

УДК 504.064.37

РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ФОТИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОКАЗАТЕЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ НАПРАВЛЕННОГО СВЕТА НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА

© 2023 г. А. А. Латушкин^{1, *}, П. А. Салюк^{2, 3}, В. В. Суслин¹, О. В. Мартынов¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Владивосток, Россия

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: sevsalat@gmail.com

Поступила в редакцию 01.12.2022 г.

После доработки 20.02.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2023 г.

Предложена методика построения регионального алгоритма расчета толщины фотического слоя по *in situ* измерениям вертикальных профилей показателя ослабления направленного света при условии однопараметричности оптических свойств воды (воды первого типа). С использованием предложенной методики разработан региональный алгоритм определения толщины фотического слоя по результатам синхронных измерений профилей показателя ослабления направленного света и фотосинтетически активной радиации, выполненных в январе–феврале 2022 г. в рамках 87 рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” для северо-западной части моря Уэдделла. Для этого региона получено уравнение, позволяющее оценить толщину фотического слоя с относительной ошибкой восстановления 18%.

Ключевые слова: Антарктический полуостров, региональный алгоритм, показатель ослабления направленного света, толщина фотического слоя, фотическая глубина, Южный океан

DOI: 10.31857/S0030157423040081, EDN: YLURZK

ВВЕДЕНИЕ

Для целого ряда работ как прикладного, так и научного характера в период экспедиционных исследований, проводимых гидрооптиками, гидробиологами, экологами и другими специалистами, необходима оперативная оценка толщины фотического слоя (Z_{eu}) для конкретной станции [2–4, 8, 18, 19, 22, 24]. Если это делать, опираясь на измерения профилей фотосинтетически активной радиации (ФАР) как функции глубины, или проводить оценку на основе измерений глубины белого диска, то такие измерения связаны с рядом объективных трудностей [1, 7, 9, 16]. Например, измерения ФАР и глубины белого диска бессмысленно проводить в вечерние и ночные часы из-за низкой естественной освещенности, качество измерений в дневное время зависит от изменчивости состояния облачного покрова в процессе измерений на конкретной станции, состояния взволнованной поверхности, влияния положения судна относительно солнца, качки судна, метеоусловий и др. В этом отношении измерения

показателя ослабления направленного света (ПОС) более надежны и свободны от перечисленных выше недостатков.

В водах первого оптического типа, где оптические свойства вод можно представить в виде функции, которая зависит от одного параметра — концентрации хлорофилла “а” [23], вместо измерений ПОС можно использовать *in situ* измерения концентрации хлорофилла “а”. Однако в практике морских исследований для оценки последних используются флуоресцентные измерения, которые подвержены тушению флуоресценции при высоких уровнях ФАР [5], а также могут зависеть от видового состава и состояния фотосинтетического аппарата клеток фитопланктона [17]. С этой точки зрения измерения ПОС направленного света также являются более надежными и могут быть измерены с хорошей точностью при использовании лазерных источников света. Поэтому нахождение связи между профилем ПОС и Z_{eu} , там, где это возможно, о чем речь пойдет ниже, является актуальной и востребованной задачей.

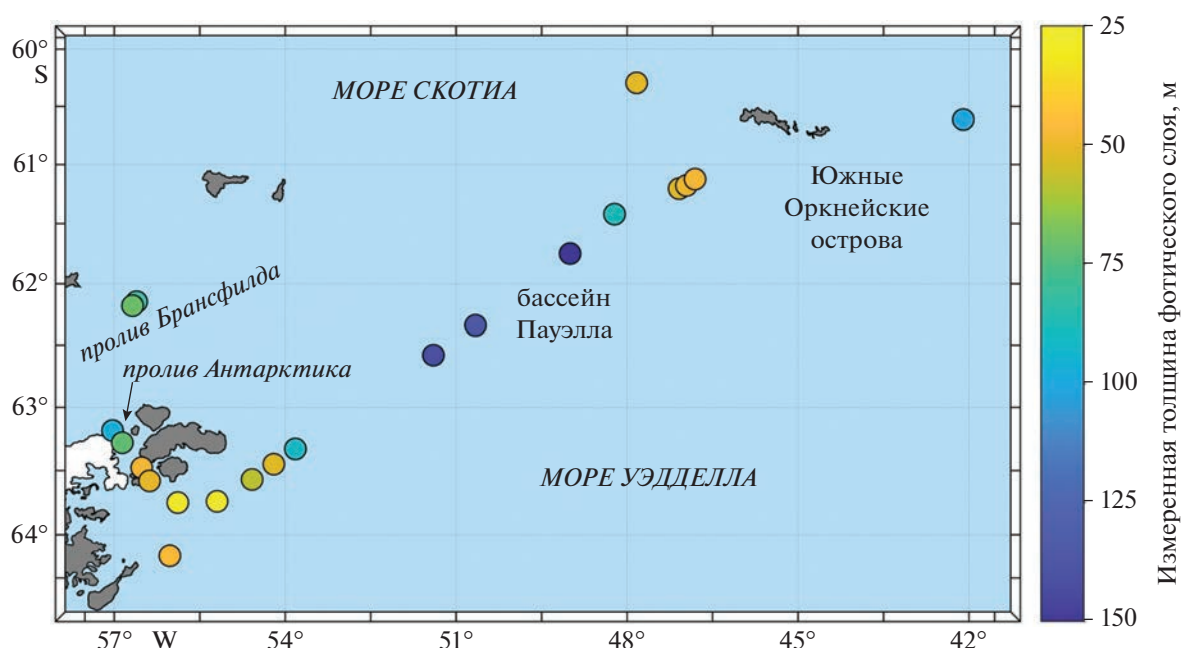


Рис. 1. Схема расположения океанографических станций и толщина фотического слоя Z_{eu} рассчитанная по данным прямых *in situ* измерений профилей ФАР.

Таким образом, постановка задачи этой работы заключалась в следующем:

1) развить методику построения регионально-го алгоритма нахождения Z_{eu} на основе *in situ* измерений профиля ПОС для конкретного района, чтобы впоследствии можно было ее распространить на другие регионы;

2) построить региональный алгоритм расчета толщины фотического слоя на основе синхронных измерений ПОС и ФАР для северо-западной части моря Уэдделла.

Северо-западная часть моря Уэдделла является удаленным регионом, сложным для проведения морских экспедиционных исследований. Здесь частая облачность, перемещение битого льда, низкие углы Солнца над горизонтом, штормовые условия и выпадения осадков затрудняют применение прямых методов определения Z_{eu} . Поэтому для повышения эффективности дорогостоящих рейсов научно-исследовательских судов необходимы методика и региональный алгоритм, которые позволят оперативно оценивать Z_{eu} практически при любых условиях окружающей среды. Кроме этого, данная методика и соответствующие алгоритмы могут быть использованы на автономных погружаемых аппаратах, таких, например, как сеть буев bio-Argo, что также повысит эффективность морских исследований.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках программы экспедиционных исследований 87 рейса НИС “Академик Мстислав Кел-

дыш” в январе–феврале 2022 г. [6] выполнены натурные синхронные измерения профилей ПОС на 660 нм (ПОС₆₆₀) и ФАР, в основном, в северо-западной части моря Уэдделла (шельфовая часть, бассейн Пауэлла и районы около Южных Оркнейских островов) и частично в прилегающих районах (проливы Брансфилда и Антарктика) (рис. 1). Также на рис. 1 цветом обозначена глубина Z_{eu} , рассчитанная по данным прямых *in situ* измерений ФАР.

Натурные измерения профилей ПОС₆₆₀ и ФАР, как функции глубины морской толщи z (ПОС₆₆₀(z) и ФАР(z)), выполнялись на дрейфовых станциях с использованием зондирующего измерителя Кондор [10, 11]. Калибровка канала ПОС₆₆₀ осуществлялась в лабораторных условиях перед экспедицией по результатам измерений в растворах суспензии формазина с заданной концентрацией (единицы FTU). Калибровочные коэффициенты для датчика ФАР комплекса Кондор были получены по результатам синхронных измерений с датчиком ФАР фирмы LI-COR LI-192 [21], выполненные непосредственно в рейсе.

Нижеописанная методика построена на том, что в рассматриваемом районе исследований оптические свойства воды принадлежат к водам первого типа (CASE 1) [13, 15], т.е. существует однозначная гидрооптическая связь между первичными гидрооптическими характеристиками в фотическом слое моря. Это связано с тем, что в основном в данном районе отсутствуют существенные источники поступления окрашенных

растворенных органических веществ (ОРОВ) и взвешенных веществ, не связанных с функционированием фитопланктонных сообществ. При этом исключением являются морские воды, значимо подверженные влиянию таяния ледников вследствие чего понижается соленость и повышается коэффициент обратного рассеяния света морской воды за счет поступления минеральных взвешенных веществ, что было зафиксировано в водах около Антарктического полуострова в работе [12]. Тем не менее, такие процессы носят локальный характер, и основная часть вод относится к водам CASE 1. Однако несмотря на это глобальные биооптические алгоритмы в данном районе все равно не применимы, т.к. район характеризуется особыми региональными гидрооптическими характеристиками, которые приводят к тому, что спутниковые оценки концентрации хлорофилла “а” существенно занижены [14, 28]. Это говорит о том, что и алгоритм для оценки толщины фотического слоя также будет иметь отличительные региональные особенности.

Методика настройки регионального алгоритма расчета толщины фотического слоя с использованием данных вертикального зондирования ПОС состоит из трех этапов.

(1) На первом этапе осуществляется расчет Z_{eu} по измеренному профилю $\Phi AP(z)$, т.е. находится горизонт, для которого отношение $\Phi AP(Z_0)/\Phi AP(0^-)$ равно 0.01. Тогда Z_0 равно искомому значению Z_{eu} .

(2) На втором этапе выполняется расчет интеграла профиля $ПОС_{660}(z)$ от верхнего слоя до глубины Z_{eu} , вычисленной по синхронному профилю $\Phi AP(z)$, с весовой функцией z^α :

$$\int_1^{Z_{eu}} ПОС_{660}(z) z^\alpha dz = A(\alpha), \quad (1)$$

где α принимает значения в интервале $\alpha = -3 \div 0.5$ с шагом 0.1. Такая процедура из двух шагов выполняется для всех синхронных измерений профилей $ПОС_{660}(z)$ и $\Phi AP(z)$ для рассматриваемого района. В результате получается двумерная матрица от α и номера станции s . Использование предложенной весовой функции позволяет рассмотреть такие крайние случаи, как использование $ПОС_{660}(z)$ в основном с поверхности при $\alpha = -3$ или равномерный учет $ПОС_{660}(z)$ во всем диапазоне глубин при $\alpha = 0$, либо вариант увеличения веса $ПОС_{660}(z)$ с глубиной при $\alpha > 0$.

(3) На третьем этапе определяется минимум функции $\frac{СКО(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$ по всем станциям для фиксированного α , где $СКО(\dots)$ — среднеквадратич-

ное отклонение, а символ $\langle \dots \rangle$ — среднее значение.

Пусть $\min \left(\frac{СКО(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s} \right)$ по α достигается для α_0 , тогда для α_0 рассчитывается константа $\langle A(\alpha_0) \rangle_s$:

$$\langle A(\alpha_0) \rangle_s = \left\langle \int_1^{Z_{eu}} ПОС_{660}(z) z^{\alpha_0} dz = A(\alpha) \right\rangle_s, \quad (2)$$

которая в дальнейшем используется нами для расчета модельного значения Z_{eu}^* , используя только профиль $ПОС(z)$. Далее считаем, что $\langle A(\alpha_0) \rangle_s \equiv A(\alpha_0)$.

Таким образом, как только интеграл $\int_1^Z ПОС(z) \times z^{\alpha_0} dz$ для какой-то станции достигнет величины $A(\alpha_0)$, то эта глубина Z и будет соответствовать модельной оценке нижней границы фотического слоя Z_{eu}^* для данного района/сезона.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет для всех станций значения $\frac{СКО(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$ как функции α показан на рис. 2. Минимальное значение функции достигается для $\alpha_0 = -0.8$. При этом $A(\alpha_0) = 2.57$. Из весовой функции, представленной на рис. 2б видно, что наиболее значимые глубинные горизонты с вкладом более 0.5% находятся в диапазоне 0–40 метров.

На рис. 3 показан результат сравнения модельного расчета Z_{eu}^* и измеренного *in situ* Z_{eu} для всех синхронных измерений профилей ΦAP и $ПОС$ в районе исследований. Наблюдается высокая корреляционная связь ($R^2 = 0.90$, $N = 21$, средняя относительная ошибка — 18%) между измеренной и модельной оценками толщины фотического слоя.

Расположение наиболее значимых глубинных горизонтов для расчета вклада $ПОС$ при оценке Z_{eu}^* в диапазоне 0–40 м соответствует тому факту, что в районе исследований основное количество оптически-активных компонентов (исключая чистую воду) находится примерно в этом же диапазоне глубин [20].

В данной работе качество оценки Z_{eu}^* выше ($R^2 = 0.90$), чем наилучший результат оценки Z_{eu}^* из контактных измерений приведенный в работе [25], где $R^2 = 0.83$ при использовании поверхностных измерений $ПОС$ на длине волны 532 нм, полученных в 79 рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (АМК79) в январе–феврале 2020 г. Конечно, нельзя сравнивать эти результаты напрямую, поскольку измерения проведены в разных

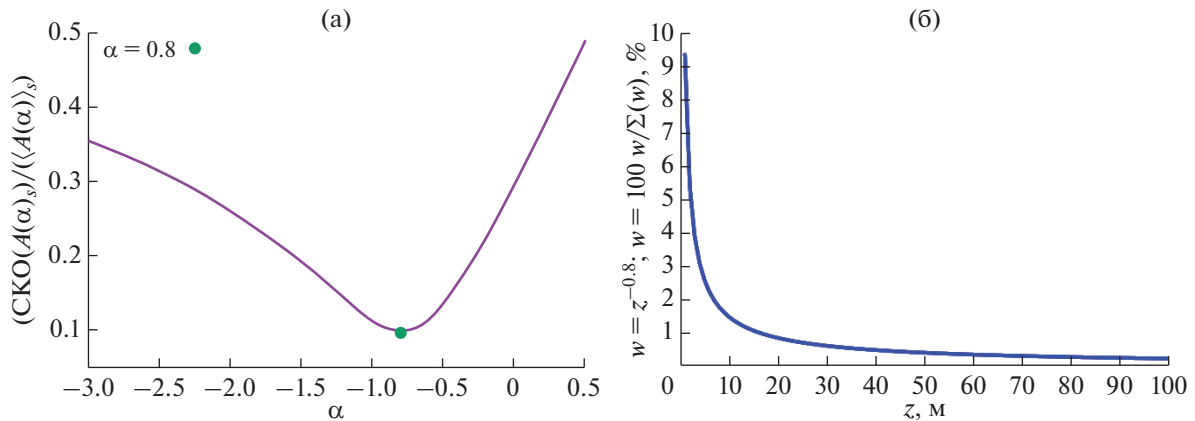


Рис. 2. (а) Функциональная связь между $\frac{SKO(A(\alpha))_s}{\langle A(\alpha) \rangle_s}$ и α , построенная по данным синхронных измерений профилей ФАР и ПОС в районе исследований. (б) Вид весовой функции при $\alpha = -0.8$.

рейсах в разные года, хотя и в один и тот же сезон. И кроме этого, в рейсе АМК79 использовались только поверхностные измерения на горизонте около 5 м. Но это показывает, что в обоих случаях получены высокие значения R^2 при использовании измерений ПОС. В работе [25] использование *in situ* измерений интенсивности флуоресценции хлорофилла “а” привело к большей погрешности оценки толщины фотического слоя.

Отдельным вопросом для обсуждения является длина волны, на которой измеряется ПОС. В данной работе — это 660 нм, и ПОС на ней в основном зависит от поглощения света клетками фитопланктона, а также от рассеяния на живых и неживых взвешенных частицах. Вкладом ОРОВ в поглощение света при этом можно пренебречь. Это допустимо, если мы говорим о разработке модели для вод первого типа. Если же нужна модификация методики для применения в водах

второго типа с большим вкладом ОРОВ, то необходимо добавлять второй канал измерения на длине волны в диапазоне 350–450 нм. Кроме этого, в районе исследований могут присутствовать локальные области с высоким содержанием фикоэритрина в составе криптофитовых водорослей [26]. Фикоэритрин поглощает свет в диапазоне 490–500 и 550–560 нм [27] и для его учета необходимо добавлять еще один канал измерений в диапазоне 490–560 нм, где поглощение будет также значимым.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Описана методика восстановления Z_{eu} по измеренным профилям ПОС по формуле.
2. Для северо-западной части моря Уэдделла опробовано применение данной методики, получено уравнение для оценки $Z_{eu}^* \cdot \int_1^{Z_{eu}^*} ПОС(z)z^{-0.8} dz = 2.57$. Относительная ошибка восстановления Z_{eu}^* составила 18%.

Источники финансирования. Экспедиционные исследования выполнены в рамках государственных заданий: МГИ РАН по теме № FNNN-2022-0001 “Экспериментальные исследования изменчивости гидрофизических, гидрохимических и биооптических полей на разных пространственно-временных масштабах для выявления особенностей климатических изменений океанографических условий в Атлантической части Антарктики” и теме № FNNN-2021-0003 “Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений”; ТОИ

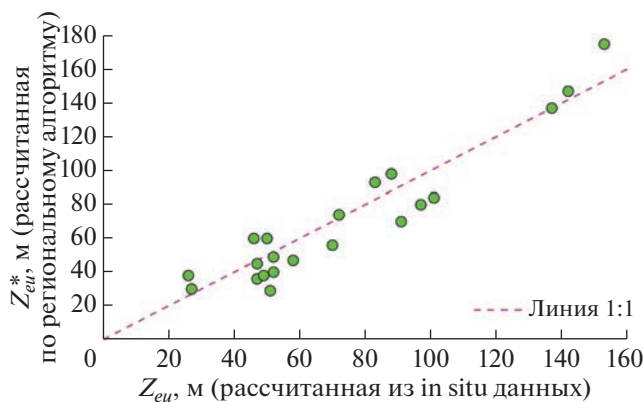


Рис. 3. Сравнение модельного расчета Z_{eu}^* и измеренного *in situ* Z_{eu} для всех синхронных измерений профилей ФАР и ПОС в районе исследований.

ДВО РАН по теме № 0211-2021-0007 “Технологии дистанционного зондирования Земли и наземных измерительных систем в комплексных исследованиях динамических явлений в океане и атмосфере” и теме № FWMM-2022-0033 “Комплексные исследования окружающей среды и климата Южного океана”. Биооптические характеристики проанализированы в рамках проекта РНФ № 21-77-10059.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ведерников В.И.* Особенности распределения первичной продукции и хлорофилла в летний период // В кн.: Изменчивости экосистемы пелагиали Черного моря и антропогенные факторы. М.: Наука, 1991. С. 128–147.
2. *Звалинский В.И., Тищенко П.Я.* Моделирование фотосинтеза и роста морского фитопланктона // Океанология. 2016. Т. 56. № 4. С. 1–15.
3. *Кондратьев К.Я., Федченко П.П.* Влияние спектра солнечной радиации на эволюцию биосферы // Вестник Российской академии наук. 2005. Т. 75. № 6. С. 522–532.
4. *Маньковский В.И., Шерстянкин П.П.* Использование гидрооптических характеристик для контроля состояния экосистемы водоемов // География и природные ресурсы. 2019. № 3. С. 86–94. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-3\(86-94\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-3(86-94))
5. *Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Ефимова Т.В., Маторин Д.Н.* Коррекция тушения флуоресценции хлорофилла а в верхнем перемешанном слое моря: разработка алгоритма // Морской гидрофизический журнал 2020. Т. 36. № 1(211). С. 66–74.
6. *Морозов Е.Г., Флинт 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.
7. *Празукин А.В., Латушкин А.А., Фирсов Ю.К., Чепыженко А.А.* Вертикальное распределение фотосинтетически активной радиации в пологе *Zostera noltii* Hognemann при разной высоте Солнца над горизонтом // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : тез. докл. XXVII Междунар. симпоз., 5–9 июля 2021 г., г. Москва, РФ. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. С. С330–С333. <https://symp.iao.ru/files/symp/aoo/27/C.pdf>
8. *Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Латушкин А.А. и др.* Фотосинтетически активная радиация на дне северо-западного шельфа Черного моря на основе региональных моделей и спутниковых данных и ее межгодовая изменчивость // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 68–77. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030053>
9. *Тооминг Х.Г., Гуляев Б.И.* Методика измерения фотосинтетически активной радиации // М.: Наука, 1967. 144 с.
10. *Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Инструментальные средства биофизического мониторинга Мирового океана // Материалы 15 Всероссийской научно-технической конференции “Современные средства океанологических исследований” МСОИ-2017. Москва. 2017. Т. 2. С. 45–49. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2020-1-95-101>
11. *Чепыженко А.И., Чепыженко А.А.* Методы и средства экологического мониторинга in situ параметров состояния водной среды и антропогенной нагрузки // Сборник статей научно-практической конференции с международным участием “Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017”, 11–15.09.2017 г. ФГАОУ ВО “Севастопольский государственный университет”, Институт ядерной энергии и промышленности. Севастополь. 2017. С. 1491–1495.
12. *Dierssen H.M., Smith R.C.* Case 2 Antarctic coastal waters: The bio-optical properties of surface meltwater // Proceedings Ocean Optics XV, edited by S Ackleson and J Marra, Off of Nav Res, Kailua-Kona, Hawaii. 2000.
13. *Dierssen H.M. Smith R.C.*, 2000a. Bio-optical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. № C11. P. 26301–26312.
14. *Ferreira A., Brito A.C., Mendes C.R. et al.* OC4-SO: A New Chlorophyll-a Algorithm for the Western Antarctic Peninsula Using Multi-Sensor Satellite Data // Remote Sensing. 2022. V. 14. № 5. P. 1052. <https://doi.org/10.3390/rs14051052>
15. *Ferreira A., Ciotti Á.M., Garcia C.A.* Bio-optical characterization of the northern Antarctic Peninsula waters: Absorption budget and insights on particulate backscattering // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography 2018. V. 149. P. 138–149.
16. *Gordon H.R., McCluney W.R.* Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Appl. Optics. 1975. V. 14. P. 413–416. <https://doi.org/10.1364/AO.14.000413>
17. *Huot Y., Franz B.A., Fradette M.* Estimating variability in the quantum yield of Sun-induced chlorophyll fluorescence: A global analysis of oceanic waters // Remote sensing of environment. 2013. V. 132. P. 238–253. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.003>
18. *Kirk J.T.O.* Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. 3rd Edition // Cambridge: University Press UK. 2011. 649 p.
19. *Kovač Ž., Platt T., Sathyendranath S., Morović M.* Analytical solution for the vertical profile of daily production in the ocean // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2016. V. 121. № 5. P. 3532–3548. <https://doi.org/10.1002/2015JC011293>
20. *Latushkin A.A., Artemiev V.A., Garmashov A.V. et al.* Variability of Seawater Optical Properties in the Adjacent Water Basins of the Antarctic Peninsula in January and February 2020 // Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean. Springer, Cham, 2021. P. 229–240.
21. LI-COR LI-192 Underwater PAR Sensor. URL: <https://www.fondriest.com/li-cor-li-192-underwater-par-sensor.htm> (дата обращения 22.08.2022).
22. *Miller C.B., Wheeler P.A.* Biological oceanography // John Wiley & Sons. 2012. 504 p.

23. *Morel A., Prieur L.* Analysis of variations in ocean color I // *Limnology and oceanography*. 1977. V. 22. № 4. P. 709–722.
24. Ocean Productivity home page. (2017). URL: <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php> (дата обращения 22.08.2022).
25. *Salyuk P.A., Artemiev V.A., Glukhovets D.I. et al.* Bio-Optical Models for Estimating Euphotic Zone Depth in the Western Atlantic Sector of the Southern Ocean in the Antarctic Summer // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean*. – Springer, Cham, 2021. P. 241–250.
26. *Salyuk P.A., Glukhovets D.I., Mayor A.Y. et al.* Phycocerythrin Pigment Distribution in the Upper Water Layer Across the Weddell-Scotia Confluence Zone and Drake Passage Summer // *Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean*. Springer, Cham, 2021. P. 251–259.
27. *Six C., Thomas J.C., Garczarek L. et al.* Diversity and evolution of phycobilisomes in marine *Synechococcus* spp.: a comparative genomics study // *Genome Biology*. 2007. V. 8. № 2. R259. <https://doi.org/10.1186/gb-2007-8-12-r259>
28. *Szeto M., Werdell P.J., Moore T.S., Campbell J.W.* Are the world's oceans optically different? // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011. V. 116. № C7. <https://doi.org/10.1029/2011JC007230>

A Regional Algorithm for Calculating the Photic Zone Thickness from the Vertical Profile of the Beam Attenuation Coefficient on the Example of the Northwestern Part of the Weddell Sea

A. A. Latushkin^{a, *}, P. A. Salyuk^{b, c}, V. V. Suslin^a, O. V. Martynov^a

^a*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

^b*Ilichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, Russia*

^c*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: sevsalat@gmail.com

A method is proposed for constructing a regional algorithm for calculating the thickness of the euphotic zone from *in situ* measurements of the vertical profiles of the beam attenuation coefficient under the condition of one-parameter optical properties of water (Case-1 water). Using the proposed methodology, a regional algorithm for determining the thickness of the photic zone was developed based on the results of synchronous measurements of the beam attenuation coefficient and photosynthetically active radiation, performed in January 2022 as part of the 87th cruise of the R/V Akademik Mstislav Keldysh for the northwestern part of the Weddell Sea. For this region, an equation was obtained that makes it possible to estimate the photic zone depth with a relative reconstruction error of 18%.

Keywords: Antarctic Peninsula, regional algorithm, beam attenuation coefficient, photic zone thickness, euphotic zone depth, Southern Ocean