

Использование данных об изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля для коррекции спектров коэффициента яркости моря

В работе предложена методика коррекции спектров коэффициента яркости моря с использованием данных об изменчивости оптических свойств атмосферного аэрозоля, полученных при помощи солнечного фотометра *CIMEL*, входящего в состав международной сети *AERONET*. Показано, что применение данной методики позволяет корректировать спектры коэффициента яркости с учетом состояния облачности. С использованием разработанной методики проведен расчет концентраций хлорофилла *a* для района океанографической платформы ЭО МГИ НАН Украины (пос. Кацивели, Черное море). Приведено сравнение концентраций, рассчитанных по данным контактных и спутниковых измерений восходящей яркости моря для района платформы.

Ключевые слова: коэффициент яркости, хлорофилл *a*, аэрозольная оптическая толщина, атмосферная коррекция.

Введение. Анализ данных спутниковых сканеров цвета моря предполагает учет вклада атмосферы в восходящую яркость, поскольку доля сигнала моря в общем сигнале мала. При стандартных методах для атмосферной коррекции используются данные инфракрасных каналов сканеров [1]. В прибрежной зоне изменчивость характеристик аэрозоля особенно высока, в основном за счет его мелкой фракции, что ведет к большой изменчивости суммарного рассеяния в синей области спектра. Уже это показывает, что экстраполяция показателя рассеяния аэрозоля из красной части спектра в синюю не достаточно достоверна и может приводить к большим ошибкам в последующем определении коэффициента яркости в коротковолновой области. В этом случае концентрации хлорофилла *a*, восстановленные по спектру коэффициента яркости, часто оказываются завышенными, особенно для прибрежных вод [2].

Ранее было показано [3], что наличие даже приблизительной оценки диффузного отражения света морем на границе диапазона измерений в синей области позволило бы значительно повысить точность атмосферной коррекции в других спектральных каналах. В статье [4] предлагается корректировать спектры коэффициента яркости, уже прошедшие стандартную коррекцию, с использованием двухпараметрической модели, опираясь на два измеренных значения в зеленой части спектра. Предполагается, что эти значения наименее подвержены влиянию погрешности стандартной атмосферной коррекции. Поскольку оптические свойства воды в Черном море зависят в основном от содержания детрита и растворенной органики, то с помощью двухпараметрической модели, в которой учитываются только поглощение детритом и растворенной органикой и рассеяние взвесью, можно приближенно описать коэффициент яркости вне полос поглощения хлорофилла *a*.

В той же работе [4] был определен спектральный ход погрешности стандартной атмосферной коррекции как спектр первого собственного вектора ковариационной матрицы значений восходящей яркости на верхней границе атмосферы для случая, когда вклад моря минимален. Поправка, добавляемая при коррекции, считалась пропорциональной найденному спектру. В результате спектральный ход погрешности описывался выражением

$$C(\lambda) = \frac{x}{\lambda^n} + y, \quad (1)$$

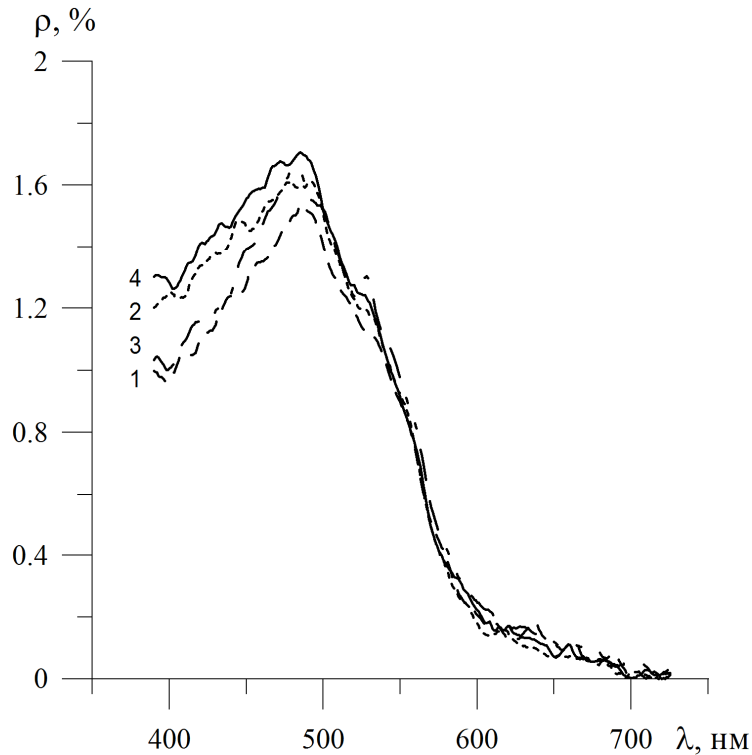
где λ – длина волны; x и y – константы, зависящие от имеющихся оценочных значений коэффициента яркости на границах видимого диапазона; значения n изменяются в пределах от 0,7 до 2. Изменчивость данной погрешности максимальна в коротковолновой части видимого диапазона, что приводит дополнительную ошибку в вычислениях.

Для того чтобы более точно оценить спектральный ход аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы и ее погрешностей, в нашей работе были использованы данные солнечного фотометра *CIMEL*, расположенного в Севастополе и входящего в состав международной сети *AERONET* [5]. Этот фотометр измеряет яркость прямого солнечного излучения каждые 15 мин в диапазоне от 340 до 1020 нм, что позволяет оперативно получать информацию о состоянии атмосферы и сопоставлять ее с данными дистанционного измерения яркости моря.

В работе [6] было показано, что, несмотря на значительное расстояние между местом расположения фотометра (Севастополь) и районом измерения параметров морской воды (Кацивели) и различную плотность покрытия небосвода облаками, величины оптических характеристик атмосферы практически совпадают. Это позволяет увеличить количество известных параметров для района океанографической платформы за счет продуктов инверсии измерений АОТ фотометром *CIMEL*. Поэтому методику коррекции из статьи [4] было предложено модифицировать так, чтобы использовать в ней спектры АОТ, полученные по непосредственным измерениям.

Целью работы является демонстрация возможности восстановления концентраций хлорофилла a по дистанционным измерениям на основе данных сети *AERONET* для коррекции спектров коэффициента яркости.

Методика вычислений. В работе использованы данные второго уровня обработки о восходящем из моря излучении, полученные при помощи спутникового сканера *MODIS Aqua*. При анализе эти данные сравнивались со спектрами коэффициента яркости моря, полученными с 11 по 17 августа 2010 г. на океанографической платформе в Кацивели (рис. 1). Измерения выполнялись при помощи спектрофотометра, разработанного в отделе оптики моря МГИ НАН Украины. Методика измерений позволяет исключить влияние прямого света, отраженного от водной поверхности (блика) [6]. Для района океанографической платформы за 13 и 17 августа имеются данные одновременных дистанционных и контактных измерений (при обработке спутниковых измерений за 17 августа рассматривались ближайшие к платформе пиксели).



Р и с. 1. Примеры спектров коэффициента яркости моря, полученных летом 2010 г. на океанографической платформе в Качивели: 1 – 12 августа, 2 – 13 августа, 3 – 14 августа, 4 – 17 августа

По контактным и дистанционным измерениям коэффициента яркости моря были рассчитаны концентрации хлорофилла a для района океанографической платформы. Алгоритм, использованный для этого, подробно изложен в статье [7]. Коэффициент яркости ρ в нем описывается следующим уравнением трехпараметрической модели:

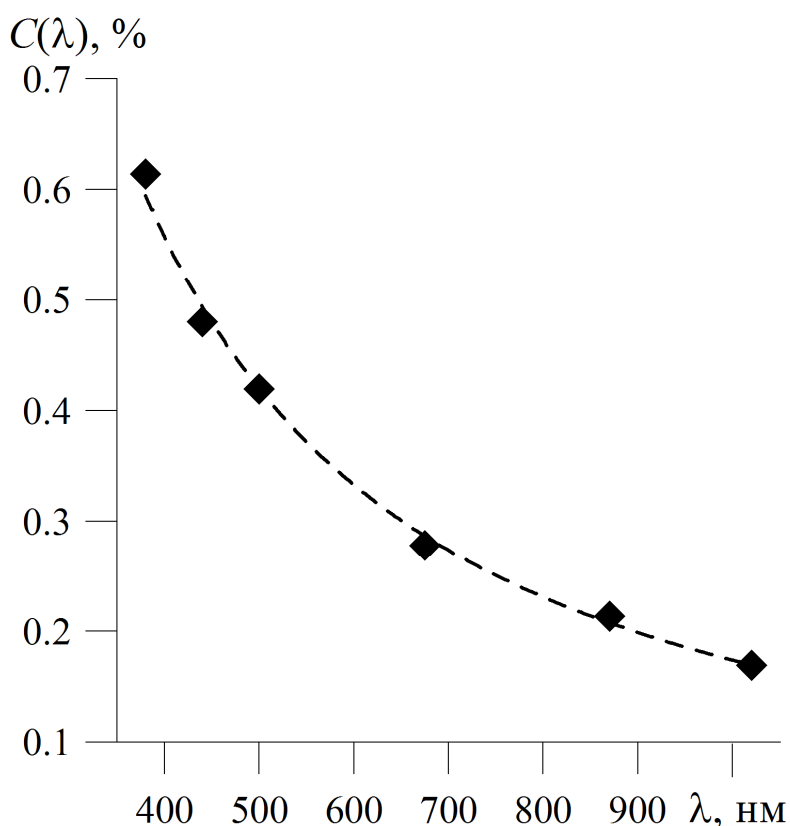
$$\rho = k \frac{b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda_0)(\lambda_0 / \lambda)}{a_w(\lambda) + C_{chl} a_{chl}^*(\lambda) + C_{ddm} e^{-\alpha(\lambda - \lambda_0)}}, \quad (2)$$

где $k = 0,15$; $b_{bw}(\lambda)$ и $a_w(\lambda)$ – обратное рассеяние и поглощение света чистой морской водой [8]; $a_{chl}^*(\lambda)$ – удельное поглощение хлорофилла a , α – спектральный наклон показателя поглощения неживой органики [9]; $\lambda_0 = 400$ нм; C_{chl} , C_{ddm} , $b_{bp}(\lambda_0)$ – искомые параметры: концентрации хлорофилла a и неживой органики и обратное рассеяние взвесью на длине волны λ_0 соответственно.

Неизвестные параметры рассчитываются с помощью итерационной процедуры, в процессе которой каждый параметр вычисляется для отдельного

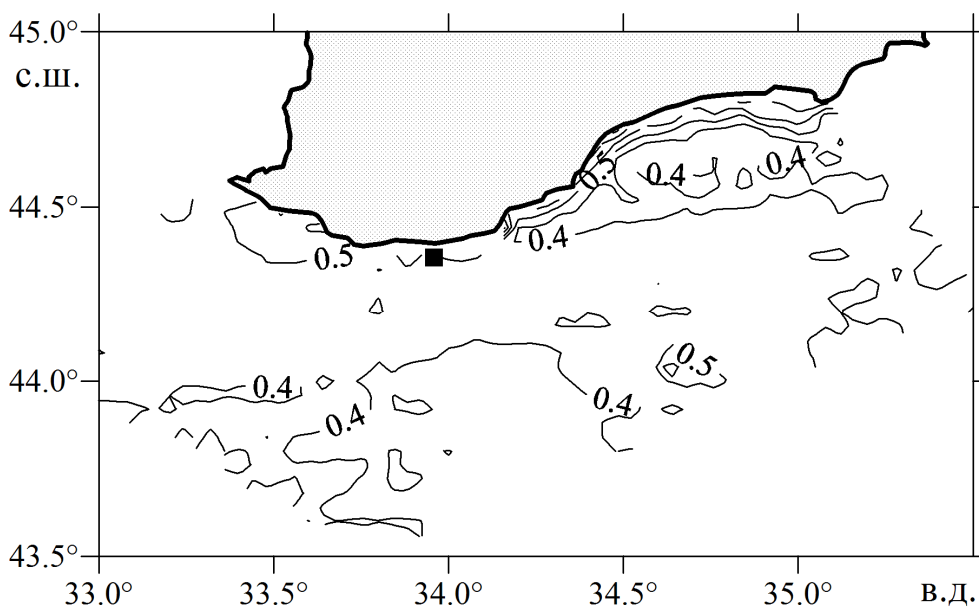
спектрального участка. Такая методика позволяет повысить устойчивость решения и упростить расчеты.

Для реализации разработанной методики атмосферной коррекции было предложено использовать не априорно заданный спектр восходящей яркости атмосферного аэрозоля, а спектр погрешности измерений АОТ солнечным фотометром *CIMEL*. Для каждого момента времени значение АОТ находится как среднее из трех измерений, проведенных с интервалом в 30 с. Анализ погрешностей таких триплетов позволяет оценить изменчивость аэрозольных характеристик атмосферы. Статистическая обработка данных сети *AERONET* показала, что для периода наблюдений на океанографической платформе спектр погрешности определения АОТ можно аппроксимировать выражением (1). На рис. 2 показан пример такой аппроксимации для 13 августа 2010 г., для которой $n = 1,27$. За время измерений значение n изменялось от 1 до 1,36, и пренебрежение данной изменчивостью привнесло бы в коэффициент яркости дополнительную ошибку порядка 10%.



Р и с. 2. Осредненный за сутки спектр погрешностей в триплете измерений по данным сети *AERONET* за 13 августа 2010 г. (ромбы – полученные значения, штриховая линия – аппроксимация выражением (1))

Анализ результатов вычислений. На рис. 3 приведено пространственное распределение концентраций хлорофилла *a*, рассчитанное по данным сканера *MODIS* для района платформы. Отметим, что в целом наблюдается распределение, характерное для данного района, однако концентрации хлорофилла *a* существенно ниже, чем в те же периоды нескольких предшествующих лет [7, 9]. Анализ глубины видимости белого диска, измерявшейся одновременно с коэффициентом яркости, также подтверждает, что концентрации примесей морской воды были существенно ниже характерных для данного района. Так, в эксперименте наблюдались глубины видимости белого диска 15 – 18 м, что свидетельствует о большей прозрачности прибрежных вод по сравнению с предыдущими годами.



Р и с. 3. Распределение концентраций хлорофилла *a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) в районе океанографической платформы (отмечено квадратом) 13 августа 2010 г.

В таблице приведено сопоставление концентраций хлорофилла *a*, полученных по данным контактных и дистанционных измерений.

**Сравнение концентраций хлорофилла *a* (C_{chl} , $\text{мг}/\text{м}^3$),
полученных по данным контактных и дистанционных измерений**

Дата	На платформе	Данные <i>MODIS</i> с коррекцией	Данные <i>MODIS</i> без коррекции
13.08.10	0,61	0,55	0,34
17.08.10	0,48	0,45	0,28

Поскольку измерения часто прерывались облачностью, то одновременные спутниковые и контактные данные имеются только для двух дней измерений. Они показывают хорошее соответствие, что свидетельствует о качестве проведенной коррекции. Исходные спутниковые данные в основном получены на границах с облачностью, и стандартной атмосферной коррекции при этом недостаточно.

Заключение. Данные об аэрозольной оптической толщине атмосферы, получаемые при помощи солнечных фотометров сети *AERONET*, можно использовать в качестве основания для проведения коррекции спутниковых спектров коэффициента яркости. Данные, предоставляемые сетью *AERONET*, позволяют оперативно оценить кратковременную изменчивость оптических свойств атмосферы, что представляет ценность для исследования прибрежных районов моря, где эта изменчивость особенно велика.

Поскольку сеть *AERONET* предоставляет не только непосредственные данные измерений АОТ, но и продукты их модельной обработки, в дальнейшем предполагается более полно использовать ее возможности.

Работа выполнена в рамках программы «Наука для мира» по проекту НАТО *ESP.EAP.EFPP* 982678 «Биооптические характеристики Черного моря в приложении к дистанционному зондированию».

Автор выражает благодарность доктору Бренту Холбену за предоставленную возможность использования данных международной сети *AERONET*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gordon H.R., Wang M.* Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm // *Appl. Optics.* – 1994. – 33, № 3. – P. 443 – 452.
2. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V. et al.* Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // *Deep-Sea Res. II.* – 2004. – 51. – P. 1063 – 1091.
3. *Паршиков С.В., Ли М.Е.* Дистанционное зондирование оптически активных примесей с применением коротковолнового участка спектра // *Автоматизированные системы контроля состояния морской среды.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 1992. – С. 65 – 78.
4. *Корчёмкина Е.Н., Шибанов Е.Б., Ли М.Е.* Усовершенствование методики атмосферной коррекции для дистанционных исследований прибрежных вод Черного моря // *Исследование Земли из космоса.* – 2009. – № 6. – С. 24 – 30.
5. <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
6. *Ли М.Е., Мартынов О.В.* Измеритель коэффициентов яркости для подспутниковых измерений биооптических параметров вод // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – С. 163 – 173.
7. *Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н.* Восстановление биооптических характеристик вод Черного моря при условии постоянства коэффициента яркости на длине волны 400 нм // *Морской гидрофизический журнал.* – 2008. – № 1. – С. 38 – 50.

8. *Smith R.C., Baker K.S.* Optical properties of clearest natural waters (200 – 800 nm) // *Appl. Optics.* – 1981. – 20, № 2. – P. 177 – 184.
9. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П.* Поглощение света фитопланктоном, детритом и растворенным органическим веществом в прибрежном районе Черного моря (июль – август 2002 г.) // *Морской гидрофизический журнал.* – 2004. – № 4. – С. 39 – 50.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь
E-mail: lisenik@mail.ru

Материал поступил
в редакцию 17.09.10
После доработки 15.10.10

АНОТАЦІЯ У роботі запропонована методика корекції спектрів коефіцієнта яскравості моря з використанням даних про мінливість оптичних властивостей атмосферного аерозолу, отриманих за допомогою сонячного фотометра *CIMEL*, який входить до складу міжнародної мережі *AERONET*. Показано, що застосування даної методики дозволяє коректувати спектри коефіцієнта яскравості з урахуванням стану хмарності. З використанням розробленої методики проведено розрахунок концентрацій хлорофілу *a* для району океанографічної платформи ЕВ МГІ НАН України (сел. Кацівелі, Чорне море). Наведене порівняння концентрацій, розрахованих за даними контактних і супутникових вимірювань висхідної яскравості моря для району платформи.

Ключові слова: коефіцієнт яскравості, хлорофіл *a*, аерозольна оптична товщина, атмосферна корекція.

ABSTRACT Method of correcting sea reflectance spectra using the data on variability of atmospheric aerosol optical features obtained by the sun photometer *CIMEL* which is a part of international net *AERONET* is proposed. It is shown that application of this method permits to correct reflectance spectra allowing for cloudiness state. Chlorophyll *a* concentrations in the region of the oceanographic platform of ED MHI, NAS of Ukraine (Katsiveli, the Black Sea) are calculated using the developed method. The concentrations calculated using direct and satellite measurements of ascending sea reflectance for the platform region are compared.

Keywords: reflectance, chlorophyll *a*, aerosol optical thickness, atmospheric correction.