

Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море

Е. Н. Корчёмкина*, А. О. Райкина

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*korchemkina@mhi-ras.ru

Аннотация

Для Черного моря между дистанционными оценками оптических характеристик морской воды и контактными измерениями наблюдаются видимые расхождения. Несмотря на то что современные алгоритмы атмосферной коррекции учитывают ненулевую яркость в длинноволновой области, они целиком не решают проблемы и требуют дополнительного анализа. В работе сопоставлены данные дистанционного зондирования и одновременных экспедиционных измерений коэффициента яркости и прозрачности атмосферы для дальнейшего усовершенствования стандартных методов атмосферной коррекции с учетом реальной аэрозольной оптической толщины. Рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости толщи вод и оптических характеристик атмосферы, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 и 2021 гг. по Черному морю. В результате сопоставления натуральных данных со спутниковыми установлено, что спутниковые данные коэффициента яркости в Черном море в весенний период в среднем занижены по сравнению с контактными измерениями. Средние значения показателя Ангстрема и аэрозольной оптической толщины по спутниковым данным вдвое превышают натурные измерения. Сильно завышенные по сравнению с натурными измерениями значения показателя Ангстрема приводят к избыточному учету влияния атмосферы и, как следствие, к занижению значений коэффициента яркости.

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, атмосферная коррекция, аэрозольная оптическая толщина, параметр Ангстрема, спектрофотометр, солнечный фотометр *SPM*

Благодарности: авторы выражают благодарность м. н. с. отдела оптики и биофизики моря Д. В. Калининской за обработку данных о характеристиках атмосферы. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2021-0003 «Оперативная океанология».

Для цитирования: Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О. Источники погрешности спутниковых данных в весенний период в Черном море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2022. № 4. С. 39–51. EDN YQDXKA. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-39-51

© Корчёмкина Е. Н., Райкина А. О., 2022



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Sources of Errors of Satellite Data in Spring in Black Sea

E. N. Korchemkina, A. O. Raykina

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**korchemkina@mhi-ras.ru*

Abstract

For the Black Sea, there are visible discrepancies between remote estimates of the optical characteristics of sea water and contact measurements. Despite the fact that modern atmospheric correction algorithms take into account non-zero brightness in the long-wavelength region, they do not completely solve the problem and require additional analysis. In this paper, we compare remote sensing data and data from simultaneous field measurements of the sea reflectance and atmospheric transparency in order to further improve the standard methods of atmospheric correction, taking into account the real aerosol optical depth. In this paper, we consider the measurement data of the spectral reflectance of the water column and the optical characteristics of the atmosphere, obtained during the cruises of the R/V *Professor Vodyanitsky* in the spring of 2019 and 2021 in the north-eastern part of the Black Sea. As a result of comparison with satellite data, it was found that satellite reflectance data in the Black Sea in spring are on average underestimated compared to contact measurements. The average values of the Angström parameter and the aerosol optical depth according to satellite data are twice as high as field measurements. The values of the Angström exponent, which are greatly overestimated compared to field measurements, lead to an excessive allowance for the influence of the atmosphere and, as a result, to an underestimation of the reflectance values.

Keywords: sea reflectance, atmospheric correction, atmospheric aerosol optical depth, Angström parameter, spectrophotometer, SPM sun photometer

Acknowledgement: the authors are grateful to junior research associate of the Department of Marine Optics and Biophysics D. V. Kalinskaya for processing data on atmospheric characteristics. The work was performed under state assignment of FSBSI FRC MHI on topic no. FNNN-2021-0003 “Operational oceanology”.

For citation: Korchemkina, E.N. and Raykina, A.O., 2022. Sources of Errors of Satellite Data in Spring in Black Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 39–51. doi:10.22449/2413-5577-2022-4-39-51

Введение

В настоящее время спутниковые методы исследования являются наиболее эффективными для глобального анализа состояния морской среды. Данные космических сканеров цвета дают возможность получить сведения о важных оптических параметрах верхнего слоя воды (концентрация хлорофилла, содержание взвешенного вещества, прозрачность вод океана и т. д.) в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Эти сведения являются показателями экосистемы и служат входными параметрами для моделей оценки климата Земли [1–4]. Однако для Черного моря между данными дистанционного зондирования и показаниями контактных измерений наблюдаются видимые расхождения, поскольку стандартный алгоритм обработки спутниковых наблюдений разработан для открытых океанских вод [5]. Известно, что оптические свойства вод в Черном море и океане различаются, в частности

вследствие повышенного поглощения света желтым веществом и большего количества взвешенного вещества, в том числе терригенного происхождения [6]. Согласно работе ¹⁾, в Черном море в районе исследований вклад желтого вещества в показатель ослабления достигает 28 % на длине волны 416 нм (и убывает с длиной волны), а совместный вклад рассеяния крупной и мелкой взвесью – 64 % на той же длине волны. Для длины волны 506 нм эти вклады составляют 9 и 80 % соответственно.

Стандартный алгоритм атмосферной коррекции предполагает, что в длинноволновой части яркость излучения, выходящего из водной толщи, равна нулю (алгоритм черных пикселей) [7]. Это предположение справедливо только для оптически глубоких вод типа 1 с концентрацией хлорофилла 0.3 мг/м³ или менее и не подходит для вод, содержащих более высокие концентрации хлорофилла или минеральных частиц ²⁾. Большие ошибки особенно характерны для прибрежных территорий и областей речного стока [8, 9], которые отличаются от открытых районов моря в два раза большим вкладом неживой взвеси (20–30 %) в общее поглощение света в диапазоне длин волн 400–500 нм [10–12].

В этом случае использование алгоритма черных пикселей для корректировки ненулевого вклада воды может привести к завышению оптической толщины аэрозоля, то есть к вычитанию слишком большого значения коэффициента отражения аэрозоля из коэффициента яркости на верхней границе атмосферы. Результирующий коэффициент яркости водной толщи тогда будет слишком мал, а в синей области спектра может даже оказаться отрицательным ²⁾.

Несмотря на то что современный алгоритм атмосферной коррекции использует итерационный метод учета ненулевой яркости [13], он целиком не решает проблемы и требует дополнительного анализа.

Ранее на основе данных натурных измерений уже были созданы региональные алгоритмы для морей России, в том числе для Черного моря [14, 15]. В работе [14] рассматриваются способы уменьшения влияния ошибок атмосферной коррекции на точность расчета биооптических параметров воды. Метод базируется на одновременном расчете аэрозольного вклада $\rho_a(\lambda_i)$ и спектрального коэффициента яркости моря $\rho_w(\lambda_i)$ по измеренным значениям коэффициента яркости $\rho_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы. Контроль ошибок атмосферной коррекции производится с помощью сопоставления данных, полученных *in situ*, и значений, рассчитанных по спутниковым данным.

В статье [15] предлагается корректировать спектры коэффициента яркости моря, используя данные об изменчивости аэрозольных характеристик атмосферы, полученные на основе натурных измерений солнечным фотометром

¹⁾ Маньковский В. И., Соловьев М. В., Маньковская Е. В. Гидрооптические характеристики Черного моря. Справочник. Севастополь : МГИ НАН Украины, 2009. С. 20–21. URL: https://www.researchgate.net/publication/330244483_Gidroopticeskie_harakteristiki_Cernogo_mora (дата обращения: 17.11.2022).

²⁾ Atmospheric correction for satellite ocean color radiometry / C. D. Mobley [et al.]. Greenbelt, Maryland : Goddard Space Flight Center, 2016. 85 p. doi:10.13140/RG.2.2.23016.78081

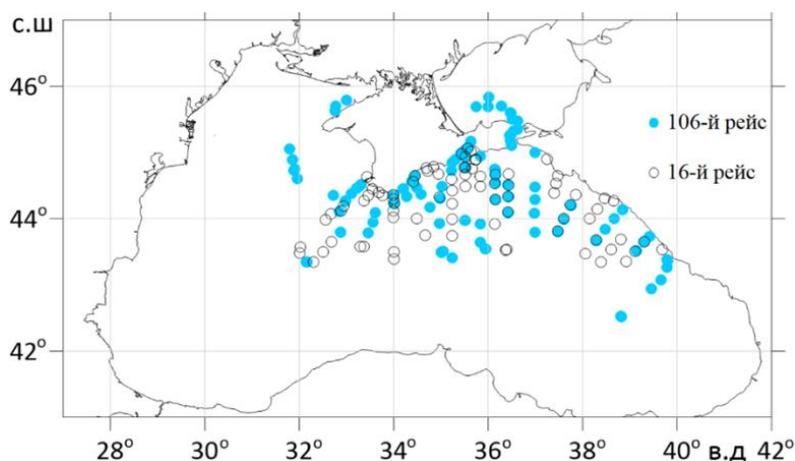
характеристик атмосферы. Анализ основывается на использовании спектра погрешности измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) солнечным фотометром *SPM*. Показано, что скорректированные на основании статистических данных спектры достаточно хорошо согласуются с результатами прямых измерений.

АОТ является основной характеристикой аэрозоля, определяющей интегральное (в столбе атмосферы) ослабление прямой солнечной радиации. Она имеет спектральные особенности, зависящие от размеров и показателя преломления аэрозольных частиц. АОТ является одним из основных параметров, влияющих на рассеяние и поглощение солнечного света в атмосфере. Сопоставление АОТ, измеренной со спутника и с поверхности, может предоставить полезную дополнительную информацию для обработки спутниковых данных и позволит получить более точные спектры коэффициента яркости по дистанционным оценкам.

Цель настоящей работы – сопоставить данные дистанционного зондирования и данные экспедиционных измерений коэффициента яркости для дальнейшего усовершенствования стандартных методов обработки спутниковых измерений восходящей яркости воды с учетом реальной АОТ.

Данные и методы

В работе рассматриваются данные измерений спектрального коэффициента яркости (КЯ) толщи вод и оптических характеристик атмосферы, полученные в ходе экспедиций НИС «Профессор Водяницкий» весной 2019 и 2021 гг. по Черному морю. Измерения проводились авторами работы. Съемка выполнена в северной и северо-восточной частях Черного моря ($42.5\text{--}45.8^\circ$ с. ш.; $31.5\text{--}39.8^\circ$ в. д.) в период 18 апреля – 13 мая 2019 г. (106-й рейс) и 22 апреля – 8 мая 2021 г. (116-й рейс). В 2019 г. спектры коэффициента яркости водной толщи были получены на 89 участках, в 2021 г. – на 68 (рис. 1). Измерения спектрального коэффициента яркости проводились с борта судна спектрофотометром, разработанным в отделе оптики и биофизики моря МГИ РАН [16].



Р и с . 1 . Схема станций, на которых выполнялись измерения в ходе двух рейсов

F i g . 1 . Measurement sites during the two cruises

Измерялись яркость восходящего из моря излучения под углом 30° к надиру и яркость эталонного белого экрана под тем же углом. Как отношение этих величин получены спектры безразмерного КЯ в диапазоне длин волн 390–750 нм с шагом 1 нм и погрешностью 3 %.

АОТ и параметры Ангстрема α и β определялись по данным спектральных измерений прозрачности атмосферы, сделанных с помощью солнечного фотометра *SPM* одновременно с измерениями КЯ. Измерения проводились одновременно в 12 спектральных каналах от ближнего УФ до среднего ИК, центры каналов: 340, 379, 441, 501, 548, 675, 872, 940, 1020, 1244, 1556 и 2134 [17]. Параметры Ангстрема определялись путем аппроксимации полученных данных АОТ зависимостью $\text{AOT}(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}$ в диапазоне длин волн 501–872 нм. В работе будет рассматриваться только параметр α как показатель спектрального наклона АОТ.

В работе также использованы данные второго уровня обработки о восходящем из моря излучении (*Rrs*), об аэрозольной оптической толщине (*aot_869*) и показателе Ангстрема в диапазоне длин волн 550–869 нм (*angstrom*), полученные при помощи спутниковых сканеров *MODIS Aqua/Terra*, *Sentinel-3 A/B* и *VIIRS Suomi NPP/JPSS-1*. При анализе эти данные сравнивались с показаниями натуральных измерений. Данные *Rrs MODIS* и *VIIRS* приведены к безразмерным величинам путем умножения на π . Для корректного сравнения с натурными данными отбирались пиксели без флагов *Straylight*, *Cloud_Margin*, *Cloud_Ambiguous*, совпадающие по координате с точкой *in situ* измерения в пределах 0.01° и по времени в пределах 3 ч. Всего в исследовании использованы данные 49 станций для 106-го рейса и 39 для 116-го рейса (по всем спутникам). Отбирались данные, полученные в условиях безоблачного или малооблачного неба при углах высоты солнца, превышающих 30° .

Результаты и обсуждение

Средние спектры КЯ, построенные по натурным измерениям в 106-м и 116-м рейсах, показаны на рис. 2. Судя по показанному на графиках среднеквадратичному отклонению (СКО), изменчивость спектров КЯ в весенний

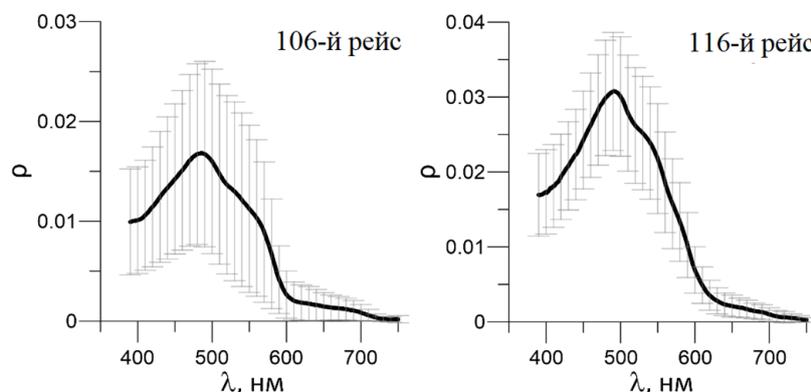


Рис. 2. Средние спектры коэффициента яркости. Бары показывают СКО по всем измерениям

Fig. 2. Average reflectance spectra. Vertical bars show standard deviation of all measurements

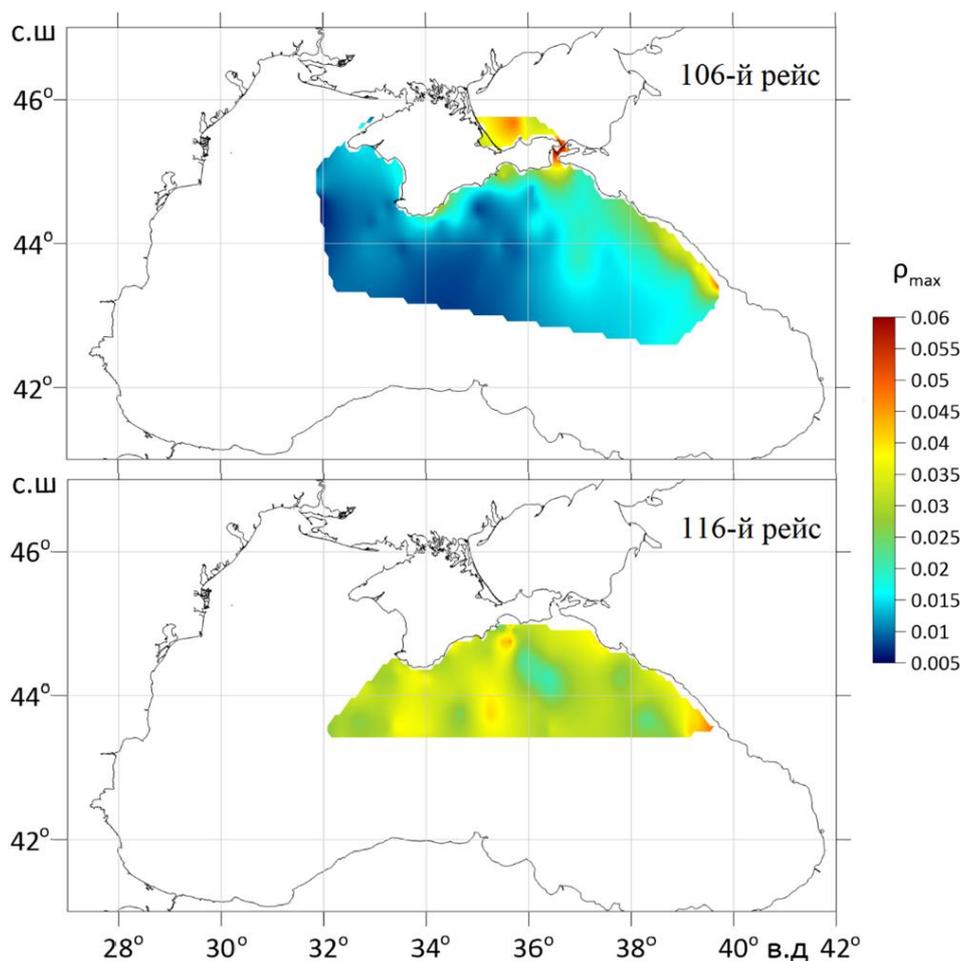


Рис. 3. Распределение спектральных максимумов коэффициента яркости

Fig. 3. Spatial distribution of maximal values of reflectance

период 2019 г. была значительно выше, чем в аналогичный период 2021 г. Подобную ситуацию можно наблюдать и на рис. 3, где показано пространственное распределение максимальных значений КЯ. На нем наблюдается значительная разница между значениями КЯ в прибрежной и глубоководной областях моря в течение 106-го рейса, тогда как в 116-м рейсе наблюдалось более однородное распределение оптических свойств. Различия, вероятно всего, объясняются климатическими и погодными условиями (средней температурой предшествовавшей зимы, количеством осадков в зимне-весенний период и т. д.).

В 2019 г. самые низкие значения КЯ наблюдались на северо-западном шельфе и в центральной глубоководной части полигона. Повышенные значения наблюдались в восточной части полигона и вдоль южного побережья Крыма. Все спектры имеют сходную характерную форму, при этом в восточной глубоководной части максимум КЯ лежал вблизи 480 нм, а в прибрежной

части – вблизи 490 нм. В районе г. Сочи наблюдался плюм, обусловленный стоком р. Мзымты. Здесь форма спектра и значения коэффициента яркости изменялись, максимум смещался в сторону длинных волн до 497 нм, что можно объяснить влиянием повышенной концентрации взвеси и неживой органики, поступающих с речным стоком.

В 2021 г. в исследуемой области изменчивость КЯ была сравнительно низкой. Различия между глубоководной и прибрежной частями как по форме спектров, так и по значениям отсутствовали. Наибольшие вариации наблюдались на востоке исследуемого полигона, разброс значений максимумов КЯ составлял от 0.02 на шельфе за пределами Феодосийского залива до 0.049 в самом заливе.

На рис. 4 приведено сравнение коэффициентов яркости с данными дистанционного зондирования. В основном наблюдается занижение спутниковых данных по сравнению с натурными, однако в некоторых случаях для открытого моря наблюдается хорошее совпадение, пример которого от 14.05.2021 показан на рис. 4, *d*. Особенно сильно занижение проявляется в коротковолновой области, что представляет собой основной вид погрешности, вносимой при неверном подборе параметров атмосферной коррекции. Экстраполяция параметров атмосферного аэрозоля, найденных по измерениям в ближнем ИК-диапазоне с использованием атмосферной модели, приводит к накоплению погрешности с уменьшением длины волны. В случае, когда нельзя пренебречь восходящей яркостью воды в ближней ИК-области (для мутных вод), происходит избыточный учет восходящей яркости атмосферы и занижение значений коэффициента яркости водной толщи.

Для анализа АОТ и показателя Ангстрема были построены их частотные гистограммы. Из рис. 5 видно, что разброс значений АОТ и показателя Ангстрема по спутниковым данным довольно велик при том, что во время экспедиции не наблюдалось никаких экстремальных явлений в атмосфере (пылевых переносов, распространения дыма пожаров и т.п.). По измерениям с поверхности видно, что распределение значений занимает достаточно узкий диапазон. Характеристики атмосферы по данным спутниковых измерений завышены в среднем в 2–3 раза, что приводит к регулярному занижению значений спутникового коэффициента яркости, особенно в коротковолновых каналах.

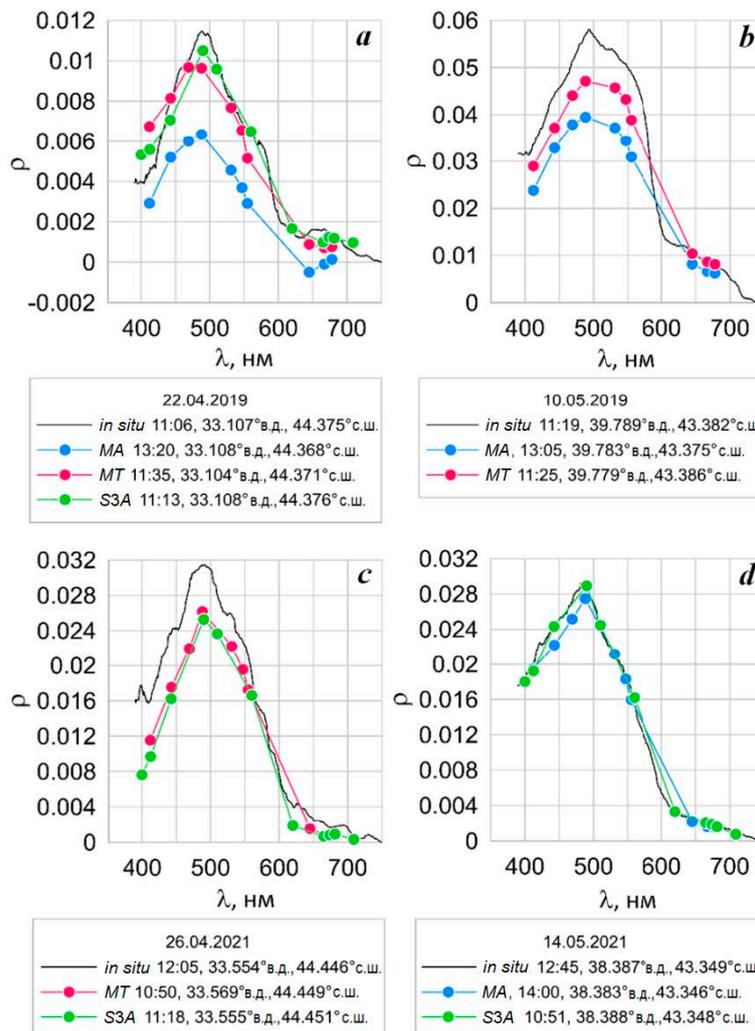
Аналогичные частотные распределения были построены для разницы между натурными и спутниковыми данными, которая рассчитывалась по формулам

$$\Delta(\text{АОТ}) = \text{АОТ}_{\text{нат}} - \text{АОТ}_{\text{спут}},$$

$$\Delta(\alpha) = \alpha_{\text{нат}} - \alpha_{\text{спут}},$$

$$\Delta(Rrs_{412}) = Rrs_{412\text{нат}} - Rrs_{412\text{спут}}.$$

Полученные значения $\Delta(\text{АОТ})$, $\Delta(\alpha)$ и $\Delta(Rrs_{412})$ приведены на рис. 6. Видно, что доминирующим отрицательным значениям Δ для АОТ и параметра Ангстрема соответствуют в основном положительные значения для коэффициента яркости на длине волны 412 нм.



Р и с . 4 . Сопоставление спутниковых и натуральных данных коэффициента яркости (*MA* – *MODIS Aqua*, *MT* – *MODIS Terra*, *S3A/B* – *Sentinel-3 A/B*)

Fig . 4 . Examples of comparison of satellite and *in situ* reflectances (*MA* – *MODIS Aqua*, *MT* – *MODIS Terra*, *S3A/B* – *Sentinel-3 A/B*)

Для рассмотрения средней погрешности стандартной атмосферной коррекции выбраны такие характеристики, как средняя ошибка (*bias*) и средне-квадратичная ошибка модели (*RMSE*):

$$bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rsr_i - Rsr_i^{sat}),$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Rsr_i - Rsr_i^{sat})^2},$$

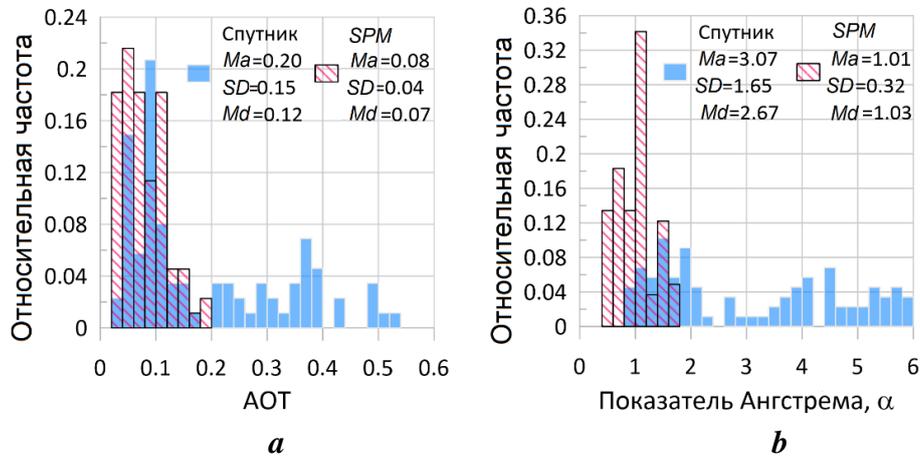


Рис. 5. Частотное распределение значений AOT (a) и показателя Ангстрема (b) по данным со спутника (*MODIS Aqua/Terra*) и с поверхности (*SPM*) (*Ma* – среднее значение; *SD* – среднеквадратичное отклонение; *Md* – медиана)

Fig. 5. Frequency distribution of aerosol optical depth (AOD) and Angstrom parameter from satellite and *in situ* (*SPM*) data (*Ma* – mean value, *SD* – standard deviation, *Md* – median)

которые представляют собой функцию разности между натурными Rrs и спутниковыми после коррекции Rrs^{sat} данными и зависят от длины волны. На рис. 7 представлены их спектральные зависимости для данных сканеров *MODIS Aqua/Terra*. Данные других сканеров в данном исследовании были задействованы в относительно небольшом количестве, недостаточном, чтобы построить достоверные спектры *RMSE* и *bias*.

Спектральные значения *bias* положительны для всех длин волн и уменьшаются с длиной волны. Это говорит о занижении спутниковых данных по сравнению с натурными в среднем на всем спектральном диапазоне (несмотря на то что встречаются отдельные случаи, когда спутниковые значения выше, чем натурные). При этом значения в коротковолновой области также наиболее подвержены погрешности атмосферной коррекции. О том же

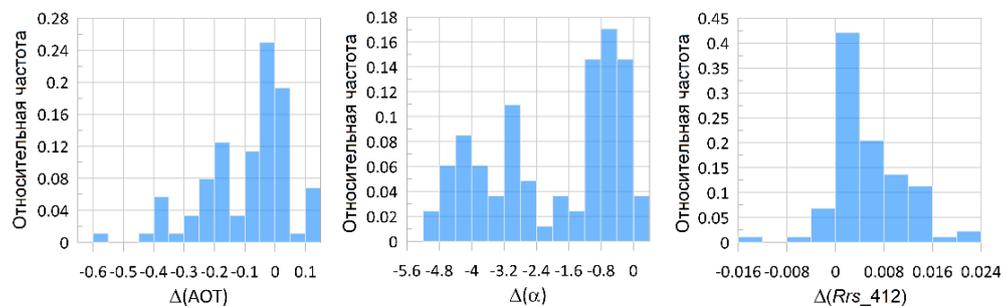


Рис. 6. Распределение значений разницы между натурными и спутниковыми данными

Fig. 6. Frequency distribution of discrepancy between *in situ* and satellite data

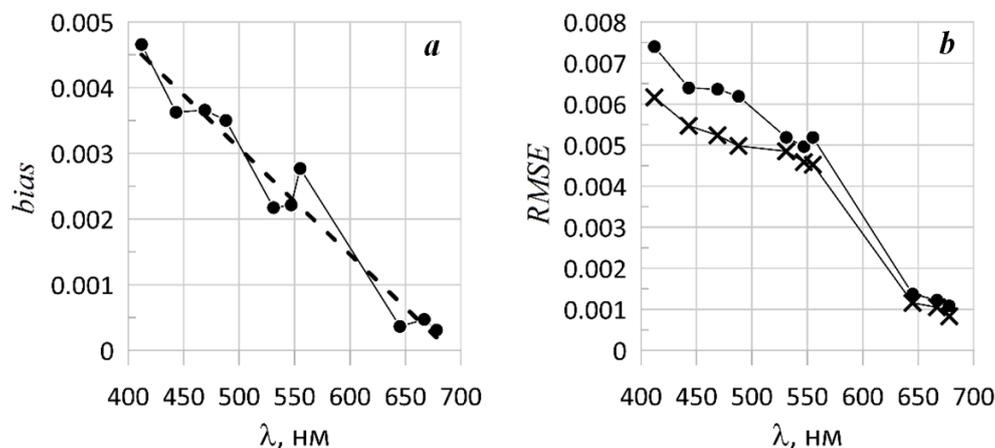


Рис. 7. Спектральные зависимости *bias* (a) и *RMSE* (кружки – до вычитания *bias*, крестики – после) (b) для натуральных данных КЯ и данных *MODIS Aqua/Terra*

Fig. 7. Spectra of *bias* (a) and *RMSE* (circles are for *RMSE* before *bias* subtraction, crosses – after that) (b) for *in situ* and *MODIS Aqua/Terra* reflectances

свидетельствуют и значения *RMSE*, которые убывают с длиной волны (показаны кружками на рис.7, b).

Средний спектр *bias*, аппроксимированный линейной функцией (штриховая линия на рис. 7, a), можно использовать в качестве поправки для спутниковых данных, прибавляемой для компенсации отрицательных значений в коротковолновой области. Если к спектрам спутникового КЯ добавлять значение *bias*, то соответствие между спутниковыми данными и натурными становится в среднем несколько выше. Это можно увидеть как по значениям *RMSE* на рис. 7, отмеченным крестиками, так и на некоторых примерах, приведенных на рис. 8. Однако данный способ не позволит полностью устранить отдельные случаи, когда занижение спутниковых данных слишком сильное или когда значения, наоборот, завышены.

Приведенные значения *bias* получены только по данным весеннего периода 2019 и 2021 гг. и представляют собой попытку скорректировать спутниковые данные КЯ. Такой критерий оценки точности модели, как *RMSE*, уменьшается на 16 % для длины волны 412 нм, что показывает небольшое улучшение точности восстановления спутниковых спектров коэффициента яркости. Для лучших результатов следует обработать больший массив натуральных данных для различных сезонов и районов моря, которого в настоящее время нет.

В исследовании применялась строгая выбраковка спутниковых данных по критерию возможного наличия облачности, поэтому среднее значение поправки вычислено без их влияния. Однако даже при наличии подсветки от облаков предложенный подход позволит частично компенсировать вклад дополнительной яркости, так как она либо спектрально неселективна, либо так же, как и поправочное слагаемое, возрастает в сторону коротких волн.

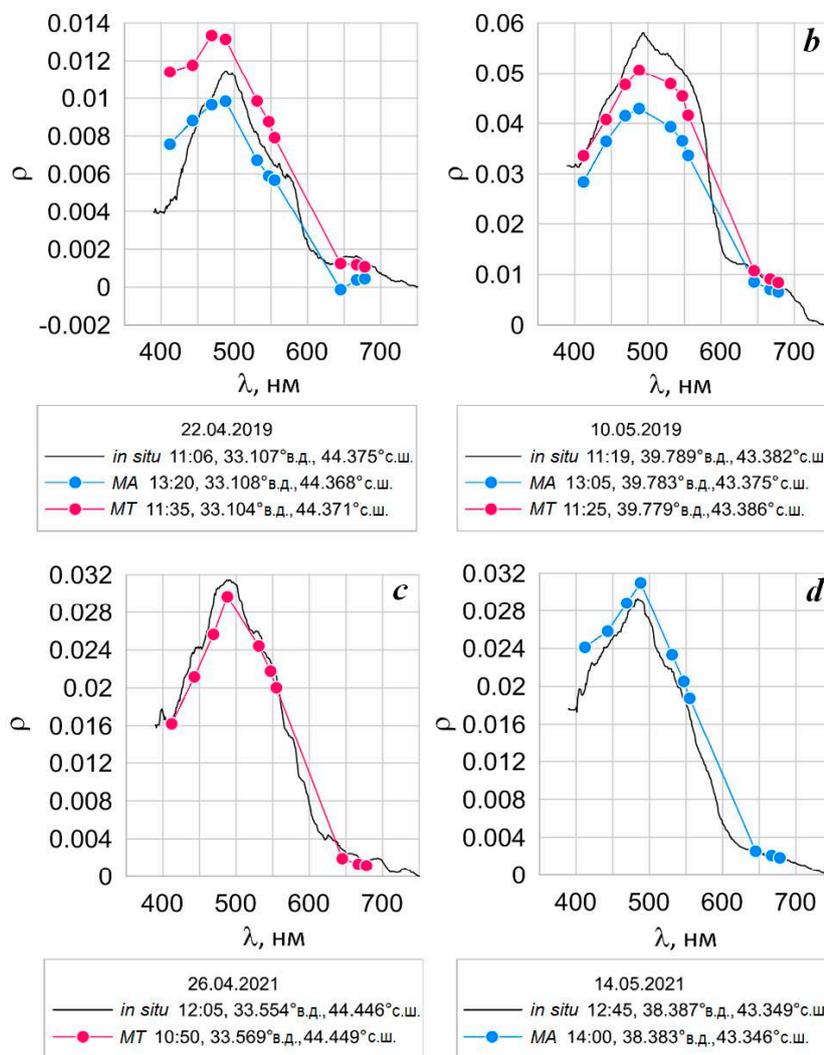


Рис. 8. Сопоставление скорректированных спутниковых и натурных данных коэффициента яркости (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra)

Fig. 8. Examples of comparison of corrected satellite and *in situ* reflectances (MA – MODIS Aqua, MT – MODIS Terra)

Выводы

Сопоставление данных спутниковых сканеров цвета с результатами натурных измерений позволило сделать вывод о влиянии ошибок определения параметров аэрозоля над Черным морем по спутниковым данным на возможности восстановления восходящего из моря излучения.

1. Спутниковые данные о коэффициенте яркости в Черном море в весенний период в среднем занижены по сравнению с контактными измерениями.

2. Средние значения показателя Ангрстрема и АОТ по спутниковым данным вдвое превышают натурные измерения. Сильно завышенные по сравнению

с натурными измерениями значения показателя Ангстрема приводят к избыточному учету влияния атмосферы и, как следствие, к занижению значений коэффициента яркости.

3. Использование значений *bias* в качестве поправочного слагаемого позволяет снизить среднюю погрешность расчета КЯ по спутниковым измерениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pauly D., Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries // Nature. 1995. Vol. 374. P. 255–257. doi:10.1038/374255a0
2. Comparison of new and primary production models using SeaWiFS data in contrasting hydrographic zones of the northern North Atlantic / G. H. Tilstone [et al.] // Remote Sensing of Environment. 2015. Vol. 156. P. 473–489. doi:10.1016/j.rse.2014.10.013
3. Evaluation of regional surface energy budget over ocean derived from satellites/ S. Kato [et al.] // Frontiers in Marine Science. 2021. Vol. 8. 688299. doi:10.3389/fmars.2021.688299
4. Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate / N. G. Loeb [et al.] // Geophysical Research Letters. 2021. Vol. 48, iss. 13. e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>
5. Сравнительный анализ методов определения оптических параметров вод Черного моря по данным спутниковых измерений / В.С. Суетин [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2011. № 2. С. 33–42. EDN TMJWUR.
6. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / О. В. Копелевич [и др.]. М. : ИО РАН, 2018. 140 с.
7. Gordon H. R., Wang M. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // Applied Optics. 1994. Vol. 33, iss. 3. P. 443–452. <https://doi.org/10.1364/AO.33.000443>
8. Atmospheric correction for inland waters/ W. J. Moses [et al.] // Bio-Optical Modeling and Remote Sensing of Inland Waters. Amsterdam, The Netherlands : Elsevier, 2017. P. 69–100. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804644-9.00003-3>
9. Imaging Spectrometry of Inland and Coastal Waters: State of the Art, Achievements and Perspectives / C. Giardino [et al.] // Surveys in Geophysics. 2019. Vol. 40, iss. 3. P. 401–429. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9476-0>
10. Light absorption by non-algal particles and colored dissolved organic matter at the wavelength of 490 nm in the Black Sea in the autumn (2015 and 2016) / N. Moiseeva [et al.] // Proceedings of SPIE. Tomsk : IAO SB RAS, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 108336B. <https://doi.org/10.1117/12.2504650>
11. Dissolved and Suspended Matter Variability in Coastal Waters: Photosynthetic Available Light / T. Churilova [et al.] // Proceedings of SPIE. Tomsk : IAO SB RAS, 2018. Vol. 10833 : 24th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. 1083365. <https://doi.org/10.1117/12.2504637>
12. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Длина волны максимума спектра коэффициента яркости моря как дистанционный показатель водообмена между экологически различными акваториями // Океанология. 2015. Т. 55, № 3. С. 366–378. EDN RTWEGM. doi:10.7868/S0030157415030065

13. *Bailey S. W., Franz B. A., Werdell P. J.* Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing // *Optics Express*. 2010. Vol. 18, iss. 7. P. 7521–7527. <https://doi.org/10.1364/OE.18.007521>
14. *Копелевич О. В., Буренков В. И., Шеберстов С. В.* Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2006. Вып. 3, т. 2. С. 99–105. EDN NDPPHL.
15. *Korchemkina E. N., Kalinskaya D. V.* Algorithm of Additional correction of level 2 remote sensing reflectance data using modelling of the optical properties of the Black Sea waters // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, iss. 4. 831. <https://doi.org/10.3390/rs14040831>
16. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения / М. Е. Ли [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2015. № 6. С. 17–33. doi:10.22449/0233-7584-2015-6-17-33
17. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях / С. М. Сакерин [и др.] // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117. EDN PKZHTN.

Поступила 20.06.2022 г.; одобрена после рецензирования 12.08.2022 г.; принята к публикации 02.11.2022 г.; опубликована 23.12.2022 г.

Об авторах:

Корчёмкина Елена Николаевна, старший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: I-1595-2015**, **ORCID ID: 0000-0003-0526-4083**, **Scopus Author ID: 23004799100**, korchemkina@mhi-ras.ru

Райкина Алина Олеговна, инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, 2), alina.raykina@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Корчёмкина Елена Николаевна – формулировка и постановка задачи, сбор натуральных данных, анализ данных, интерпретация результатов, формулировка выводов

Райкина Алина Олеговна – анализ данных, интерпретация и описание результатов, формулировка выводов, написание текста рукописи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.