

Региональные коэффициенты расчета концентрации взвешенного вещества в Черном море по мультисенсорным данным

Д. А. Кременчуцкий

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

✉ d.kremenchutsky@gmail.com

Поступила в редакцию 31.03.2026; одобрена после рецензирования 27.04.2026; принята к публикации 20.05.2026.

Аннотация

Цель. Получить количественные оценки региональных коэффициентов для расчета значений концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое вод северной и северо-восточной частей Черного моря с использованием квазианалитического алгоритма (*QAA* версия 6) и суточных мультисенсорных данных (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*) с разрешением 1 и 4 км – цель настоящей работы.

Методы и результаты. Представлены натурные данные о величинах массовой концентрации взвешенного вещества размером $\geq 0,2$ мкм в поверхностном слое вод северной и северо-восточной частей Черного моря, полученные в ходе 138-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» (14 ноября – 9 декабря 2025 г.). В общей сложности отобрано и обработано 56 проб морской воды с 56 станций. Объем единичной пробы, прокачиваемой через фильтр, изменялся в диапазоне 1,24–8,17 л и зависел от насыщенности воды взвесью. С использованием мультисенсорных данных (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*) о спектральном коэффициенте яркости моря с разрешением 1 и 4 км и полуаналитического алгоритма (*QAA* версия 6) рассчитаны значения коэффициента обратного рассеяния на длине волны 560 нм. Исследована взаимосвязь указанного коэффициента с концентрацией взвешенного вещества. По результатам исследования определены значения региональных коэффициентов в уравнении линейной регрессии, связывающем коэффициент обратного рассеяния с концентрацией взвешенного вещества.

Выводы. В исследуемом районе концентрация взвешенного вещества изменялась в широком диапазоне 0,17–1,48 мг/л. Повышенные значения отмечались в районе Керченского пролива (1,2–1,48 мг/л) и Феодосийского залива (0,9–1,2 мг/л). Пониженные значения (0,17–0,55 мг/л) были характерны для глубоководной части моря. Параметры линейной регрессии между коэффициентом обратного рассеяния и концентрацией взвешенного вещества для данных с разрешением 4 км составили $89,2 \pm 6,3$ (угловой коэффициент) и $0,24 \pm 0,03$ (свободный член), для данных с разрешением 1 км – $102,6 \pm 7,3$ и $0,21 \pm 0,03$ соответственно. Результаты сопоставления рассчитанных значений концентрации взвеси с измеренными указывают на высокую точность полученных оценок: медианное абсолютное процентное отклонение составило 20 % (4 км) и 19 % (1 км), медианная абсолютная разность – 0,09 мг/л (4 и 1 км), систематическая ошибка – 0,2 % (4 км) и –0,1 % (1 км), коэффициент детерминации – 0,82 (4 и 1 км).

Ключевые слова: взвешенное вещество, Черное море, региональный алгоритм, спутниковые оптические данные, *SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*

Благодарности: автор выражает благодарность капитану и команде НИС «Профессор Водяницкий» за помощь в проведении работ на судне. Пробы воды отобраны в Центре коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН». Работа выполнена в рамках следующих тем государственного

задания ФГБУН ФИЦ МГИ: отбор проб морской воды в ходе экспедиционных исследований – FNNN-2024-0001, анализ пространственной изменчивости поля концентрации взвешенного вещества – FNNN-2026-0003, расчет региональных коэффициентов – FNNN-2026-0002.

Для цитирования: Кременчуцкий Д. А. Региональные коэффициенты расчета концентрации взвешенного вещества в Черном море по мультисенсорным данным // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 4. С. 571–583. EDN OSEBJG.

Original article

Regional Coefficients for Calculating Suspended Matter Concentrations in the Black Sea Using Multi-Sensor Data

D. A. Kremenchutskii

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

✉ d.kremenchutskii@mhi-ras.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the study is to obtain the quantitative estimates of regional coefficients for calculating the values of suspended matter concentrations in the surface layer of the northern and north-eastern Black Sea based on a quasi-analytical algorithm (QAA version 6) and daily multi-sensor data (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS* and *OLCI*) with the 1- and 4-km resolutions.

Methods and Results. The paper presents *in situ* data on the values of mass concentration of suspended matter $\geq 0.2 \mu\text{m}$ in the surface layer of the northern and northeastern Black Sea obtained during the 138th cruise of R/V “Professor Vodyanitsky” (November 14 – December 9, 2025). A total of 56 seawater samples were collected and processed at 56 stations. The volume of a single sample pumped through a filter varied from 1.24 to 8.17 L and depended on the seawater saturation with suspended matter. The backscattering coefficient values at 560 nm were calculated using the multi-sensor (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS* and *OLCI*) data on spectral radiance of the sea at the 1- and 4-km resolutions, and a semi-analytical algorithm (QAA version 6). The relationship between the above mentioned coefficient and the suspended matter concentration was investigated. The study results made it possible to determine the values of regional coefficients in the linear regression equation which relates the backscattering coefficient to the suspended matter concentration.

Conclusions. In the area under study, the suspended matter concentration varied within a wide range – from 0.17 to 1.48 mg/L. The increased values were observed near the Kerch Strait (1.2–1.48 mg/L) and Feodosia Gulf (0.9–1.2 mg/L). The lower values (0.17–0.55 mg/L) were characteristic of the deep part of the sea. The linear regression parameters between the backscattering coefficient and the suspended matter concentration for the data with a 4 km resolution were 89.2 ± 6.3 (angle coefficient) and 0.24 ± 0.03 (absent term), and for the data with a 1 km resolution – 102.6 ± 7.3 and 0.21 ± 0.03 , respectively. The results of comparison of the calculated suspended matter concentration values with the measured ones have indicated a high accuracy of the obtained estimates: the median absolute percentage deviation constituted 20 % (4 km) and 19 % (1 km), the median absolute difference – 0.09 mg/L (4 and 1 km), the systematic error was – 0.2 % (4 km) and – 0.1 % (1 km), and the determination coefficient – 0.82 (4 and 1 km).

Keywords: suspended matter, Black Sea, regional algorithm, satellite optical data, *SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*

Acknowledgments: The author is thankful to the captain and crew of R/V “Professor Vodyanitsky” for their assistance in the work onboard the vessel. Water samples were taken at the Collective Use Center “R/V Professor Vodyanitsky” of FSBSI FRC “A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS”. The study was carried out within the framework of the following themes of state assignment of FSBSI FRC MHI: seawater sampling during the expeditionary research – FNNN-2024-0001, analysis of spatial variability of the suspended matter concentration field – FNNN-2026-0003, and calculation of regional coefficients – FNNN-2026-0002.

For citation: Kremenchutskii, D.A., 2026. Regional Coefficients for Calculating Suspended Matter Concentrations in the Black Sea Using Multi-Sensor Data. *Physical Oceanography*, 33(3), pp. 598–609.

Введение

Вещества, содержащиеся в морской среде, распределены между растворенной, коллоидной и взвешенной формами. Нижняя граница взвешенной формы соответствует 0,2–0,45 мкм [1, 2], верхняя обычно не превышает 1 мм¹. Морская взвесь представляет собой смесь литогенных и биогенных частиц, поступающих в морскую среду с атмосферными выпадениями, речным стоком, в результате абразии берегов и ресуспензии донных отложений, а также образующихся в процессе биологической продукции [3, 4]. Актуальность исследования морской взвеси обусловлена тем, что она играет ключевую роль в биологических, геохимических, физико-химических, седиментационных и оптических процессах в морской среде [2, 5, 6].

Классические методы определения концентрации взвеси основаны на лабораторном анализе проб морской воды. Использование таких методов не позволяет организовать мониторинг на больших акваториях. В отличие от контактных методов спутниковые системы дистанционного зондирования обеспечивают регулярное получение информации о состоянии поверхностного слоя моря на больших акваториях, что делает их эффективным инструментом мониторинга распределения взвеси.

В основе спутниковых методов оценки концентрации взвешенного вещества лежит связь между концентрацией частиц и оптическими характеристиками морской воды. Взвешенные частицы влияют на спектральную отражательную способность воды, прежде всего через изменение коэффициентов рассеяния и поглощения. Одним из наиболее информативных параметров является коэффициент обратного рассеяния частиц, который тесно связан с концентрацией взвеси и характеризует долю света, рассеиваемого частицами в обратном направлении [7–9]. Многочисленные исследования показали, что между коэффициентом обратного рассеяния частиц и концентрацией взвешенного вещества существует устойчивая зависимость, которая может быть аппроксимирована линейными или степенными функциями [9–14]. Значения коэффициентов, вычисляемые при аппроксимации зависимостей между этими параметрами, не являются константами и изменяются в зависимости от минералогического состава взвеси, размеров частиц и доли органического вещества [12]. Поэтому применение одних и тех же коэффициентов для различных акваторий может приводить к завышению или занижению концентрации взвеси [11, 12]. Это обуславливает актуальность получения значений таких коэффициентов для различных акваторий.

Для восстановления оптических характеристик морской воды по спутниковым данным широко используются квазианалитические алгоритмы [9, 15]. Одним из наиболее распространенных среди них является алгоритм, предложенный в [16] и известный как *Quasi-Analytical Algorithm (QAA)*. Он основан на решении обратной задачи радиационного переноса и позволяет определять

¹ Лисицын А. П. Осадкообразование в океанах. Москва : Наука, 1974. 438 с.
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 42 № 4 2026

спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния морской воды по данным дистанционного зондирования океанического цвета. Алгоритм неоднократно совершенствовался ², в настоящее время доступна его шестая версия ³.

Оптическое оборудование (сенсоры), которым комплектуются спутники, различается набором спектральных каналов и пространственным разрешением. В связи с этим универсальные коэффициенты при обработке данных неприменимы. Это вызывает необходимость переоценки значений коэффициентов для каждого сенсора. По этой причине в доступной литературе встречаются публикации, посвященные вычислению значений этих коэффициентов для отдельного семейства сенсоров [10–13, 17–19]. В то же время сотрудниками Плимутской морской лаборатории (Великобритания) был подготовлен и опубликован в свободном доступе массив данных *Ocean Colour Climate Change Initiative dataset* (версия 6.0, Европейское космическое агентство). В нем измерения, полученные с помощью целого ряда сенсоров (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*), прошли процедуру коррекции и были сведены к единым спектральным каналам ⁴. В настоящее время этот массив, вероятно, имеет максимальный пространственный и временной охват Черноморского региона из представленных в открытом доступе. Массив представлен в двух вариантах: суточные интервальные данные с разрешением 1 км и суточные данные с разрешением 4 км на регулярной сетке. Этот массив представляется наиболее перспективным для исследования процессов (в том числе методами математического моделирования) с присутствием взвешенного вещества, затрагивающих обширные акватории Черного моря. При всей перспективности данного массива в доступной литературе отсутствуют региональные коэффициенты для его использования в акватории Черного моря.

Целью настоящего исследования является получение количественных оценок региональных коэффициентов для расчета значений концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое вод северной и северо-восточной частей Черного моря с использованием квазианалитического алгоритма (*QAA* версия 6) и суточных мультисенсорных данных (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*) с разрешением 1 и 4 км.

Материалы и методы

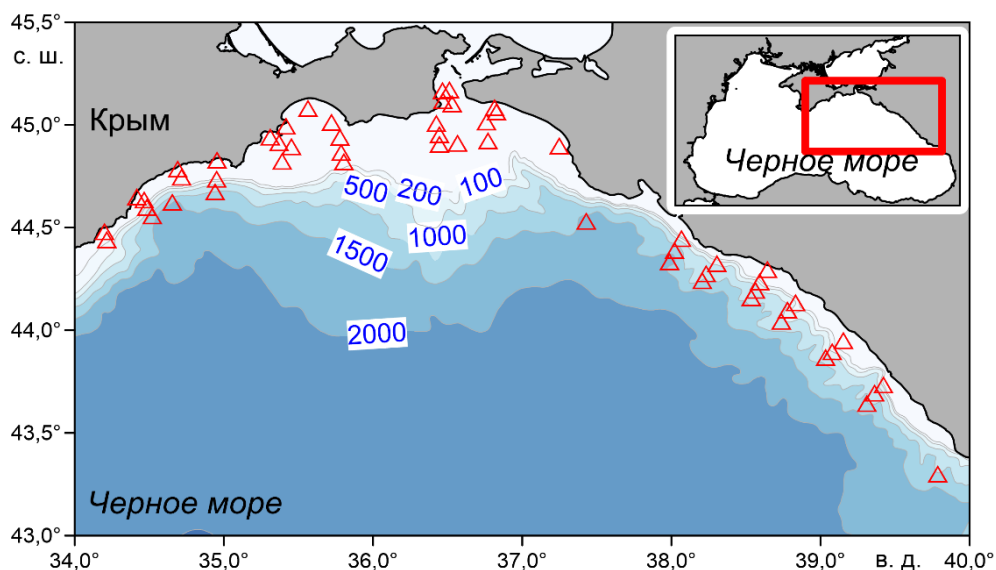
Отбор проб. Натурные данные для этого исследования были получены в 138-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (14 ноября – 9 декабря 2025 г.). Пробы морской воды отбирались с помощью пластиковой емкости с поверхностного слоя моря. За время экспедиции было отобрано 56 проб воды с 56 станций. Схема расположения станций отбора проб морской воды показана на

² An Update of the Quasi-analytical Algorithm (*QAA_v5*) / Z. Lee [et al.]. IOCCG, 2009. 9 p. (International Ocean Color Group Software Report).

³ Steps and calculations of the Quasi-Analytical Algorithm (*QAA_v6*), available online: https://ioccg.org/wp-content/uploads/2020/11/qaa_v6_202011.pdf. (date of access: 23.03.2026).

⁴ ESA Ocean Colour Climate Change Initiative (Ocean Colour cci): Global chlorophyll-*a* data products gridded on a sinusoidal projection at 4km resolution, Version 6.0 / S. Sathyendranath [et al.]. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. 2023, available online: <https://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/474ac06235e54e6cb0ec6eed635e1213>. (date of access: 23.03.2026).

рис. 1. Расстояние от станции до ближайшего берега изменялось в диапазоне 0,5–20 км. Пробы отбирались над глубинами 7–1680 м.



Р и с. 1. Расположение станций отбора проб морской воды в Черном море (на врезке красным прямоугольником показан район исследований)

F i g. 1. Location of seawater sampling stations in the Black Sea (the inset shows the area under study indicated by red rectangle)

Определение концентрации взвешенного вещества (*TSM*). Методика определения концентрации взвеси, используемая в представленной работе, основана на РД 52.24.468-2019 «Массовая концентрация взвешенных веществ и сухого остатка в водах. Методика измерений гравиметрическим методом». Основное отличие от указанной методики заключалось в том, что новые и отработанные фильтры сушились в сушильном шкафу в течение суток, затем проводилось определение их массы, далее фильтры снова сушились в течение суток и снова проходили процедуру взвешивания для подтверждения значения определенной ранее сухой массы. Определение массы проводилось на лабораторных весах *Adventurer AR2140 (Ohaus Corp., США)*, обеспечивающих точность измерения в 0,1 мг.

Выделение взвешенного материала из проб морской воды осуществлялось непосредственно на судне методом вакуумной фильтрации с применением мембранных полиэфирсульфонных фильтров с размером пор 0,2 мкм и диаметром 47 мм (тип ФМПЭС, производство Владисарт, Россия). Объем пробы, пропущенной через один фильтр, изменялся в диапазоне 1,24–8,17 л и зависел от насыщенности воды взвесью. Фильтрат собирался в 5-литровые пластиковые емкости. Массу профильтрованной воды устанавливали гравиметрически с помощью электронных весов *EK9643K (Xiaomi, Китай)*, обеспечивающих точность измерения в 1 г. Взвешивание проводилось на борту судна в период минимальной качки или при ее отсутствии. По завершении фильтрации фильтр помещали в пластиковую чашку Петри и замораживали при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до этапа

высушивания в сушильном шкафу в береговой лаборатории. Итоговую концентрацию взвешенного вещества вычисляли путем деления прироста массы фильтра на объем профильтрованной пробы.

Расчет значения обратного рассеяния. Оценки значений величины обратного рассеяния (b_{bp}) на длине волны 560 нм были получены с использованием шестой версии квазианалитического алгоритма ³:

$$\begin{cases} b_{bp}(560) = \frac{u(560) \cdot a(560)}{1 - u(560)} - b_{bw}(560), & \text{если } Rrs(670) < 0,0015 \text{ 1/ср} \\ b_{bp}(560) = \left(\frac{u(670) \cdot a(670)}{1 - u(670)} - b_{bw}(670) \right) \cdot \left(\frac{670}{560} \right)^\eta, & \text{если } Rrs(670) \geq 0,0015 \text{ 1/ср} \end{cases}, \quad (1)$$

где u – безразмерный параметр, равный отношению коэффициента обратного рассеяния к сумме коэффициентов поглощения и обратного рассеяния; a – коэффициент поглощения, 1/м; b_{bw} – коэффициент обратного рассеяния чистой воды, 1/м; η – безразмерный параметр.

Выбор расчетной формулы зависит от типа вод (мутные или прозрачные), который определялся по значению спектрального коэффициента яркости моря (Rrs) на длине волны 670 нм, измеряемого спутниками над морской поверхностью. Чистые воды соответствуют критерию $Rrs < 0,0015$ 1/ср.

Значения b_{bw} для длин волн 560 и 665 нм были взяты из работы [20] и принимались равными $7,5 \cdot 10^{-4}$ и $3,57 \cdot 10^{-4}$ 1/м соответственно.

Значение параметра u оценивалось следующим образом:

$$u(\lambda) = \frac{-g_0 + \sqrt{(g_0)^2 + 4 \cdot g_1 \cdot r_{rs}(\lambda)}}{2g_1}, \quad (2)$$

где g_0 и g_1 – безразмерные эмпирические параметры, зависящие от угла наклона солнца, угла наблюдения, скорости ветра, биооптического состояния природных вод, они изменяются в зависимости от индикатрисы рассеяния (фазовой функции) [9], принимаются константами, равными 0,089 и 0,1245 соответственно [16]; r_{rs} – спектральный коэффициент яркости моря, определяемый непосредственно под поверхностью воды, 1/ср; λ – длина волны, нм.

Значение r_{rs} рассчитывалось по формуле

$$r_{rs}(\lambda) = \frac{R_{rs}(\lambda)}{(0,52 + 1,7 \cdot R_{rs}(\lambda))}. \quad (3)$$

Значение η рассчитывалось по формуле

$$\eta = 2,0 \cdot \left(1 - 1,2 \cdot \exp \left(-0,9 \cdot \frac{r_{rs}(443)}{r_{rs}(560)} \right) \right). \quad (4)$$

Для прозрачных вод значение a рассчитывалось по формуле

$$a(560) = a_w(560) + 10^{h_0 + h_1 \cdot \chi + h_2 \cdot \chi^2}, \quad (5)$$

где a_w – коэффициент поглощения чистой водой, 1/м; h_0 , h_1 и h_2 – эмпирические константы, равные $-1,146$, $-1,366$ и $-0,469$ соответственно³; χ – безразмерный параметр, зависящий от спектрального коэффициента яркости моря на длинах волн 443, 490, 560 и 670 нм.

Значения a_w для длин волн 560 и 665 нм были получены из работы [21] и принимались равными 0,0619 и 0,4290 соответственно.

Значения χ рассчитывались по формуле

$$\chi = \log \left(\frac{r_{rs}(443) + r_{rs}(490)}{r_{rs}(560) + 5 \cdot \frac{r_{rs}(670)}{r_{rs}(490)} \cdot r_{rs}(670)} \right). \quad (6)$$

Для мутных вод значение a рассчитывалось по формуле

$$a(670) = a_w(670) + 0,39 \cdot \left(\frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(443) + R_{rs}(490)} \right)^{1,14}. \quad (7)$$

Данные о спектральном коэффициенте яркости моря были получены из работы⁴, они представляют собой продукт третьего уровня шестой версии. Использовались оба варианта – суточные данные с разрешением 4 км на регулярной сетке и интервальные данные с разрешением 1 км.

Алгоритмы работы со спутниковыми данными с разрешением 4 и 1 км были идентичными и состояли из следующих этапов. Используя сведения о дате и координатах расположения отдельной станции отбора проб морской воды, определялось положение ближайшей точки в массиве спутниковых данных, для которой на текущие, предыдущие и последующие сутки имеются данные. Используя эти данные, рассчитывались значения параметра обратного рассеяния по формулам (1) – (7). Таким образом, на выходе было три значения обратного рассеяния для каждой станции. При расчете региональных коэффициентов использовалось только одно из них. Выбор конкретного значения осуществлялся следующим образом. Максимальный приоритет был у значения, полученного для того же дня и области, в которую входит станция. Далее шли значения, полученные для той же области, но в предыдущий или последующий день. Затем выбирались значения, полученные в тот же день, но для соседней области, при работе с данными с разрешением 4 км или ближайшее значение в радиусе 4 км при работе с данными с разрешением 1 км. Минимальный приоритет был у значений, полученных в предыдущий или последующий день для соседней области при использовании данных с разрешением 4 км, или у ближайшего значения в радиусе 4 км при использовании данных с разрешением 1 км. Доли использованных значений, соответствующих приоритету от максимального к минимальному, составили 34,2, 46,3, 2,4 и 17,1 % для спутниковых данных с разрешением 4 км и 28,9, 44,8, 2,6 и 23,7 % для спутниковых данных с разрешением 1 км.

Статистические характеристики. Для количественной оценки точности значений концентрации взвешенного вещества, получаемых с использованием

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 42 № 4 2026 577

региональных коэффициентов, был применен метод перекрестной проверки с исключением одного значения (*leave-one-out cross-validation, LOOCV*) и рассчитаны следующие статистические характеристики: медиана абсолютных процентных отклонений (*MAPD*), смещение (*Bias*), медианная абсолютная разность (*MAD*) и коэффициент детерминации (R^2). Метод перекрестной проверки с исключением одного значения заключается в последовательном исключении одного наблюдения из обучающей выборки, вычислении коэффициентов по оставшимся $n-1$ точкам и расчете ошибки предсказания для исключенного наблюдения. Процедура повторяется для каждого из n наблюдений, после чего по совокупности полученных ошибок вычисляются итоговые метрики (*MAPD*, *MAD*, *Bias*, R^2) точности оценки значений концентрации взвешенного вещества с использованием региональных коэффициентов. Данный подход позволяет получить объективную оценку точности рассчитанных значений концентрации взвешенного вещества в условиях ограниченного объема данных.

С использованием медианы абсолютных процентных отклонений оценивалась типичная относительная ошибка, при этом получаемая оценка не чувствительна к наличию выбросов в исследуемых рядах:

$$MAPD = \text{median} \left(\left| \frac{E_i - M_i}{M_i} \right| \right) \cdot 100 \%, i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

где E_i – рассчитанное значение концентрации, мг/л; M_i – измеренное значение концентрации, мг/л.

По смещению оценивалось наличие систематической ошибки – завышение или занижение концентрации. Оценки смещения были получены по следующей формуле:

$$Bias = \text{median} \left(\frac{E_i - M_i}{M_i} \right) \cdot 100 \%, i = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

Медианная абсолютная разность, характеризующая типичную абсолютную ошибку оценки концентрации, рассчитывалась по формуле

$$MAD = \text{median}(|E_i - M_i|), i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

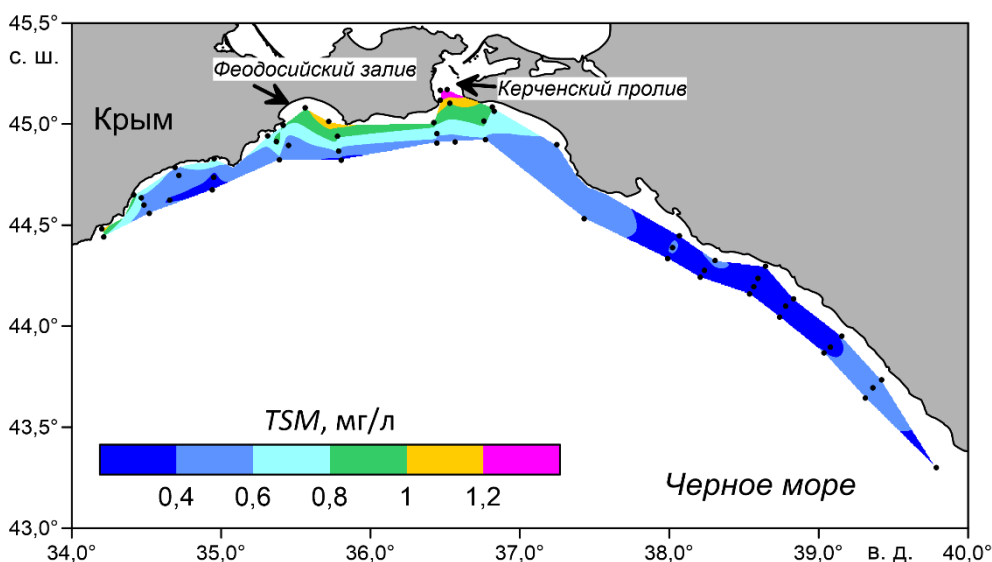
Коэффициент детерминации показывает, какую долю дисперсии наблюдаемых данных воспроизводит модель:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n \left(M_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n M_j \right)^2}. \quad (11)$$

Результаты и обсуждение

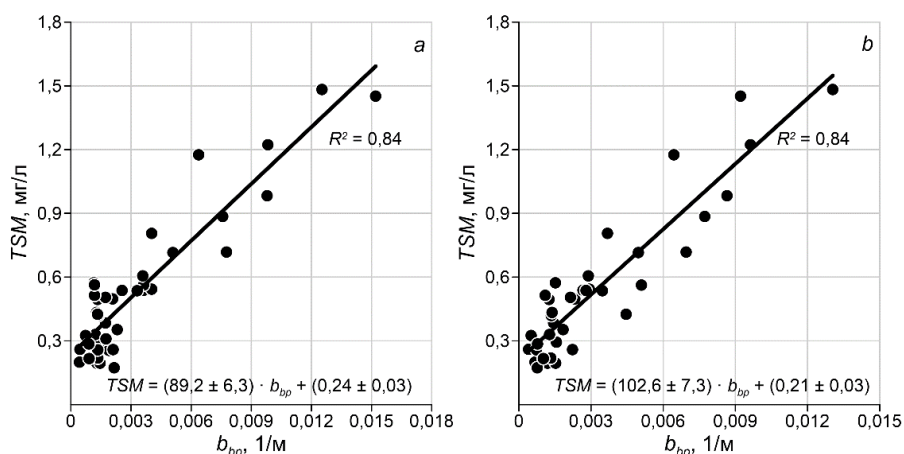
Пространственная изменчивость концентрации взвешенного вещества. Концентрация взвешенного вещества в индивидуальных пробах изменялась в диапазоне 0,17–1,48 мг/л, ее повышенные значения отмечались в районе

Керченского пролива (1,2–1,48 мг/л) и Феодосийского залива (0,9–1,2 мг/л) (рис. 2). Повышенные значения в Феодосийском заливе обусловлены транспортом взвеси, поступающей из Керченского пролива [22, 23]. Пониженные значения были характерны для восточной части исследуемого района (0,17–0,55 мг/л). Выявленные особенности пространственной изменчивости согласуются с полученными в более ранних исследованиях [22, 24]. Абсолютные значения концентрации также согласуются с опубликованными данными: 0,17–0,33 мг/л в декабре в глубоководной части Черного моря [25], 0,3–0,8 мг/л в зимний период в глубоководной части Черного моря [11], до 3,8 мг/л в районе Керченского пролива [26].



Р и с. 2. Пространственная изменчивость концентрации взвешенного вещества
F i g. 2. Spatial variability of total suspended matter concentration

Региональные коэффициенты для оценки концентрации взвешенного вещества. Используя данные о спектральном коэффициенте яркости моря на различных длинах волн, по формулам (1) – (7) были получены значения обратного рассеяния для каждой станции. На рис. 3 приведено сопоставление значений концентрации взвешенного вещества и обратного рассеяния, рассчитанного по массивам данных с разрешением 4 и 1 км. Зависимость между этими параметрами была аппроксимирована линейной функцией. При аппроксимации минимизировалось среднеквадратическое отклонение. Рассчитанные значения региональных коэффициентов и их погрешность показаны на рис. 3. Проводя сравнение оцененных значений региональных коэффициентов, полученных для данных с разрешением 4 и 1 км, отметим, что эти значения различаются в целом в пределах их погрешности. Важно отметить, что диапазон концентраций, на основе которого рассчитывались региональные коэффициенты, охватывает типичные для открытой части Черного моря значения [11, 22, 26].



Р и с. 3. Зависимость концентрации взвеси от коэффициента обратного рассеяния для спутниковых данных с разрешением 4 км (а) и 1 км (б)

F i g. 3. Dependence of suspended matter concentration on the backscattering coefficient for satellite data with a resolution of 4 (a) and 1 km (b)

С целью оценки качества определения концентрации взвешенного вещества с применением вычисленных региональных коэффициентов расчеты были выполнены для тех же станций, которые использовались для установления этих коэффициентов. Статистические характеристики приведены в таблице. Согласно им, для диапазона концентраций 0,17–1,48 мг/л медианное значение абсолютных процентных отклонений составило всего 20 % (4 км) и 19 % (1 км). Низкие значения медианной абсолютной разности (0,09 для 4 и 1 км), наиболее вероятно, обусловлены тем, что большинство значений концентрации (75 %) находятся в диапазоне 0,2–0,6 мг/л. Величина систематической ошибки близка к нулю для обеих пар коэффициентов. В целом использование этих региональных коэффициентов позволило описать 82 % изменчивости натурных данных.

Статистические характеристики качества получаемых оценок концентрации взвеси с указанием количества использованных значений концентрации (*N*) и их диапазона

Statistical characteristics of the quality of obtained estimates of suspended matter concentration, indicating the number of used concentration values (*N*) and their range

Разрешение, км / Resolution, km	<i>N</i>	<i>TSM</i> , мг/л / <i>TSM</i> , mg/L	<i>MAPD</i> , %	<i>MAD</i> , мг/л / <i>MAD</i> , mg/L	<i>Bias</i> , %	<i>R</i> ²
4	41	0,17–1,48	20	0,09	–0,2	0,82
1	38	0,17–1,48	19	0,09	–0,1	0,82

Выводы

В настоящей работе представлены натурные данные о концентрации взвешенного вещества в поверхностном слое вод северной и северо-восточной частей Черного моря в осенне-зимний период 2025 г. Пробы воды отбирали на расстоянии 0,5–20 км от ближайшего берега, при этом глубина в точках отбора

составляла 7–1680 м. Концентрация взвешенного вещества в индивидуальных пробах изменялась в широком диапазоне 0,17–1,48 мг/л. Повышенные значения отмечались в районе Керченского пролива (1,2–1,48 мг/л) и Феодосийского залива (0,9–1,2 мг/л). Пониженные значения (0,17–0,55 мг/л) были характерны для станций, расположенных в глубоководной части моря.

На основе натуральных данных о концентрации взвешенного вещества и спектральном коэффициенте яркости моря с разрешением 4 и 1 км были определены региональные коэффициенты для шестой версии квазианалитического алгоритма. Использование этого алгоритма с представленными коэффициентами позволяет рассчитывать концентрацию взвешенного вещества в поверхностном слое вод северной и северо-восточной частей Черного моря по объединенным данным ряда спутниковых сканеров (*SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLCI*) с пространственным разрешением 4 и 1 км. Параметры линейной регрессии между коэффициентом обратного рассеяния и концентрацией взвешенного вещества для данных с разрешением 4 км составили $89,2 \pm 6,3$ (угловой коэффициент) и $0,24 \pm 0,03$ (свободный член), для данных с разрешением 1 км – $102,6 \pm 7,3$ и $0,21 \pm 0,03$ соответственно. Сравнение расчетных значений с измеренными в диапазоне 0,17–1,48 мг/л показало высокую точность полученных оценок: медианное абсолютное процентное отклонение составило 20 % (4 км) и 19 % (1 км), медианная абсолютная разность – 0,09 мг/л (4 и 1 км), систематическая ошибка –0,2 % (4 км) и –0,1 % (1 км), коэффициент детерминации – 0,82 (4 и 1 км).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The importance of the soluble and colloidal pools for trace metal cycling in deep-sea pore waters / S. A. L. Paul [et al.] // *Frontiers in Marine Science*. 2024. Vol. 11. 1339772. EDN YHZYIX. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1339772>
2. Distribution and composition of suspended matters in the wintertime in the East China Sea / J. Lin [et al.] // *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 664. P. 322–333. EDN KNHKGX. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.021>
3. Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества в глубоководной части Черного моря / А. А. Ключиткин [и др.] // *Система Черного моря*. Москва : Научный мир, 2018. С. 350–396. EDN ANCZBB. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.350>
4. Денисов В. И. Потоки взвешенного вещества в прибрежной части шельфа в российском секторе Черного моря // *Система Черного моря*. Москва : Научный мир, 2018. С. 397–425. EDN GHSJUN. <https://doi.org/10.29006/978-5-91522-473-4.2018.397>
5. The use of ultra filtration in trace metal speciation studies in sea water / R. K. Singhal [et al.] // *Environment International*. 2006. Vol. 32, iss. 2. P. 224–228. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.08.015>
6. Impact of phytoplankton, CDOM, and suspended sediments on the vertical attenuation of light, changing heat content and circulation on a continental shelf: A modelling study of the Great Barrier Reef / A. Maggiorano [et al.] // *Ocean Modelling*. 2025. Vol. 193. 102465. EDN RHFIGI. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2024.102465>
7. Relationships between the surface concentration of particulate organic carbon and optical properties in the eastern South Pacific and eastern Atlantic Oceans / D. Stramski [et al.] // *Biogeosciences*. 2008. Vol. 5, iss. 1. P. 171–201. EDN YALQBH. <https://doi.org/10.5194/bg-5-171-2008>
8. Gomathisankaraprasad Harharasudhan V., Shanmugam P. Modelling the Particulate Backscattering Coefficients of Turbid and Productive Coastal Waters // *Ocean Science Journal*. 2019. Vol. 54, iss. 2. P. 147–164. EDN QQEAFM. <https://doi.org/10.1007/s12601-019-0012-z>

9. *Joshi I. D., D'Sa E. J.* An estuarine-tuned quasi-analytical algorithm (QAA-V): assessment and application to satellite estimates of SPM in Galveston Bay following Hurricane Harvey // *Bio-geosciences*. 2018. Vol. 15, iss. 13. P. 4065–4086. <https://doi.org/10.5194/bg-15-4065-2018>
10. Определение концентрации взвешенного вещества в Черном море по данным спутника *MODIS* / Д. А. Кременчуцкий [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2014. № 29. С. 5–9. EDN UXWYMX.
11. *Кукушкин А. С., Пархоменко А. В.* Пространственно-временная изменчивость содержания взвешенного вещества в поверхностном слое открытой части Черного моря // *Океанология*. 2021. Т. 61, № 2. С. 307–319. EDN EYVMTL. <https://doi.org/10.31857/S0030157421010123>
12. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. Москва : ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. 140 с. EDN YOSZPV.
13. Regional challenges concerning derivation of suspended particulate matter concentration and water turbidity from water reflectance. A case study in the western Black Sea / S. Constantin [et al.] // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 2024. Vol. 305. 108871. EDN ACNZHI. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2024.108871>
14. Global Estimation of Suspended Particulate Matter From Satellite Ocean Color Imagery / J. Wei [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2021. Vol. 126, iss. 8. e2021JC017303. EDN LFPKQX. <https://doi.org/10.1029/2021JC017303>
15. Performance Evaluation of Inherent Optical Property Algorithms and Identification of Potential Water Quality Indicators Using GCOM-C Data in Eutrophic Lake Kasumigaura, Japan / M. Choto [et al.] // *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17, iss. 9. 1621. EDN XMWUIM. <https://doi.org/10.3390/rs17091621>
16. *Lee Z. P., Carder K. L., Arnone R. A.* Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // *Applied Optics*. 2002. Vol. 41, iss. 27. P. 5755–5772. EDN LVCWJJ. <https://doi.org/10.1364/AO.41.005755>
17. *Кукушкин А. С., Суслин В. В.* Оценка применимости спутниковых данных для исследования изменчивости содержания взвешенного вещества в поверхностном слое глубоководной области Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 5. С. 595–605. EDN LPFNPI. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-5-595-605>
18. *Dihkan M., Karsli F., dan Guneroglu A.* Mapping Total Suspended Matter Concentrations in the Black Sea using Landsat TM Multispectral Satellite Imagery // *Fresenius Environmental Bulletin*. 2011. Vol. 20, iss. 1a. P. 262–269.
19. Comparison of In Situ and Remote-Sensing Methods to Determine Turbidity and Concentration of Suspended Matter in the Estuary Zone of the Mzymta River, Black Sea / K. Nazirova [et al.] // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, iss. 1. 143. EDN UCCCFT. <https://doi.org/10.3390/rs13010143>
20. *Zhang X., Hu L., He M.-X.* Scattering by pure seawater: Effect of salinity // *Optics Express*. 2009. Vol. 17, iss. 7. P. 5698–5710. <https://doi.org/10.1364/OE.17.005698>
21. *Pope R. M., Fry E. S.* Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements // *Applied Optics*. 1997. Vol. 36, iss. 33. P. 8710–8723. <https://doi.org/10.1364/AO.36.008710>
22. Связь пространственной структуры концентрации общего взвешенного вещества и гидрологических параметров в северной части Черного моря по данным контактных измерений / А. А. Латунский [и др.] // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 2. С. 124–137. EDN QFVMZB. <https://doi.org/10.48612/fpg/4heu-kxbn-gg7t>
23. Распространение вод из Керченского пролива в Черное море / А. А. Алескерова [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 6. С. 53–64. EDN YLLPXN. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-53-64>

24. Role of suspended matter in controlling beryllium-7 (^7Be) in the Black Sea surface layer / D. A. Kremenchutskii [et al.] // Journal of Marine Systems. 2021. Vol. 217. 103513. EDN ARNRWT. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103513>
25. Комплексные исследования Черного моря в 101-м рейсе научно-исследовательского судна «Профессор Водяницкий» / А. А. Ключиткин [и др.] // Океанология. 2019. Т. 59, № 2. С. 315–318. EDN ZKXFXF. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574592315-318>
26. Ломакин П. Д., Чепыженко А. И., Чепыженко А. А. Поле концентрации общего взвешенного вещества в Керченском проливе на базе оптических наблюдений // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 6. С. 65–77. EDN YLLPXW. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2017-6-65-77>

Об авторе:

Кременчуцкий Дмитрий Александрович, старший научный сотрудник, отдел биогеохимии моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-8747-6612**, **ResearcherID: AAC-1673-2020**, **SPIN-код: 1695-9378**, d.kremenchutsky@gmail.com