. 5, в). В работе [12] также получен вывод о влиянии фикоэритрина на занижение дистанционных оценок концентрации Хл-а, полученных по квазианалитическому алгоритму GIOP путем модельных исследований в пакете Hydrolight. В представленной работе аналогичный вывод получен на основе экспериментальных результатов для эмпирического алгоритма вида OC4. По всей видимости, в данном случае важным является положение максимума поглощения света фикоэритрином в диапазоне 550–560 нм. Этот диапазон используется в стандартных эмпирических алгоритмах для нормировки коэффициентов яркости моря Rrs . Больше поглощение в диапазоне 550–560 нм приводит к уменьшению Rrs в этом же спектральном диапазоне [29], и соответственно, к завышению значений MBR (см. формулы (1), (5)) и занижению оценок концентраций Хл-а (см. формулы (3), (12), (13)).

4. Заключение

Проанализировано качество работы биооптических алгоритмов вида OC4 [26] для оценки концентрации Хл-а в водах вокруг Антарктического полуострова из данных спектрорадиометра OLCI со спутников Sentinel-3A и Sentinel-3B. Показано, что:

- Стандартный биооптический алгоритм OC4 существенно занижает спутниковые оценки концентрации Хл-а от ~1,5 до ~9 раз (в среднем в ~3,1 раза).
- Известный региональный алгоритм OC4-SO [3], разработанный на основе сравнения с концентрациями Хл-а, определенных методом HPLC, обеспечивает приемлемые ошибки оценки концентрации Хл-а и может быть использован в качестве основного при всевозможных исследованиях, связанных с анализом концентрации Хл-а в водах вокруг Антарктического полуострова.
- Разработанный на основе данных судовых измерений региональный алгоритм OC4-AP имеет значительно меньшую ошибку по сравнению с известным стандартным и региональным алгоритмом и также может быть использован в случае, если необходимо получить дистанционную оценку концентрации Хл-а, максимально приближенную к накопленному мировому опыту использования стандартных экстрактивных спектрофотометрического и флуориметрического методов.

Наблюдаемое занижение спутниковых оценок концентрации Хл-а по стандартному эмпирическому биооптическому алгоритму OC4 можно связать, как минимум, с тремя причинами: малое относительное содержание ОРОВ, более сильный эффект упаковки пигментов в клетках фитопланктона по сравнению со средними значениями в Мировом океане, а также высокое содержание фикоэритрина. При этом нельзя

выделить универсального объяснения, поскольку биооптические особенности вод, окружающих Антарктический полуостров неоднородны. Присутствуют разные источники ОРОВ, находящегося на разных стадиях деградации. В фитопланктонных сообществах наблюдается различный по силе эффект упаковки пигментов клеток фитопланктона. Доминируют различные виды фитопланктона, включая водоросли, содержащие фикоэритрин.

Финансирование

Работы выполнены в рамках государственного задания ТОИ ДВО РАН № 124022100080-0 (создание биооптических алгоритмов и моделей) и № 124042300003-5 (разработка метода обработки данных проточного флуориметра); ИО РАН № FMWE-2024-0015 (адаптация метода ICAM, определение концентрации Хл-а); ИАПУ ДВО РАН № FFWF-2021-0001 (разработка проточного флуориметра); ИнБЮМ РАН № 124030100106-2 (получение первичных гидрооптических характеристик методом ICAM); МГИ РАН № FNNN-2024-0012 (получение судовых данных).

Funding

The research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation: State tasks of POI FEB RAS No. 124022100080-0 (development of bio-optical algorithms and models) and No. 124042300003-5 (development of the method for processing flow fluorimeter data), SIO RAS No. FMWE-2024-0015 (adaptation of the ICAM method, determination of Chl-a concentrations), IACP FEB RAS No. FFWF-2021-0001 (development of the flow fluorimeter), IBSS RAS No. 124030100106-2 (acquisition of inherent optical properties by ICAM method), MHI RAS No. FNNN-2024-0012 (acquisition of ship data).

Литература

1. *Churilova T., Moiseeva N., Skorokhod E. et al.* 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) // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, N 3. Art. № 634. P. 1–24. doi:10.3390/rs15030634
2. *Pereira E.S., Garcia C.A.E.* Evaluation of Satellite-Derived MODIS Chlorophyll Algorithms in the Northern Antarctic Peninsula // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018. Vol. 149. P. 124–137. doi:10.1016/j.dsr2.2017.12.018
3. *Ferreira A., Brito A.C., Mendes C.R.B. et al.* OC4-SO: A New Chlorophyll-a Algorithm for the Western Antarctic Peninsula Using Multi-Sensor Satellite Data // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, N 5. Art. № 1052. P. 1–24. doi:10.3390/rs14051052
4. *Zeng C., Xu H., Fischer A.* Chlorophyll-a Estimation Around the Antarctica Peninsula Using Satellite Algorithms: Hints from Field Water Leaving Reflectance // *Sensors*. 2016. Vol. 16, N 12. Art. № 2075. P. 1–14. doi:10.3390/s16122075
5. *Szeto M., Werdell P.J., Moore T.S., Campbell J.W.* Are the World's Oceans Optically Different? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. Vol. 116, N C7. Art. № C00H04. P. 1–14. doi:10.1029/2011JC007230
6. *Moutier W., Thomalla S., Bernard S. et al.* Evaluation of Chlorophyll-a and POC MODIS Aqua Products in the Southern Ocean // *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. № 15. Art. № 1793. P. 1–18. doi:10.3390/rs11151793
7. *Jena B.* The effect of phytoplankton pigment composition and packaging on the retrieval of chlorophyll-a concentration from satellite observation in the Southern Ocean // *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol. 38. P. 3763–3784. doi:10.1080/01431161.2017.1308034
8. *Uitz J., Roesler C., Organelli E. et al.* Characterization of Bio-Optical Anomalies in the Kerguelen Region, Southern Indian Ocean: A Study Based on Shipborne Sampling and BioGeoChemical-Argo Profiling Floats // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2023. Vol. 128, № 12. Art. № e2023JC019671. P. 1–33. doi:10.1029/2023JC019671
9. *Reynolds R.A., Stramski D., Mitchell B.G.* A Chlorophyll-dependent Semianalytical Reflectance Model Derived from Field Measurements of Absorption and Backscattering Coefficients within the Southern Ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001. Vol. 106, N C4. P. 7125–7138. doi:10.1029/1999JC000311
10. *Dierssen H.M., Smith R.C.* Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2000. Vol. 105, N C11. P. 26301–26312. doi:10.1029/1999JC000296
11. *Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Moiseeva N.A. et al.* Phycoerythrin influence on the optical characteristics of seawater in the Atlantic sector of the Southern Ocean // *Proceedings of SPIE*. 2020. Vol. 11560. Art. № 1156056. P. 1–6. doi:10.1117/12.2575813
12. *Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Moiseeva N.A.* Modeling the remote sensing reflectance spectra taking into account the absorption of phycoerythrin // *Proceedings of SPIE*. 2023. Vol. 12780. Art. № 127804H. P. 1–5. doi:10.1117/12.2692573

13. Морозов Е.Г., Флинт М.В., Спиридонов В.А., Тараканов Р.Ю. Программа комплексных экспедиционных исследований экосистемы атлантического сектора Южного океана (декабрь 2019 г. — март 2020 г.) // *Океанология*. 2019. Т. 59, № 6. С. 1086–1088. doi:10.31857/S0030-15745961086-1088
14. Морозов Е.Г., Флин М.В., Орлов А.М. и др. Гидрофизические и экосистемные исследования в атлантическом секторе Антарктики (87-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2022. Т. 62, № 5. С. 825–827. doi:10.31857/S003015742205015X
15. Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Салюк П.А., Пономарев В.И., Артемьев В.А., Глуховец Д.И., Латушкин А.А. Распределение содержания хлорофилла-а в Атлантическом океане в декабре 2019 г — январе 2020 г. по данным судовых измерений при различных гидрометеорологических условиях // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 97–113. doi:10.59887/fpg/9rxr-badt-2vde
16. Майор А.Ю., Павлов А.Н., Букин О.А. Лазерный флуориметр. Патент на полезную модель RU108844 U1, 27.09.2011. Заявка № 2011113077/28 от 05.04.2011.
17. UNESCO Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements; IOC Manuals and Guides; UNESCO.; UNESCO: Paris, France, 1994;
18. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a Determination: Improvements in Methodology // *Oikos*. 1978. Vol. 30, N 3. P. 438–447. doi:10.2307/3543338
19. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochimie und Physiologie der Pflanzen*. 1975. Vol. 167, N 2. P. 191–194. doi:10.1016/S0015-3796(17)30778-3
20. 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: Oceans*. 1998. Vol. 103, N C13. P. 31033–31044. doi:10.1029/98JC02712.
21. Глуховец Д.И., Шеберстов О.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.
22. Boss E., D'Sa E.J., Freeman S. et al. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient (v 1.0); / Neeley A.R., Mannino A., Eds. // *Ocean Optics & Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. IOCCG: Dartmouth, Canada. 2018. Vol. 1. 86 p.
23. Mannino A., Novak M.G., Nelson N.B. et al. Measurement Protocol of Absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and Other Dissolved Materials (DRAFT) / Mannino A., Novak M.G., Eds. // *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*; IOCCG: Dartmouth, Canada. 2019. Vol. 5.
24. NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 15.09.2024)
25. NASA Earthdata. Algorithm Publication Tool. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/chlor_a/ (дата обращения: 15.09.2024). doi:10.5067/JCQB8QALDOYD
26. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll Algorithms for Ocean Color Sensors — OC4, OC5 & OC6 // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 229. P. 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021
27. Sosik H.M., Vernet M., Mitchell B.G. A Comparison of Particulate Absorption Properties between High and Mid-Latitude Surface Waters // *Antarctic Journal of the United States*. 1992. Vol. 27, N 5. P. 162–164.
28. Sapozhnikov P.V., Kalinina O.Y., Morozova T.V. Phytoplankton Communities of the Powell Basin in the Summer of 2020 / In: Morozov, E.G., Flint, M.V., Spiridonov, V.A. (eds) // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Advances in Polar Ecology*. 2021. Vol. 6. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_21
29. Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H. A semianalytic radiance model of ocean color // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988. Vol. 93, N D9. P. 10909–10924. doi:10.1029/JD093iD09p10909

References

1. Churilova T., Moiseeva N., Skorokhod E. et al. 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). *Remote Sensing*. 2023;15(3):634, 1–24. doi:10.3390/rs15030634
2. Pereira E.S., Garcia C.A.E. Evaluation of Satellite-Derived MODIS Chlorophyll Algorithms in the Northern Antarctic Peninsula. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2018;149:124–137. doi:10.1016/j.dsr2.2017.12.018
3. Ferreira A., Brito A.C., Mendes C.R.B. et al. OC4-SO: A New Chlorophyll-a Algorithm for the Western Antarctic Peninsula Using Multi-Sensor Satellite Data. *Remote Sensing*. 2022; 14(5):1052, 1–24. doi:10.3390/rs14051052
4. Zeng C., Xu H., Fischer A. Chlorophyll-a Estimation Around the Antarctica Peninsula Using Satellite Algorithms: Hints from Field Water Leaving Reflectance. *Sensors*. 2016;16(12): 2075, 1–14. doi:10.3390/s16122075

5. Szeto M., Werdell P.J., Moore T.S., Campbell J.W. Are the World's Oceans Optically Different? *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011;116(C7): C00H04, 1–14. doi:10.1029/2011JC007230
6. Moutier W., Thomalla S., Bernard S. et al. Evaluation of Chlorophyll-a and POC MODIS Aqua Products in the Southern Ocean. *Remote Sensing*. 2019, 11(15), 1793, 1–18. doi:10.3390/rs11151793
7. Jena B. The effect of phytoplankton pigment composition and packaging on the retrieval of chlorophyll-a concentration from satellite observation in the Southern Ocean. *International Journal of Remote Sensing*. 2017;38:3763–3784. doi:10.1080/01431161.2017.1308034
8. Uitz J., Roesler C., Organelli E. et al. Characterization of Bio-Optical Anomalies in the Kerguelen Region, Southern Indian Ocean: A Study Based on Shipborne Sampling and BioGeoChemical-Argo Profiling Floats. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2023;128(12): e2023JC019671, 1–33. doi:10.1029/2023JC019671
9. Reynolds R.A., Stramski D., Mitchell B.G. A Chlorophyll-dependent Semianalytical Reflectance Model Derived from Field Measurements of Absorption and Backscattering Coefficients within the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2001;106(C4):7125–7138. doi:10.1029/1999JC000311
10. Dierssen H.M., Smith R.C. Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2000;105(C11):26301–26312. doi:10.1029/1999JC000296
11. Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Moiseeva N.A. et al. Phycoerythrin influence on the optical characteristics of seawater in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Proceedings of SPIE*. 2020, 11560, 1156056, 1–6. doi:10.1117/12.2575813
12. Glukhovets D.I., Salyuk P.A., Moiseeva N.A. Modeling the remote sensing reflectance spectra taking into account the absorption of phycoerythrin. *Proceedings of SPIE*. 2023, 12780, 127804H, 1–5. doi:10.1117/12.2692573
13. Morozov E.G., Flint M.V., Spiridonov V.A., Tarakanov R.Y. Multidisciplinary Program Of Field Studies Of The Ecosystem In The Atlantic Sector Of The Southern Ocean (December 2019–March 2020). *Oceanology*. 2019, 59(6), 989–991. doi:10.1134/S0001437019060134
14. Morozov E.G., Flint M.V., Orlov A.M. et al. Oceanographic and Ecosystem Studies In The Atlantic Sector Of Antarctica (Cruise 87 Of The Research Vessel Akademik Mstislav Keldysh). *Oceanology*. 2022, 62(5), 721–723. doi:10.1134/S0001437022050150
15. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., Salyuk P.A. et al. The Chlorophyll-a Content Distribution in the Atlantic Ocean in December 2019 — January 2020 according to Ship Measurements at the Different Hydrometeorological Conditions. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15(3), 97–113. doi:10.59887/fpg/9rxr-badt-2vde (in Russian).
16. Major A. Yu., Pavlov A.N., Bukin O.A. Laser fluorimeter. Patent for utility model RU108844 U1, 09.27.2011. Application No. 2011113077/28 dated 04/05/2011 (in Russian).
17. UNESCO Protocols for the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS) Core Measurements; IOC Manuals and Guides; UNESCO.; UNESCO: Paris, France, 1994.
18. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a Determination: Improvements in Methodology. *Oikos*. 1978, 30(3), 438–447. doi:10.2307/3543338
19. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*. 1975, 167(2), 191–194. doi:10.1016/S0015-3796(17)30778-3
20. 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: Oceans*. 1998, 103(C13), 31033–31044. doi:10.1029/98JC02712
21. 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
22. Boss E., D'Sa E.J., Freeman S. et al. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Absorption Coefficient (v 1.0); / Neeley A.R., Mannino A., Eds. *Ocean Optics & Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*. IOCCG: Dartmouth, Canada. 2018, 1.
23. Mannino A., Novak M.G., Nelson N.B. et al. Measurement Protocol of Absorption by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) and Other Dissolved Materials (DRAFT) / Mannino A., Novak M.G., Eds. *IOCCG Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation*; IOCCG: Dartmouth, Canada. 2019, 5.
24. NASA Ocean Color. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> (access date: 15.09.2024)
25. NASA Earthdata. Algorithm Publication Tool. URL: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/chlor_a/ (access date: 15.09.2024). doi:10.5067/JCQB8QALDOYD
26. O'Reilly J.E., Werdell P.J. Chlorophyll Algorithms for Ocean Color Sensors — OC4, OC5 & OC6. *Remote Sensing of Environment*. 2019, 229, 32–47. doi:10.1016/j.rse.2019.04.021

27. Sosik H.M., Vernet M., Mitchell B.G. A Comparison of Particulate Absorption Properties between High and Mid-Latitude Surface Waters. *Antarctic Journal of the United States*. 1992, 27(5), 162–164.
28. Sapozhnikov P.V., Kalinina O.Y., Morozova T.V. Phytoplankton Communities of the Powell Basin in the Summer of 2020 / In: Morozov, E.G., Flint, M.V., Spiridonov, V.A. (eds). *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Advances in Polar Ecology*. 2021, 6. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-030-78927-5_21
29. Gordon H.R., Brown O.B., Evans R.H. A semianalytic radiance model of ocean color. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 1988, 93(D9), 10909–10924. doi:10.1029/JD093iD09p10909

Об авторах

- САЛЮК Павел Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией ФГБУН ТОИ ДВО РАН, ORCID: 0000-0002-3224-710X, Scopus AuthorID: 9737122900
WoS ResearcherID: E-8592-2014 SPIN-код (РИНЦ): 1454–3891, e-mail: pavel.salyuk@gmail.com
- 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, Scopus AuthorID: 57193736311,
SPIN-код (РИНЦ): 6755–2450, e-mail: glukhovets@ocean.ru
- МАЙОР Александр Юрьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник ИАПУ ДВО РАН, ORCID: 0000-0002-3562-3078, Scopus AuthorID: 7004476231, WoS ResearcherID: Q-3232-2016,
WoS ResearcherID: IWU-7669-2023 SPIN-код (РИНЦ): 1453-1568, e-mail: mayor@iacp.dvo.ru
- МОИСЕЕВА Наталия Александровна, научный сотрудник лаборатории фотосинтеза и биооптики ФИЦ ИнБЮМ, ORCID: 0000-0003-1356-7981, Scopus AuthorID: 57194431032,
WoS ResearcherID: AAN-2819-2019, SPIN-код (РИНЦ): 8946-3315, e-mail: nataliya-moiseeva@yandex.ru
- ШТРАЙХЕРТ Елена Аркадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник ФГБУН ТОИ ДВО РАН, ORCID: 0000-0001-5989-8300, Scopus AuthorID: 6508136408,
WoS ResearcherID: AAF-8788-2021, e-mail: straj@poi.dvo.ru
- ЛАТУШКИН Александр Александрович, кандидат географических наук, научный сотрудник МГИ РАН, ORCID ID: 0000-0002-3412-7339, Scopus Author ID: 56298305600, WoS ResearcherID: U-8871-2019,
SPIN-код (РИНЦ): 1239-2858, e-mail: sevssalat@gmail.com
- ЛИПИНСКАЯ Надежда Александровна, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник ФГБУН ТОИ ДВО РАН, ORCID: 0000-0002-3177-4426,
Scopus AuthorID: 57220162152, WoS ResearcherID: AGE-0831-2022, SPIN-код (РИНЦ): 2826-5686,
e-mail: ef.na.hc@gmail.com
- ГОЛИК Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник ФГБУН ТОИ ДВО РАН, ORCID: 0000-0002-8943-714X, Scopus AuthorID: 36720288800, WoS ResearcherID: Z-1730-2019,
SPIN-код (РИНЦ): 5282-4384, e-mail: primorochka@mail.ru
- МОШАРОВ Сергей Александрович, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ИО РАН, ORCID: 0000-0002-0055-8982, Scopus AuthorID: 6506209324, WoS ResearcherID: O-2565-2013,
SPIN-код (РИНЦ): 9239-1256, e-mail: sampost@list.ru
- ГОРБОВ Максим Иванович, инженер ФГБУН ТОИ ДВО РАН, ORCID: 0009-0001-0057-0869,
e-mail: maxgorbov@mail.ru