РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2019, том 6, выпуск 1, с. 32–39

**———** АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ —

УДК 551.463.5 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.1.32.39

# Зависимость дистанционно измеряемого коэффициента яркости океана от зенитного угла Солнца

**Л. А. Стефанцев**, к. ф.-м. н., steph2000@mail.ru

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация

**А. П. Васильков**, к. ф.-м. н., alexander.vasilkov@ssaihq.com Science Systems and Applications Inc., Мэриленд, 20706, США

Аннотация. Рассматривается отличительная черта пассивных оптических методов зондирования океана — зависимость от условий освещения. Определяющий фактор этой зависимости — зенитный угол Солнца. Теоретически в рамках «квазиоднократного» приближения теории переноса излучения рассчитывается зависимость спектрального коэффициента яркости толщи океана и коэффициента диффузного отражения от зенитного угла Солнца. Расчеты показали, что влияние состояния поверхности на коэффициент яркости мало даже для зенитных углов, близких к горизонту.

Это связано с тем, что состояние поверхности океана при отсутствии пены слабо сказывается на изменении доли диффузной составляющей при прохождении света Солнца и небосвода через поверхность. Измерения коэффициента яркости проводились на двух различающихся по оптическим свойствам вод полигонах в тропической Атлантике — в Экваториальной части и в районе Канарского течения трехканальным спектрофотометром, предназначенным для измерения яркости восходящего излучения в надир, яркости неба в зените и освещенности поверхности океана в спектральном диапазоне 400–650 нм с разрешением по спектру 2,5 нм. Коэффициент яркости рассчитывался по измеренным величинам с учетом френелевского отражения от поверхности океана и коэффициентов пропускания границами раздела вода-воздух и воздух-вода. Проведено сравнение рассчитанных зависимостей с результатами, полученными в натурном эксперименте.

Сделан вывод о возможности пренебрежения влиянием высоты Солнца при дистанционных измерениях цвета океана с целью извлечения информации о содержании растворенных и взвешенных веществ в водной толще.

**Ключевые слова:** коэффициент яркости, зенитный угол, пассивные методы зондирования, толща океана, квазиоднократное рассеяние

## Dependence of Ocean Remote-Sensing Reflectance on the Solar Zenith Angle

L. A. Stefantsev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), steph2000@mail.ru

Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (GEOKHI RAS) Moscow, Russian Federation

A. P. Vasilkov, Cand. Sci (Phys.-Math.), alexander.vasilkov@ssaihq.com

Science Systems and Applications Inc., Mariland, 20706, USA

**Abstract.** We consider an important feature of passive remote sensing of the ocean reflectance — its dependence on illumination conditions, namely on the solar zenith angle (SZA). In the context of the so-called quasi-single scattering approximation of the radiative transfer theory, the dependence of the remote-sensing reflectance of the ocean and the diffuse reflection on the solar zenith angle is calculated. Calculations show that the ocean surface effects on the remote-sensing reflectance are small even for high SZAs provided the absence of ocean foam on the surface.

This is explained by that the rough ocean surface weakly affects the fraction of diffuse solar radiation penetrating into the ocean. Spectroradiometer data were collected in different regions of the tropical Atlantic which are distinct in optical properties of ocean waters. Measurements of the remote-sensing reflectance were carried out by a three-channel spectroradiometer that simultaneously measured solar irradiance, sky radiance in the zenith, and water-leaving radiance at nadir in the spectral range of 400–650 nm with a spectral resolution of 2.5 nm. The remote-sensing reflectance is calculated from those measurements (assuming the Fresnel reflection from the surface and the surface transmittance of incident solar radiation are known). The spectroradiometer was installed on a research vessel in such a way as to avoid any interference that could be caused by the vessel body. Comparisons of the measured and calculated remote-sensing reflectance shows good agreement. An analysis of the measured and calculated data demonstrates that the SZA effect on the ratio of remote-sensing reflectance at two wavelengths is small.

This conclusion is important for remote sensing of oceanic chlorophyll because most existing chlorophyll algorithms are based on the spectral ratios of remote-sensing reflectance.

Keywords: passive remote sensing of the ocean, remote-sensing reflectance, solar zenith angle, quasi-single scattering approximation

## Введение

Дистанционное зондирование — высокопродуктивное и интенсивно развивающееся направление в исследовании океана и поверхности Земли. Методы дистанционного зондирования океана по своей сути являются косвенными и основаны на связи регистрируемых на высоте носителя приемной аппаратуры параметров электромагнитных полей с теми или иными характеристиками поверхности и толщи океана. Особое место в дистанционном зондировании океана занимают оптические методы [1], поскольку только оптическое излучение способно проникать в толщу океана на десятки метров и извлекать информацию как о состоянии поверхности, так и о содержании в водной толще взвешенных и растворенных веществ [9]. Эту информацию несут в себе спектральный состав, интенсивность и поляризационные характеристики восходящего излучения. В свою очередь, оптические методы делятся на активные и пассивные. Активные методы используют искусственный источник излучения, в пассивных таким источником является Солнце. В пассивных дистанционных методах регистрируются спектральный состав солнечного излучения, диффузно рассеянного толщей океана, либо интенсивность флюоресценции пигментов фитопланктона, возбуждаемой солнечным светом. Это дает возможность определять биопродуктивность вод, исследовать динамику поверхностных вод, фронтов, выносов рек, получать данные о пространственно-временном распределении оптических свойств вод Мирового океана [10] и т.д. Основные преимущества пассивных методов — минимальные энергозатраты и сравнительная простота технической реализации в связи с отсутствием необходимости искусственного источника зондирующего излучения, основной недостаток - невозможность повлиять на условия освещения поверхности океана. В настоящей работе мы рассмотрим один из аспектов этого недостатка на примере дистанционных измерений коэффициента яркости океана, а именно проанализируем зависимость коэффициента яркости восходящего излучения от условий освещения поверхности, в частности от зенитного угла Солнца, а также оценим ошибки, к которым приводит не учет этой зависимости в задачах дистанционного зондирования.

Кроме того, отметим, что сами по себе измерения коэффициента яркости с малых дистанций (практически in situ, на месте (лат.)) могут быть использованы для проверки достоверности спутниковых наблюдений и алгоритмов дистанционного зондирования компонентов верхней толщи океана.

## Аппаратура и методика эксперимента

Излучение, диффузно рассеянное назад толщей океана, принято характеризовать спектральным коэффициентом яркости  $\rho = \pi B/E$ , где B — яркость в данном направлении, E — освещенность горизонтальной площадки сверху, значения B и E непосредственно под поверхностью. Аналогичной характеристикой является также коэффициент диффузного отражения R = E'/E, где E' — освещенность горизонтальной площадки снизу.

Измерения спектрального коэффициента яркости проводились прибором, представляющим собой трехканальный спектрофотометр [1], предназначенный для измерения яркости восходящего излучения в надир  $B_{\rm M}$ , яркости неба в зените  $B_{\rm H}$ и освещенности поверхности океана  $E_{\rm O}$  в спектральном диапазоне 400–650 нм с разрешением по спектру 2,5 нм. По измеряемым величинам коэффициент яркости  $\rho$  определяется из соотношения (1):

$$B_{\rm M} = rB_{\rm H} + \rho E_{\rm o} T_{\rm B} T / \pi n^2, \qquad (1)$$

где r = 0,02 — френелевский коэффициент отражения, T = 0,98 — пропускание восходящего излучения границей раздела вода-воздух,  $T_{\rm B}$  — границей раздела воздух-вода, n — показатель преломления воды. Структурная схема прибора приведена на рис. 1. В водонепроницаемом контейнере размещены оптическая опрашивающая система, монохроматор и фотоприемное устройство. Световой поток, прошедший через каналы яркости моря (1), яркости неба (2), освещенности поверхности моря (3) и излучение контрольного канала (4), поочередно направляется дискретно вращающимся зеркальным коммутатором (5) в монохроматор (6). Затем световой поток поступает на фотоприемное

#### РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 6 вып. 1 2019



Рис. 1. Структурная схема измерителя коэффициента яркости моря: 1 — яркость моря, 2 — яркость неба, 3 — облученность, 4 — контрольный канал, 5 — поворотное зеркало, 6 — монохроматор, 7 — ФПУ, 8 — усилитель, 9 — система обработки сигнала, 10 — МПИК, 11 — система отображения

устройство (7). Электрический сигнал через усилитель (8) и устройство аналоговой обработки сигналов (9) поступает в микропроцессорный измерительный комплекс (10) и далее на систему обработки, отображения и накопления информации (11).

На рис. 2 приведена оптико-механическая схема прибора. В оптической опрашивающей системе применены кварцевые иллюминаторы — (1) и (6), молочное стекло (13), служащее коллектором канала облученности. Угол зрения приемника (2W =  $= 9^{\circ}$ ) образуется диафрагмами (2, 5, 14) и входной щелью монохроматора (7). В каналах яркости неба и освещенности установлены нейтральные светофильтры (3) и (15), ослабляющие световой поток в 10<sup>2</sup> и в 10 раз соответственно. Поворотное зеркало (16) направляет световой поток канала облученности на опрашивающее зеркало (4). Излучения контрольного канала через световод (12) и канала яркости моря поступают на зеркало (4) без ослабления. Входная щель (7), вогнутое зеркало (9), дифракционная решетка (8) и выходная щель (10) монохроматора образуют Z-образную схему Водсворда. Фотоумножитель (11) установлен непосредственно за выходной щелью монохроматора. Спектральная зависимость коэффициента яркости  $\rho(\lambda)$  рассчитывалась специальной программой, погрешность определения  $\rho(\lambda)$  в большинстве случаев составляла 6-10%.

Измерения коэффициента яркости проводились в дрейфе судна на двух различающихся по оптическим свойствам вод полигонах в тропической



Рис. 2. Оптико-механическая схема измерителя коэффициента яркости моря: 1, 6 — кварцевые иллюминаторы, 2, 5, 14 — диафрагмы, 4 — поворотное зеркало, 3, 15 — нейтральные светофильтры, 7 — входная щель монохроматора, 8 — дифракционная решетка, 9 зеркало-коллиматор, 10 — выходная щель монохроматора, 11 — фотоприемное устройство, 12 — контрольный канал

Атлантике — в Экваториальной части и в районе Канарского течения. Исследуемая зависимость, в силу относительной малости наблюдаемых эффектов, очень чувствительна к метеоусловиям, в которых проводится эксперимент. По этой причине из всех имеющихся экспериментальных данных мы отобрали измерения, проведенные при практически чистом небе и спокойном море. Измерения проводились в период с 8 до 11 часов и с 14 до 18 часов поясного времени.

#### Анализ и обсуждение результатов

Прежде чем переходить к рассмотрению экспериментальных данных, проведем теоретический анализ зависимости спектрального коэффициента яркости от зенитного угла Солнца с тем, чтобы полученную зависимость сравнить с данными измерений, проведенных с борта судна. Подобный анализ проводился и ранее, например в работах [2, 11-14] рассматривалась зависимость коэффициента диффузного отражения от высоты Солнца. В [2, 12] эта зависимость получена в рамках двухпотокового приближения теории переноса излучения, в [11, 13, 14] — из аппроксимации результатов расчетов по методу Монте-Карло. Однако при практической реализации дистанционного зондирования океана измеряется не коэффициент диффузного отражения, а коэффициент яркости толщи океана, поэтому в настоящей работе рассматривается зависимость коэффициента яркости от зенитного угла Солнца, а теоретическая оценка этой зависимости производится в рамках «квазиоднократного» приближения теории переноса излучения [3, 15].

В квазиоднократном приближении коэффициент яркости однородной среды при направленном освещении ее бесконечно широким пучком под углом  $\operatorname{arccos} \mu$  к вертикали для случая наблюдения в надир выражается формулой

$$\rho_n = \frac{2x(-\mu)}{(1+\mu)x(-1)}\rho_0.$$
(2)

Здесь  $\rho_0 = 0.5\pi\sigma_{180}/(\varkappa + \beta)$  — коэффициент яркости при освещении среды нормально к ее поверхности,  $\sigma_{180}$  — показатель рассеяния под углом 180°,  $\varkappa$  — показатель поглощения,  $\beta$  — показатель рассеяния в заднюю полусферу,  $x(\mu)$  — индикатриса рассеяния в зависимости от косинуса угла рассеяния  $\mu = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} / n^2$ ,  $\theta$  — зенитный угол Солнца, n — показатель преломления воды. Случай наблюдения в надир выбран как наиболее распространенный в практике, а также в связи с тем, что он был реализован в наших экспериментах. Отметим, что точность формулы (2) тем выше, чем меньше вероятность выживания фотона  $\Lambda$ ; при  $\Lambda \leq 0.85$ , что всегда выполнено для океанской воды, точность (2) не хуже 15% [3]. Коэффициент яркости  $\rho_d$ , соответствующий освещению поверхности океана светом небосвода, определяется формулой

$$\rho_{d} = \frac{\int_{\mu_{np}}^{1} \int_{0}^{2\pi} B(\theta,\varphi) T_{n}(\theta) \rho_{n}(\mu) \mu \, d\mu \, d\varphi}{\int_{\mu_{np}}^{1} \int_{0}^{2\pi} B(\theta,\varphi) T_{n}(\theta) \mu \, d\mu \, d\varphi},$$
(3)

где  $B(\theta,\varphi)$  — яркость небосвода в зависимости от зенитного и азимутального углов,  $T_n(\theta)$  пропускание поверхностью океана,  $\mu_{\rm пp}$  — косинус предельного угла преломления. Если принять в качестве первого приближения, что угловое распределение яркости нисходящего излучения непосредственно под поверхностью равномерное, т. е.  $B(\theta,\varphi)T_n(\theta)$  = const, из (3) в предположении изотропности индикатрисы рассеяния океанской воды в диапазоне  $\mu_{\rm пp} \leqslant \mu \leqslant 1$  можно получить [3]

$$\rho_d / \rho_0 = 4 \left( 1 - \mu_{\rm np} + \ln \frac{1 + \mu_{\rm np}}{2} \right) / (1 - \mu_{\rm np}^2) \approx 1,09.$$
(4)

Точные расчеты по формуле (3) с использованием данных о яркости небосвода из [4] показали, что соотношение (4) является весьма хорошим приближением. Так, при изменении зенитного угла Солнца от 0° до 80° отношение  $\rho_d/\rho_0$  меняется всего лишь в пределах от 1,06 до 1,10 для характерного варианта атмосферных условий: оптической толщины атмосферы  $\tau = 0,3$  и метеорологической дальности видимости S = 20 км [4].

Отметим, что индикатрисы рассеяния океанской воды, строго говоря, не являются изотропными в рассматриваемом диапазоне углов рассеяния  $130^{\circ} \leqslant \gamma \leqslant 180^{\circ}$ . Согласно расчетам [5] рассеяния

света на полидисперсных системах, моделирующих океанский гидрозоль, и имеющимся экспериментальным данным [6], значения индикатрисы рассеяния несколько возрастают при увеличении  $\gamma$ от 130° до 180°. Для этих углов изменение отношения  $\frac{x(-\mu)}{x(-1)}$ , согласно расчетам [5], не превышает 10% при варьировании параметров микроструктуры взвеси в диапазоне, характерном для океанской воды ( $m = 1,02-1,15; \nu = 3-5; z_{max} =$ = 20-50, где т — относительный показатель преломления частиц взвеси,  $\nu$  — показатель в распределении Юнге,  $z_{\rm max}$  — дифракционный параметр для максимального радиуса частицы;  $z_{\min} = 0,3).$ При учете молекулярного рассеяния воды изменение  $rac{x(-\mu)}{x(-1)}$  может достигать  ${\sim}15{-}20\,\%$  в зависимости от доли молекулярного рассеяния в суммарном рассеянии. В связи с трудностью измерения рассеяния назад экспериментальные данные по индикатрисам рассеяния океанской воды имеются лишь для углов до 160°. Оценка изменения  $x(-\mu)$  по этим данным [6] дает приблизительно те же результаты. Таким образом, в формуле (2) влияние фактора  $\frac{x(-\mu)}{x(-1)}$ , зависящего от конкретных оптических условий, количественно может быть сравнимо с влиянием геометрического фактора  $\overline{(1+\mu)}$ Поскольку влияние этих факторов противоположно, с целью получения верхней оценки зависимости коэффициента яркости от зенитного угла Солнца можно принять допущение об изотропности индикатрисы рассеяния в диапазоне  $\mu_{\rm np}\leqslant\mu\leqslant 1.$ 

Полный коэффициент яркости при совместном освещении солнцем и небосводом выразится формулой

$$\rho = \rho_n [1 - \psi_\lambda(\theta)] + \rho_d \psi_\lambda(\theta), \tag{5}$$

где  $\psi_{\lambda}(\theta)$  — доля диффузной составляющей в освещенности непосредственно под поверхностью, индекс  $\lambda$  подчеркивает, что эта доля зависит от длины волны  $\lambda$ . Величина  $\psi_{\lambda}(\theta)$  в формуле (5) связана с долей диффузной составляющей в освещенности над поверхностью  $\psi'_{\lambda}(\theta)$  выражением (6)

$$\psi_{\lambda}(\theta) = \frac{\psi_{\lambda}' \mathbf{T}_d}{\psi_{\lambda}' \mathbf{T}_d + (1 - \psi_{\lambda}') T_n},\tag{6}$$

где  $T_d$ ,  $T_n$  — пропускания поверхностью диффузного и направленного излучений. В общем слу-

чае  $T_d$  и  $T_n$  зависят от состояния поверхности океана; в расчетах данные о зависимости пропускания поверхности от скорости ветра брались из работы [16]. Функция  $\psi'_{\lambda}$  заимствовалась из экспериментальных данных, приведенных в работе [7].

На рис. З приведены расчетные зависимости отношения  $\rho/\rho_0$  от зенитного угла Солнца в предположении изотропности индикатрисы рассеяния в задней полусфере. Как видно из рисунка, эта зависимость наиболее сильная для длинноволновой части спектра, поскольку здесь из-за особенностей рассеяния света в атмосфере наблюдается наиболее резкая зависимость  $\psi'_{\lambda}$  от угла  $\theta$ . В целом зависимость  $\rho/\rho_0$  от  $\theta$  невелика, изменение  $\rho/\rho_0$  вплоть до углов  $\theta$ , близких к горизонту, находится в пределах 15%. Еще менее зависит от  $\theta$  такая важная в дистанционном зондировании океана характеристика, как индекс цвета I, представляющая собой отношение коэффициента яркости для длин волн, соответствующих максимуму и минимуму поглощения хлорофилла. На том же рис. 3 приведена зависимость  $I/I_0$  от  $\theta$ , где  $I = \rho(430)/\rho(535), I_0 - \rho(430)/\rho(535)$ аналогичное соотношение для  $\rho_0(\lambda)$ , не зависящее от зенитного угла Солнца. Изменение  $I/I_0$  составляет всего лишь несколько процентов, что свидетельствует о возможности практически всегда пренебречь зависимостью индекса цвета от зенитного угла Солнца.

Следует отметить, что все рассчитанные кривые  $\rho(\theta)/\rho_0$  для различных длин волн пересекаются в одной точке  $\theta \approx 45^\circ$ . Это связано с тем, что в принятых нами предположениях для  $\theta \approx 45^\circ$   $\rho_d = \rho_n$  и  $\rho = 1,09\rho_0$ , т.е. отношение  $\rho(\theta)/\rho_0$  не зависит от длины волны. Отмеченный факт дает возможность провести дополнительную экспериментальную проверку правильности приближений, принятых при выводе формул (2) и (4). В том случае, если эти приближения оправданы, значения параметра  $\rho(450)/\rho_0$  не должны зависеть от длины волны света.

Расчеты показали, что влияние состояния поверхности на коэффициент яркости мало́ даже для углов  $\theta$ , близких к горизонту (см. рис. 3, где приведены данные также и для взволнованной поверхности). Это связано с тем, что состояние поверхности океана при отсутствии пены слабо сказывается на изменении доли диффузной составляющей

#### РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 6 вып. 1 2019





Рис. 4. Рассчитанные зависимости коэффициента диффузного отражения для различных длин волн: 1-397 нм, 2-535 нм, 3-764 нм

Рис. 3. Рассчитанные зависимости коэффициента яркости и индекса цвета от зенитного угла Солнца для различных длин волн. Сплошные линии — гладкая поверхность океана, пунктирные — взволнованная, скорость ветра 4 м/с; длины волн: 1 — 397 нм, 2 — 535 нм, 3 — 764 нм

при прохождении света Солнца и небосвода через поверхность.

Для сравнения дополнительно рассчитывалась зависимость коэффициента диффузного отражения от зенитного угла Солнца  $R(\theta)$ . При этом для направленного освещения зависимость  $R_n(\theta)$ заимствовалась из работы [11]  $R_n = (0,975 (0,529\mu)(\beta/\varkappa)$ , а для освещения небосводом коэффициент диффузного отражения вычислялся по формуле, аналогичной (4):  $R_d = 0,445\beta/\varkappa$ . Полученная зависимость коэффициента диффузного отражения от  $\theta$  при совместном освещении Солнцем и небосводом показана на рис. 4. Зависимость  $R(\theta)$ подобна зависимости  $\rho(\theta)$ , однако относительное изменение  $R(\theta)$  больше по сравнению с  $\rho(\theta)$ . Так, на длине волны  $\lambda = 397$  нм максимальное изменение  $R(\theta)$  по отношению к R(0) составляет около 20%, а при  $\lambda = 764$  нм достигает 40%. Изменение индекса цвета I = R(430)/R(535), определенного по коэффициенту диффузного отражения, заметно меньше и составляет величину менее 9%.

В задачах дистанционного определения содержания хлорофилла по спектру восходящего излучения концентрация хлорофилла в воде  $C_{\rm x,r}$  на-

ходится из эмпирических корреляционных связей между  $C_{\rm xл}$  и индексом цвета [10, 17]. Вариации  $C_{\rm xл}$ , обусловленные полученной выше зависимостью индекса цвета от  $\theta$ , находятся в пределах ошибок корреляционных связей. Поэтому на основе проведенных расчетов можно сделать вывод, что влияние высоты Солнца на точность определения концентрации хлорофилла рассматриваемым дистанционным методом пренебрежимо малó. Полученные теоретические данные проверялись в натурном эксперименте.

Прежде чем переходить к рассмотрению экспериментальных данных, следует отметить, что для дистанционных измерений коэффициента яркости как с борта судна с помощью описанного выше прибора, так и с авиакосмического носителя имеется оптимальный с точки зрения точности измерений диапазон зенитных углов Солнца. Дело в том, что при  $\theta$ , близких к зениту, в поле зрения фотоприемника прибора попадают солнечные блики, обусловленные взволнованной поверхностью океана. Учет дополнительной составляющей в восходящем излучении, связанной с солнечными бликами, приводит к резкому ухудшению точности измерений р. С другой стороны, при низком Солнце яркость выходящего из толщи океана излучения мала и из-за снижения отношения сигнал/шум также падает точность измерений. Поэтому исследовать зависимость  $\rho$  от  $\theta$ во всем диапазоне с помощью использованного прибора не удается и экспериментальные данные приводятся лишь для диапазона  $30^{\circ} \leq \theta \leq 60^{\circ}$ , который с практической точки зрения представляет наибольший интерес.

Результаты измерений  $\rho(\theta)$  приводились к  $\rho(45^{\circ})$ , поскольку, как показали теоретические расчеты, можно ожидать, что отношение  $\rho(45^{\circ})/\rho_0$  не зависит от длины волны. То есть, приводя  $\rho(\theta)$  к  $\rho(45^{\circ})$ , мы выделяем зависимость  $\rho$  от зенитного угла Солнца в чистом виде и можем провести сопоставление экспериментальных зависимостей с теоретически рассчитанными кривыми  $\rho(\theta)/\rho_0$ .

## Заключение

На рис. 5 представлены результаты сопоставления теоретически рассчитанного отношения  $\rho(\theta)/\rho(45^{\circ})$  с экспериментальными данными по двум полигонам для длин волн 430 и 550 нм. Как и предполагалось, исходя из теоретических оценок наблюдается более резкая зависимость коэффициента яркости от зенитного угла Солнца с увеличением длины волны. Зависимость отношения  $\rho(\theta)/\rho(45^{\circ})$ от зенитного угла Солнца в общем согласуется с ходом теоретических кривых. В рассматриваемом диапазоне отношение  $\rho(\theta)/\rho(45^\circ)$  увеличивается с ростом зенитного угла Солнца, вместе с тем наблюдается систематическое завышение экспериментальных данных по сравнению с теоретически рассчитанными кривыми. Возможно, это происходит вследствие того, что мы использо-



Рис. 5. Сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента яркости от зенитного угла Солнца для длин волн: 1 — 550 нм и 2 — 430 нм; экспериментальные кривые отмечены

вали данные по доле диффузной составляющей в общем потоке падающего излучения [7], полученные для конкретных метеоусловий, отличающихся от метеоусловий, в которых проводились измерения. Однако максимальное относительное отклонение параметра  $\rho(\theta)/\rho(45^\circ)$  не превышало теоретических оценок (~15%). Это позволяет утверждать, что при использовании экспериментальных данных по коэффициенту яркости и тем более по индексу цвета в задачах дистанционного зондирования океана влиянием высоты Солнца в рассматриваемом диапазоне углов можно пренебречь.

На первый взгляд, сделанный вывод прямо противоположен выводу работы [2] «о важности и необходимости учета характера освещения поверхности моря при обработке измеренных спектров яркости вышедшего из моря света». На самом деле это не совсем так. В работе [2] речь идет о коэффициенте диффузного отражения, зависимость которого от  $\theta$  и по результатам наших расчетов довольно существенна (вариации R до 40%). При практической реализации рассматриваемых методов дистанционного зондирования океана используются, как правило, экспериментальные данные по спектральному коэффициенту яркости (дистанционные методы определения оптических свойств поверхностного слоя [8]) либо по индексу цвета (дистанционное определение концентрации хлорофилла [10, 17]). В настоящей работе показано, что вариации указанных параметров, обусловленные изменением зенитного угла Солнца, лежат в пределах ошибок корреляционных связей между измеряемыми и рассчитываемыми характеристиками, что и позволяет сделать вывод о возможности пренебречь влиянием зенитного угла Солнца.

## Список литературы

- 1. Васильков А.П., Кельбалиханов Б.Ф. Дистанционные оптические пассивные методы исследования океана. Сыктывкар: Научный центр УрО АН СССР, 1991. 108 с.
- Халтурин В.И., Станичная Р.Р. Моделирование спектральной изменчивости коэффициента диффузного отражения однородного моря при комбинированном освещении его поверхности // Методы обра-

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 6 вып. 1 2019

ботки космической океанологической информации: Сборник. Севастополь, 1983. С. 53–58.

- Голубицкий Б. М., Левин И. М. Пропускание и отражение слоя среды с сильно анизотропным рассеянием // Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1980, т. 16, № 10. С. 1051–1058.
- Шифрин К.С., Пятовская Н.П. Таблицы наклонной дальности видимости и яркости дневного неба. Л.: Гидрометеоиздат, 1959. 187 с.
- 5. Шифрин К.С., Салганик И.Н. Таблицы по светорассеянию. Т. 5. Рассеяние света моделями морской воды. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. 216 с.
- 6. *Маньковский* В.И. Экстремальные индикатрисы рассеяния света морской водой // Морские гидрофизические исследования, 1973, № 3(62). С. 100–106.
- 7. *Ерлов Н.Г.* Оптика моря. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 247 с.
- Буренков В.И., Васильков А.П., Стефанцев Л.А. Методика определения спектральных оптических характеристик по спектру коэффициента яркости моря // Океанология, 1985, т. 25, № 1. С. 49–54.
- Vasilkov A. P. A retrieval of coastal water constituents concentrations by least-squares inversion of a radiance model. Proceedings of the 4th Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, 17–19 March 1997, Orlando, USA, 1997. P. 107–116.

- Robinson I.S. Satellite observation of ocean colour // Phil. Trans. Royl. Soc. Lond., 1983, vol. A309, № 1508. P. 415-432.
- Kirk J. T. O. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude // Limnol. Oceanogr., 1984, vol. 29, № 2. P. 350–356.
- Okami N. Analysis of ocean color spectra // J. Oceanogr. Soc. Japan, 1982, vol. 38, № 5. P. 300–306.
- 13. *Morel A.*, *Gentili B.* Diffuse reflectance of oceanic waters: its dependence on Sun angle as influenced by the molecular scattering contribution // Appl. Opt. 1991, vol. 30, № 30. P. 4427–4438.
- 14. Morel A., Antoine D., Gentili B. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function // Appl. Opt. 2002, vol. 41, № 30. P. 6289–5307.
- Gordon H.R. Simple calculation of the diffusive reflectance of the ocean // Appl. Opt. 1973, vol. 12, № 12. P. 2803-2804.
- 16. *Austin R. W.* The remote sensing of spectral radiance from below the ocean surface. In. Optical Aspects of Oceanogr. L. Acad. press, 1974. P. 317–344.
- O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M. & McClain C.R. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS, Journal of Geophysical Research 103, 1998. P. 24937–24953.