

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.466

DOI: 10.22449/0233-7584-2018-6-477-488

Пригоризонтный максимум яркости безоблачного неба

В. В. Баханов, А. А. Демакова, В. И. Титов*

*Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород, Россия*

**E-mail: titov@hydro.appl.sci-nnov.ru*

Поступила в редакцию 03.07.2018 г., после доработки – 25.07.2018 г.

На основе модели однократного рассеяния солнечного света рассматривается угловая структура яркости безоблачного неба. Показано, что в рамках данной модели описывается так называемый пригоризонтный максимум яркости неба. Анализируется физический механизм возникновения этого максимума, объясняется зависимость его положения от длины волны света. При увеличении длины волны света максимум яркости безоблачного неба сдвигается к горизонту. Это связано с тем, что оптическая толщина атмосферы уменьшается с увеличением длины волны. Проводится сравнение с экспериментальными угловыми характеристиками яркости неба, полученными с помощью цифровых фотоснимков горизонта, сделанных на океанологической платформе. Анализируется возможность оценки оптической толщины атмосферы по угловому положению пригоризонтного максимума яркости неба. Предложен алгоритм оценки указанной характеристики для некоторого значения длины волны света, основанный на графическом «обращении» зависимости углового распределения яркости безоблачного неба от оптической толщины атмосферы. С помощью предложенного алгоритма по цифровым фотоснимкам горизонта моря получены оценки оптических толщин атмосферы для трех спектральных диапазонов света R , G , B . Анализируется «устойчивость» алгоритма к ошибкам в определении азимута солнца относительно наблюдателя. Полученные оценки оптических толщин атмосферы практически совпадают с известными результатами натурных измерений аналогичных характеристик. Изложенный подход к восстановлению значений оптической толщины атмосферы позволяет развить используемую модель яркости неба с учетом рассеяния света более высоких кратностей. Полученные значения оптических толщин можно использовать в моделях углового распределения яркости безоблачного неба для оценки статистических характеристик волнения дистанционным оптическим методом.

Ключевые слова: атмосфера, оптика, оптическая толщина, яркость неба, солнце, рассеяние света, однократное рассеяние, аэрозоль, длина волны света, безоблачное небо, дистанционная диагностика.

Благодарности: работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 16-05-00858а.

Для цитирования: Баханов В. В., Демакова А. А., Титов В. И. Пригоризонтный максимум яркости безоблачного неба // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 6. С. 477–488. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-477-488

On Near-Horizon Maximum Brightness of Cloudless Sky

V. V. Bakhanov, A. A. Demakova, V. I. Titov*

*Federal research center Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: titov@hydro.appl.sci-nnov.ru

The brightness angular structure of the cloudless sky is studied based on the model of the sunlight single scattering. It is shown that the so-called near-horizon maximum of the sky brightness can be described within the framework of this model. Physical mechanism of arising of this maximum is analyzed; dependence of the maximum position on the light wavelength is explained. When the light wavelength increases, the sky brightness maximum “shifts” towards the horizon. It is related to the fact that the atmosphere optical thickness decreases with growth of a wavelength. These model data are compared to the experimental angular characteristics of the sky brightness

© Баханов В. В., Демакова А. А., Титов В. И., 2018

obtained due to digital imaging of the horizon from the oceanographic platform. Possibility of estimating the atmosphere optical thickness using the angular position of the sky brightness near-horizon maximum is analyzed. Proposed is the algorithm for assessing the given characteristic for a certain value of the light wavelength based on graphical "inversion" of dependence of the angular distribution of the cloudless sky brightness upon the atmosphere optical thickness. The proposed algorithm and the horizon digital images permit to assess the atmosphere optical thickness in the R, G and B spectral ranges. The algorithm "robustness" to the errors in determining the sun azimuth relative to the observer is analyzed. The obtained estimates of the atmosphere optical thicknesses are in agreement with the known results of the nature measurements of the atmosphere analogous characteristics. The described method for reconstructing the values of the atmosphere optical thicknesses makes it possible to develop the applied sky brightness model taking into account multiple light scattering. The obtained values of optical thickness can be used in the models of angular distribution of the cloudless sky brightness to provide possibility of estimating the waves' statistical characteristics by the remote optical method.

Keywords: atmosphere, optics, optical thickness, sky brightness, sun, scattering of light, single scattering, aerosol, wavelength of light, cloudless sky, remote sensing.

Acknowledgements: the investigation is carried out at support of the RFFI grant 16-05-00858a.

For citation: Bakhanov V. V., Demakova A. A., Titov V. I., 2018. On near-horizon maximum brightness of cloudless sky. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(6), pp. 477-488. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-477-488 (in Russian).

Введение

Как известно, информация об угловой структуре яркости неба необходима для дистанционной оптической диагностики морской поверхности, в частности, для восстановления спектров волнения по изображениям морской поверхности, получения данных об изменчивости характеристик волнения в нефтяных сликах, проявлениях внутренних волн и порывов ветра на морской поверхности [1–3]. Существуют модельные представления углового распределения яркости безоблачного неба, которые требуют знания оптической толщины атмосферы. Как правило, для описания рассеяния солнечного света в атмосфере используется приближение его однократного либо двукратного рассеяния атмосферным аэрозолем [4–8]. Сложность в описании яркости дневного неба состоит в большой вариативности оптических характеристик атмосферы. В связи с этим фактом возникает задача получения данных об оптических характеристиках атмосферы в реальном времени с помощью достаточно простых инструментов.

В последнее время развиваются радиометрические, поляриметрические, лидарные и спутниковые методы определения оптических характеристик атмосферы и атмосферного аэрозоля [4, 9–18]. Эти методы требуют специальной аппаратуры и не позволяют получать данные в реальном времени. В работе предложен метод определения оптической толщины атмосферы в трех спектральных диапазонах света по угловой высоте пригоризонтного максимума яркости безоблачного неба, регистрируемого с помощью цифрового фотоаппарата. Метод позволяет в реальном времени получать оценки оптических толщин атмосферы для трех спектральных диапазонов света R , G и B . Полученные значения оптических толщин можно использовать в моделях углового распределения яркости безоблачного неба для оценки статистических характеристик волнения оптическим методом, а также для изучения оптических свойств атмосферы.

Цель настоящей работы – использование данных о пригоризонтном максимуме яркости неба, регистрируемом с помощью цифрового фотоаппарата,

для получения информации об оптической толщине атмосферы в трех спектральных диапазонах света.

Модель яркости безоблачного неба

Угловое распределение спектральной плотности яркости неба [16] (размерностью $\text{Вт}/\text{м}^2 \text{нм} \cdot \text{стерад}$), которую в дальнейшем для краткости будем называть просто яркостью неба, в приближении однократного рассеяния неполяризованного света солнца в модели плоско-параллельной непоглощающей атмосферы будет определяться следующими формулами [4–6]:

$$I = \pi S_\lambda \frac{f_n(\varphi)}{4\pi} P(z, z_s), \quad (1)$$

$$P(z, z_s) = \frac{\exp(-\tau / \cos z) - \exp(-\tau / \cos z_s)}{\cos z / \cos z_s - 1},$$

где πS_λ – табулированная спектральная солнечная постоянная, размерность которой совпадает с размерностью спектральной плотности яркости неба; z , z_s – зенитные расстояния точки неба и солнца; φ – угол рассеяния; $f_n(\varphi)$ – безразмерная нормированная индикатриса рассеяния света, которая является суммой релеевской и аэрозольной индикатрис рассеяния:

$$f_n(\varphi) = \frac{\tau_r}{\tau} \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \varphi) + \frac{\tau_a}{\tau} 0,34 \frac{1 + \cos^2 \varphi}{1 - \cos \varphi}, \quad (2)$$

здесь $\tau = \tau_r + \tau_a$ – безразмерная оптическая толщина атмосферы; τ_r и τ_a – безразмерные релеевская и аэрозольная толщины атмосферы, значения которых зависят от длины волны света.

Нормированная аэрозольная индикатриса рассеяния света в атмосфере задана выражением $0,34 \frac{1 + \cos^2 \varphi}{1 - \cos \varphi}$. Существуют ее различные аппроксимации [15, 16]. Сомножитель $P(z, z_s)$ описывает уменьшение яркости прямого солнечного света по закону Бугера до и вдоль линии наблюдения при распространении к наблюдателю.

Угол рассеяния φ определяется формулой

$$\cos \varphi = \cos z_s \cos z + \sin z_s \sin z \cos \psi,$$

где ψ – угол между проекциями на горизонтальную плоскость векторов, направленных на небо и солнце, или азимутальный угол солнца относительно наблюдателя.

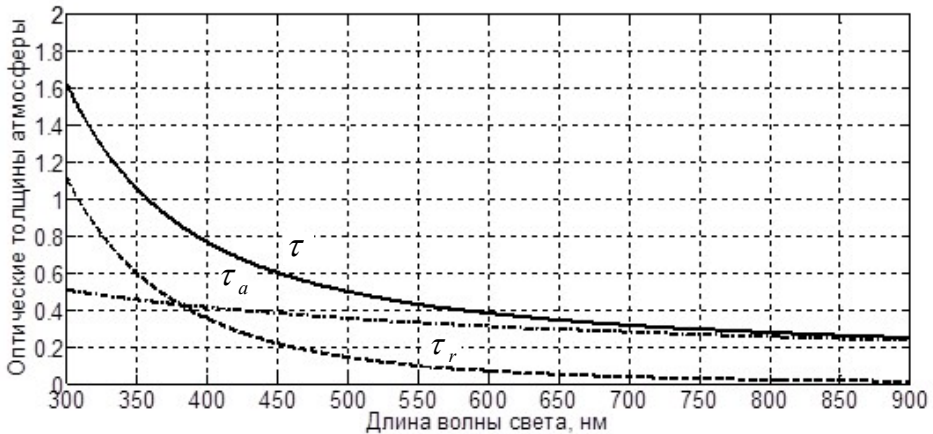
Зависимости оптических толщин от длины волны света зададим в следующем виде [16]:

$$\tau_r = \tau_r(550)(550/\lambda)^4, \quad (3)$$

$$\tau_a = \tau_a(550)(550/\lambda)^{0,7},$$

где λ (нм) – длина волны света. Значения оптических толщин для света с длиной волны 550 нм зададим равными $\tau_r(550)=0,098$, $\tau_a(550)=0,33$. Показатель степени в формуле для τ_a (так называемый показатель Ангстрема) соответствует среднему значению по результатам измерений прозрачности атмосферы для прибрежных районов океана. По данным [16], аэрозольная оптическая толщина $\tau_a(550)$ над океаном может меняться в диапазоне 0,04–0,4, причем среднее значение равно 0,19.

На рис. 1 показано, что с увеличением длины волны света значения оптических толщин уменьшаются.

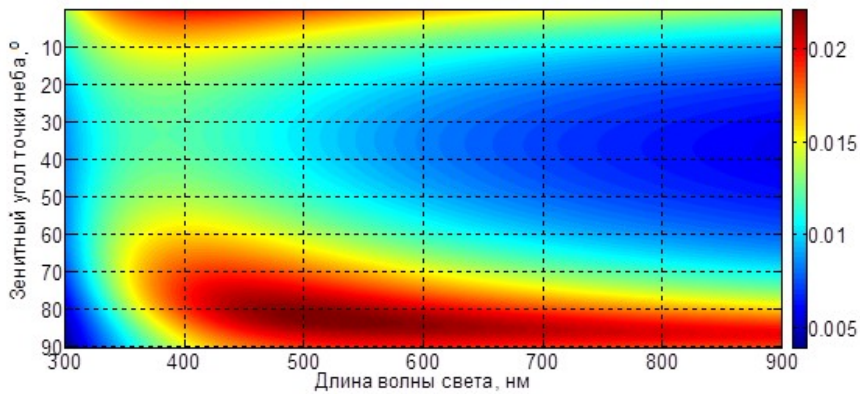


Р и с. 1. Зависимости оптических толщин атмосферы от длины волны света. Обозначения: τ_r – релеевская оптическая толщина; τ_a – аэрозольная оптическая толщина; τ – сумма аэрозольной и релеевской оптических толщин

F i g. 1. Dependences of the atmosphere optical thicknesses upon the light wavelength. Indications: τ_r is the Rayleigh optical thickness; τ_a is the aerosol optical thickness; τ is the sum of the aerosol and the Rayleigh optical thickness

Угловые распределения яркости безоблачного неба

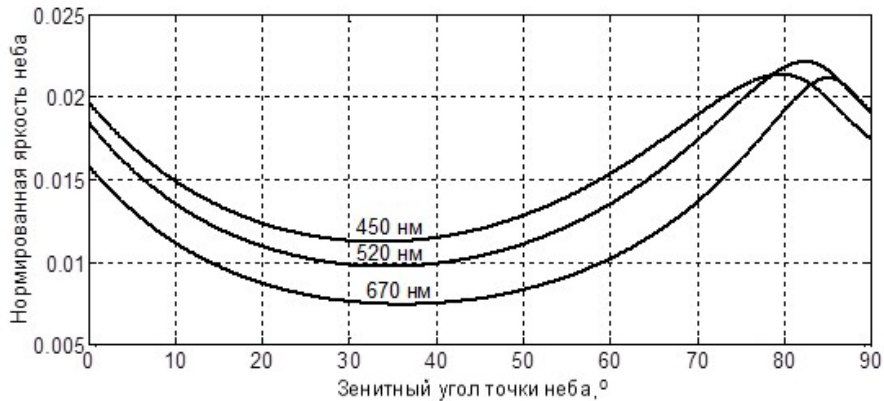
Рассмотрим распределения яркости неба, вычисленные по изложенной выше модели. На рис. 2 показана безразмерная нормированная на спектральную солнечную постоянную яркость неба $I/\pi S_\lambda$ (далее – нормированная яркость неба) в противосолнечном направлении ($\psi=180^\circ$). Зенитный угол солнца здесь и далее во всех расчетах принят равным 60° ($z_s=60^\circ$). В районе зенитного угла неба в 30° наблюдается так называемая солярная точка, в которой значения яркости неба минимальны. В этой точке угловое расстояние до солнца составляет около 90° . Этот минимум обусловлен минимальным значением индикатрисы рассеяния при угле рассеяния 90° . При больших зенитных углах (вблизи горизонта) наблюдается максимум яркости неба для всех длин волны света.



Р и с. 2. Нормированная яркость неба в противосолнечном направлении как функция зенитного угла точки неба z и длины волны света. Здесь, а также на рис. 5, 8, 10 величина нормированной яркости отображается в условной цветовой шкале (справа)

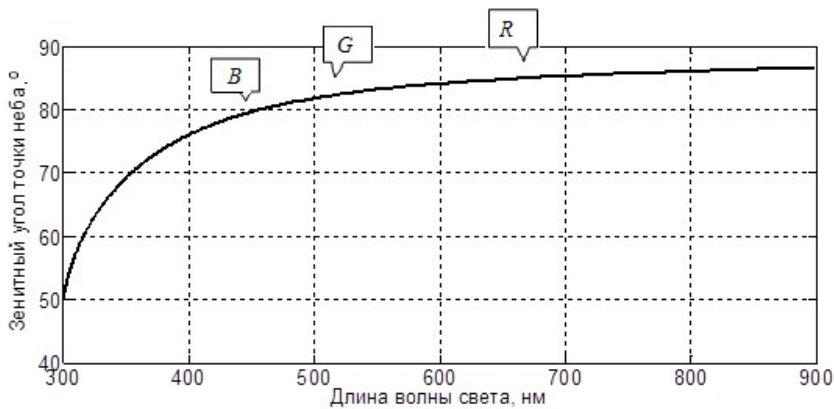
F i g. 2. The normalized sky brightness in the opposite to the sun direction as a function of the sky zenith angle z and the light wavelength. Here and in the Fig. 5, 8 and 10, the normalized brightness value is shown in the conventional color scale

На рис. 3 приведена безразмерная нормированная яркость неба для длин волны света 450, 520, 670 нм, которые соответствуют R , G , B -составляющим цветных фотоснимков. В районе зенитного угла 80° наблюдаются пригоризонтные максимумы яркости неба, которые с увеличением длины волны света «сдвигаются» ближе к горизонту. На рис. 4 видно, что с увеличением длины волны света зенитное расстояние растет, это связано с уменьшением оптической толщины атмосферы.



Р и с. 3. Нормированная яркость неба в противосолнечном направлении как функция зенитного угла точки неба z для трех длин волны света

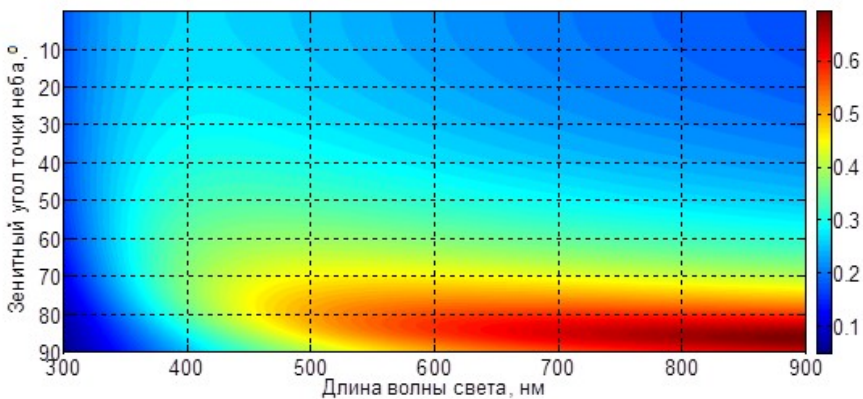
F i g. 3. The normalized sky brightness in the opposite to the sun direction as a function of the sky zenith angle z for three light wavelengths



Р и с. 4. Зависимость зенитного расстояния пригоризонтного максимума яркости неба от длины волны света

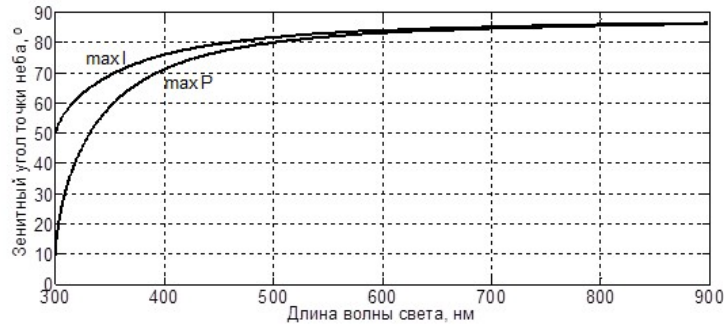
Fig. 4. Dependence of the zenith angle of the sky brightness near-horizon maximum upon the light wavelength

Как показывают расчеты, в противосолнечной части неба вблизи горизонта угловая зависимость яркости неба в основном определяется множителем $P(z, z_s)$ в выражении (1) для яркости неба. На рис. 5 показано, что вблизи горизонта наблюдается максимум величины P . Рис. 6 свидетельствует о том, что показанные на нем зависимости практически совпадают. Таким образом, можно сделать вывод, что при приближении к горизонту яркость неба сначала растет (рис. 3) вследствие увеличения длины трассы рассеяния вдоль направления наблюдения, но затем уменьшается в результате ослабления яркости солнечных лучей по пути к трассе рассеяния.

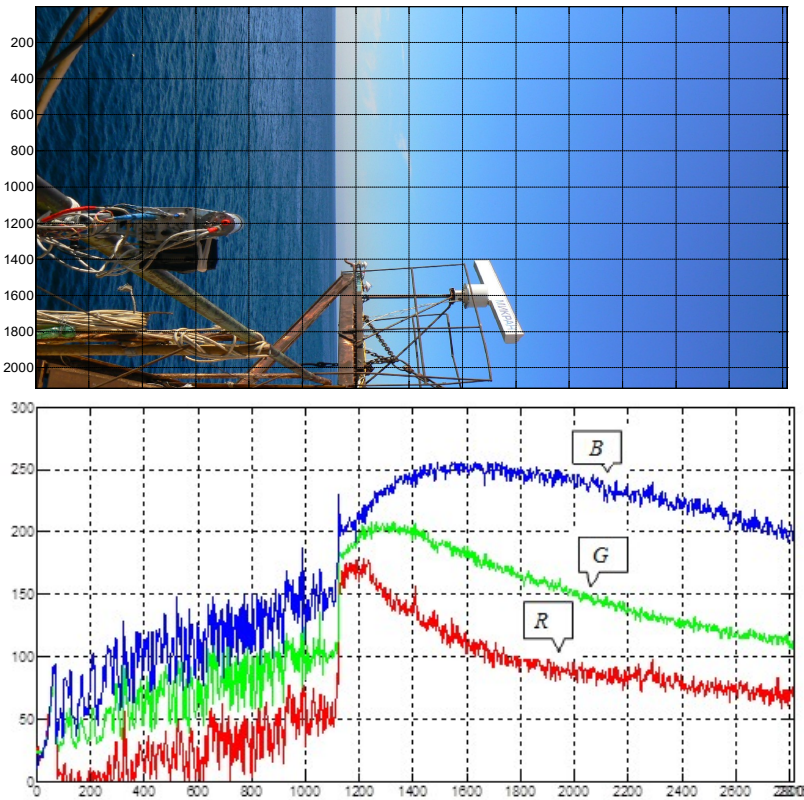


Р и с. 5. Множитель P как функция зенитного угла точки z и длины волны света (противосолнечное направление наблюдения)

Fig. 5. Multiplier P as a function of the zenith angle of the sky z and the light wavelength (opposite to the sun direction of observation)



Р и с. 6. Зависимость зенитного расстояния пригоризонтного максимума от длины волны света для яркости неба I (верхняя кривая) и множителя P (нижняя кривая)
F i g. 6. Dependence of the zenith angle of the sky brightness near-horizon maximum upon the light wavelength for the sky brightness I (upper curve) and the factor P (lower curve)



Р и с. 7. Фотоснимок неба и поверхности моря (вверху), сделанный с океанографической платформы в пгт Качивели 17.10.2014 г. в 10:17 (неполяризованный свет, размер фото 2816 точек (длинная сторона) на 2112 точек), а также R , G , B горизонтальные сечения (внизу), сделанные в середине фотоснимка в точке с номером пикселя 1000 по вертикальной оси. По вертикали на нижнем рисунке отложена величина сечения фотоснимка в 8-битовой шкале. Верхний и нижний рисунки совмещены по горизонтальной оси
F i g. 7. Photo of the sky and the sea surface (above) made from the oceanographic platform in Katsiveli on 17.10.2014 at 10:17 (nonpolarized light, photo dimensions: 2816 pixels (long side) \times 2112 pixels), the R , G , B horizontal sections (below) made in the middle of the photo in the point with the pixel number 1000 along the vertical axis. On the lower figure, the photo section value is shown on the vertical in the 8-bit scale. The upper and lower figures are superposed along the horizontal axis

Цифровые фотокамеры обладают хорошим разрешением, большим количеством точек на снимках и позволяют с хорошей точностью определять угловое положение пригоризонтного максимума яркости для R , G , B -составляющих цветных снимков. На рис 7 зафиксирован пригоризонтный максимум, который сдвигается к горизонту при увеличении длины волны света. Зенитные расстояния пригоризонтного максимума можно оценить как $81,4^\circ$, $85,7^\circ$ и $87,8^\circ$ для B , G , R -составляющих соответственно. На рис. 4 с помощью выносок показаны положения этих максимумов. Точки идут выше, что может быть обусловлено другими значениями оптических толщин атмосферы в эксперименте по сравнению с теми, которые произвольно выбраны для модельных расчетов.

Изложенный подход к анализу положения пригоризонтного максимума яркости неба позволяет в дальнейшем найти решение обратной задачи оценки оптической толщины атмосферы по положению максимумов яркости неба.

Алгоритм оценки оптической толщины атмосферы

Можно предложить следующий алгоритм оценки оптической толщины атмосферы для некоторого значения длины волны света λ . Релеевскую толщину атмосферы τ_r определим по известной формуле (3), а аэрозольную толщину атмосферы τ_a будем «перебирать» в некотором интервале значений с тем, чтобы получить значение вычисленного пригоризонтного максимума, совпадающее со значением, полученным в эксперименте. При этом в модельных расчетах должны учитываться зенитное расстояние солнца z_s и азимутальное расстояние солнца относительно наблюдателя ψ .

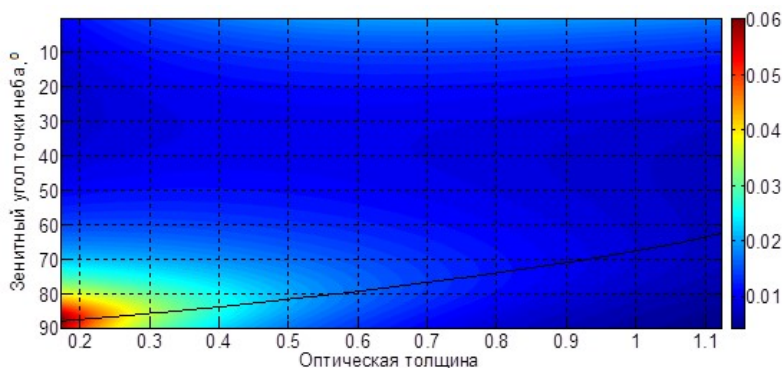
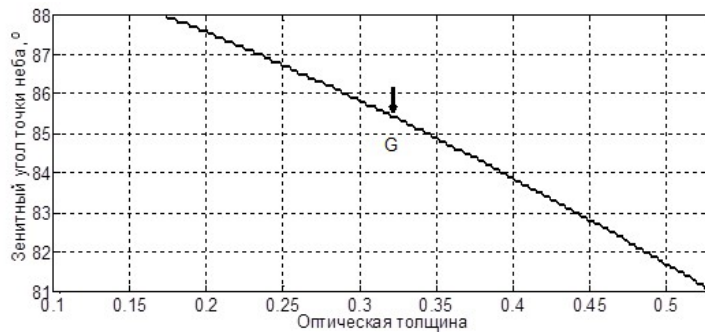


Рис. 8. Нормированная яркость неба в противосолнечном направлении как функция зенитного угла точки неба z и оптической толщины

Fig. 8. The normalized sky brightness in the opposite to the sun direction as a function of the sky zenith angle z and the optical thickness

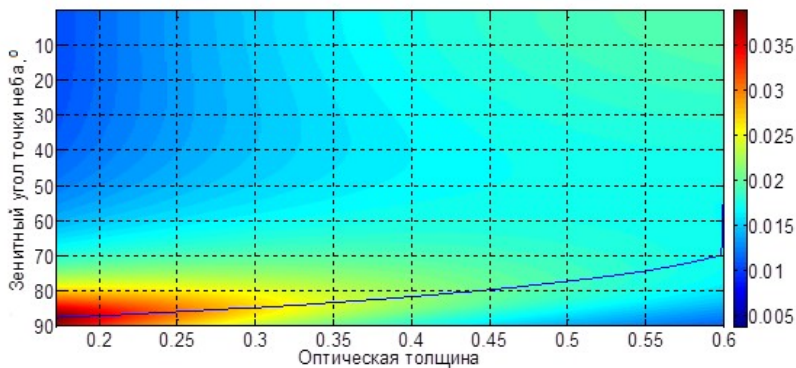
На рис. 8, где показана нормированная на спектральную солнечную постоянную яркость неба I в противосолнечном направлении ($\psi = 180^\circ$) как функция зенитного угла точки неба z и оптической толщины атмосферы, приведена также кривая зависимости зенитного угла пригоризонтного мак-

симула яркости от оптической толщины. На рис. 9 в увеличенном масштабе представлена часть зависимости зенитного угла пригоризонтного максимума яркости от оптической толщины при ее небольших значениях. Здесь стрелкой показано значение зенитного угла пригоризонтного максимума яркости для G -составляющей фотоснимка. Этому зенитному углу соответствует значение оптической толщины $\tau(520) = 0,32$.



Р и с. 9. Зависимость зенитного угла пригоризонтного максимума яркости от оптической толщины, $\psi = 180^\circ$

F i g. 9. Dependence of the zenith angle of the near-horizon brightness maximum upon the optical thickness, $\psi = 180^\circ$



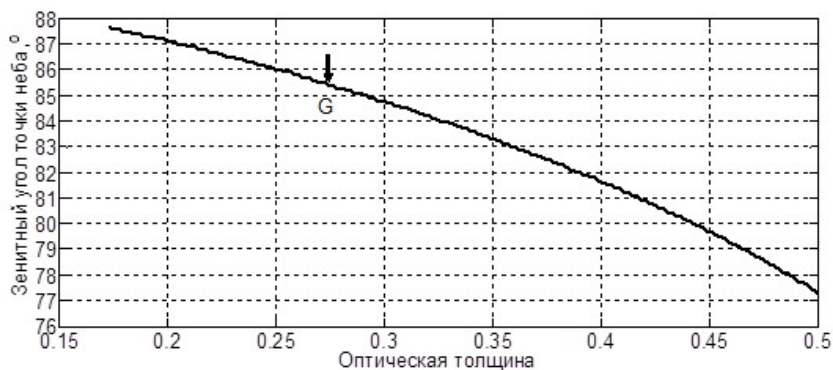
Р и с. 10. Нормированная яркость неба как функция зенитного угла точки неба z и оптической толщины. Внизу приведена кривая зависимости зенитного угла пригоризонтного максимума яркости от оптической толщины, $\psi = 90^\circ$

F i g. 10. The normalized sky brightness as a function of the sky zenith angle z and the optical thickness. The curve showing dependence of the zenith angle of the near-horizon brightness maximum upon the optical thickness, $\psi = 90^\circ$ is below

Уточненный анализ условий наблюдения показал, что фотоснимок (рис. 7) был сделан, когда азимутальный угол солнца относительно направления наблюдения ψ был близок к 90° . На рис. 10, 11 показаны распределение яркости неба и зависимость зенитного угла пригоризонтного максимума яр-

кости от оптической толщины при $\psi = 90^\circ$. Получены следующие значения оптических толщин ($z_s = 60^\circ$, $\psi = 90^\circ$):

$$\tau_r(520) = 0,123, \tau_a(520) = 0,152, \tau(520) = 0,275.$$



Р и с. 11. Зависимость зенитного угла пригоризонтного максимума яркости от оптической толщины, $\psi = 90^\circ$

F i g. 11. Dependence of the zenith angle of the near-horizon brightness maximum upon the optical thickness, $\psi = 90^\circ$

Отметим, что при изменении значений азимута солнца оценка оптической толщины меняется несущественно: разница в оценке оптической толщины для азимута солнца 180° и 90° составляет около 15–20%. Предложенный алгоритм восстановления значений оптических толщин атмосферы является «устойчивым» к возможным вариациям (ошибкам) в определении азимутального положения солнца.

Аналогичные вычисления были сделаны для B - и R -составляющих фотоснимка (рис. 7), с их помощью были получены следующие оценки оптических толщин ($z_s = 60^\circ$, $\psi = 90^\circ$):

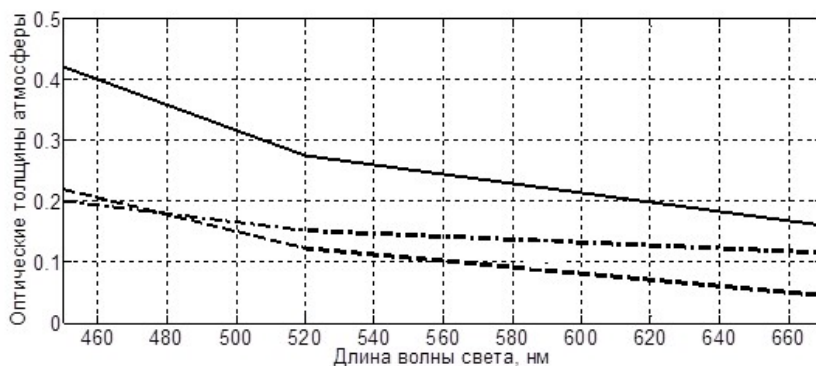
$$\tau_r(450) = 0,2196, \tau_a(450) = 0,2004, \tau(450) = 0,42,$$

$$\tau_r(670) = 0,0447, \tau_a(670) = 0,1153, \tau(670) = 0,16.$$

На рис. 12 приведены оптические толщины атмосферы для трех длин волны света. Полученные оценки оптических толщин совпадают с известными результатами натурных измерений аналогичных характеристик [4, 16].

Следует отметить, что однократное приближение для описания рассеяния света в атмосфере справедливо при небольших значениях оптических толщин атмосферы. При больших значениях оптических толщин в ультрафиолетовом диапазоне нужно учитывать рассеяние света более высоких кратностей. Изложенный подход к восстановлению значений оптической толщины атмосферы позволяет развить используемую модель яркости неба с учетом рассеяния более высоких кратностей, альbedo подстилающей поверхности, «экспоненциальной» модели атмосферы, поляризации света. Та-

кой способ оценки оптической толщины атмосферы можно использовать при восстановлении характеристик волнения по пространственно-временным изображениям поверхности моря в разных спектральных диапазонах света [1]. Пространственно-временные изображения формируются по одномерным оптическим «сечениям» поверхности моря с «захватом» горизонта и приповерхностного участка неба, когда также регистрируется пригоризонтный максимум яркости неба.



Р и с. 12. Оптические толщины атмосферы, восстановленные по фотоснимку на рис. 7, для трех длин волны света 450, 520, 670 нм. Штриховая линия – релеевская оптическая толщина, штрихпунктирная – аэрозольная оптическая толщина, сплошная – сумма аэрозольной и релеевской оптических толщин

F i g. 12. The atmosphere optical thickness retrieved from the photo in Fig. 7 for three light wavelengths: 450, 520 and 670 nm. The dash line denotes the Rayleigh optical thickness, the dash-dotted line – the aerosol optical thickness, the solid one is the sum of the aerosol and the Rayleigh optical thicknesses

Развитый в работе метод позволяет в реальном времени получать оценки оптических толщин атмосферы для трех спектральных диапазонов света R , G , B по фотоснимкам пригоризонтного участка неба. Полученные значения оптических толщин можно использовать в моделях углового распределения яркости безоблачного неба для оценки статистических характеристик волнения оптическим методом, а также для изучения оптических свойств атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мониторинг состояния поверхности моря по пространственно-временным оптическим изображениям / В. И. Титов [и др.] // Исследование Земли из космоса. 2014. № 5. С. 3–14. doi:10.7868/S0205961414050078
2. Оценка спектров ветровых волн с длинами от сантиметров до метра по изображениям поверхности моря / В. В. Баханов [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 192–205. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-192-205
3. Remote sensing technique for near-surface wind by optical images of rough water surface / V. I. Titov [et al.] // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, iss. 15. P. 5946–5957. doi:10.1080/01431161.2014.948223
4. *Kokhanovsky Alexander A.* Aerosol Optics. Berlin : Springer, 2008. 154 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49909-1>

5. *Chapman R. D.* Visibility of RMS slope variations on the sea surface // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 11. P. 1959–1966. <https://doi.org/10.1364/AO.20.001959>
6. *Лифишиц Г. Ш.* Рассеянный свет дневного неба. Алма-Ата : Наука, 1973. 148 с.
7. *Chapman R. D., Irani G. B.* Errors in estimating slope spectra from wave images // *Applied Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 20. P. 3645–3652. <https://doi.org/10.1364/AO.20.003645>
8. *Lee Raymond L.* Horizon brightness revisited: measurements and a model of clear-sky radiances // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 21. P. 4620–4628. <https://doi.org/10.1364/AO.33.004620>
9. Aerosol remote sensing over land: A comparison of satellite retrievals using different algorithms and instruments / A. A. Kokhanovsky [et al.] // *Atmospheric Research*. 2007. Vol. 85, iss. 3–4. P. 372–394. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.02.008>
10. *Lee Raymond L., Samudio Orlando R.* Spectral polarization of clear and hazy coastal skies // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51, iss. 31. P. 7499–7508. <https://doi.org/10.1364/AO.51.007499>
11. *Dubovik O., King M. D.* A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105, iss. D16. P. 20673–20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
12. Use of Polarimetric Measurements of the Sky over the Ocean for Spectral Optical Thickness Retrievals / K. Masuda [et al.] // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1999. Vol. 16, no. 7. P. 846–859. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<0846:UOPMOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<0846:UOPMOT>2.0.CO;2)
13. *Mishchenko M. I., Travis L. D.* Satellite retrieval of aerosol properties over the ocean using polarization as well as intensity of reflected sunlight // *Journal of Geophysical Research*. 1997. Vol. 102, iss. D14. P. 16989–17013. <https://doi.org/10.1029/96JD02425>
14. *Wang M., Gordon H. R.* Estimating aerosol optical properties over the oceans with the multi-angle imaging spectroradiometer: some preliminary studies // *Applied Optics*. 1994. Vol. 33, iss. 18. P. 4042–4057. <https://doi.org/10.1364/AO.33.004042>
15. *Базалицкая Г. П., Лифишиц Г. Ш.* Функции рассеяния света в безоблачной атмосфере // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1982. Т. 18, № 5. С. 551–555.
16. *Долин Л. С., Левин И. М.* Справочник по теории подводного видения. Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1991. 229 с.
17. *Hasekamp O. P., Landgraf J.* Retrieval of aerosol properties over land surfaces: capabilities of multiple-viewing-angle intensity and polarization measurements // *Applied Optics*. 2007. Vol. 46, iss. 16. P. 3332–3344. <https://doi.org/10.1364/AO.46.003332>
18. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements / J. L. Deuze [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. 2001. Vol. 106, no. D5. P. 4913–4926. doi:10.1029/2000JD900364

Об авторах:

Баханов Виктор Владимирович, заведующий лабораторией гидрофизического и акустического моделирования, ФГБНУ ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 6603623205**, bakh@hydro.appl.sci-nnov.ru

Демакова Анастасия Александровна, стажер-исследователь, аспирант, ФГБНУ ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), d6365@uandex.ru

Титов Виктор Иванович, старший научный сотрудник, ФГБНУ ИПФ РАН (603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46), кандидат физико-математических наук, **Scopus Author ID: 7201990965**, titov@hydro.appl.sci-nnov.ru