

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.463.5

О спектральной изменчивости коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал

В.И. Маньковский✉*

Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.;
после доработки 6.07.2022 г.;
принята к печати 15.07.2022 г.

Приведены результаты анализа данных по спектральной изменчивости коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал, полученных в работе Б.А. Таращанского с соавторами «Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15». Показано, что эти данные противоречат общеизвестным теоретическим и экспериментальным результатам. Выполнен модельный расчет спектральной изменчивости коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал.

Ключевые слова: индикатриса рассеяния, коэффициент асимметрии, рассеяние частицами, молекулярное рассеяние, длина волны, спектральная изменчивость; light scattering phase function, asymmetry coefficient, particle scattering, molecular scattering, wavelength, spectral variability.

Введение

В качестве характеристики рассеяния света в гидрооптике используется функция углового распределения показателя рассеяния $\sigma(\theta)$ в направлениях $\theta = 0-180^\circ$. В теории рассеяния света индикатрисой рассеяния называется функция $\chi(\theta) = 4\pi\sigma(\theta)/\sigma$ [1]; она показывает вероятность рассеяния света в разных направлениях. В настоящей работе термин «индикатриса рассеяния» применяется к функции $\sigma(\theta)$, показывающей количество рассеянного света в разных направлениях.

Одним из важных параметров индикатрисы рассеяния является коэффициент асимметрии K , характеризующий анизотропию функции рассеяния. Он определяется отношением показателя рассеяния вперед (в переднюю полусферу) к показателю рассеяния назад (в заднюю полусферу):

$$K = \int_0^{90} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta / \int_{90}^{180} \sigma(\theta) \sin\theta d\theta.$$

В [2] исследовалась спектральная изменчивость коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния в природных водах $K_b(\lambda)$. Построена модель, показывающая механизм спектральной изменчивости $K_b(\lambda)$. По данным [2], $K_b(\lambda)$ снижается с уменьшением длины волны в целом пропорционально ее величине.

В [3] измерялись индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал в районе установки Байкальского нейтринного телескопа. По результатам этих измерений в [3] построены графики спектральной изменчивости K_b в диапазоне длин волн $\lambda = 350-750$ нм. Они имеют куполообразную форму с максимумом в средней части спектра и минимумами на 350 и 750 нм. Эти графики противоречат общеизвестным теоретическим и экспериментальным данным. Цель настоящей работы — показать эти противоречия на примере расчета спектральной зависимости одного из параметров индикатрисы рассеяния — коэффициента асимметрии.

Комментарии к графикам работы [3]

На рис. 1 показано спектральное распределение $K_b(\lambda)$ в оз. Байкал по данным [3]. В соответствии с рис. 1 $K_b(350) = 1$. Такое значение коэффициента асимметрии может быть только в абсолютно чистой воде, в которой происходит молекулярное рассеяние света [4, 5]. Таких чистых вод в природных водоемах не существует, в них всегда присутствуют, даже на больших глубинах, взвешенные частицы, для которых коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния намного больше единицы. По данным [6, табл. 7.3], минимальный наблюдавший в морских водах $K_b(\lambda) = 8$.

Спектральные распределения $K_b(\lambda)$ на рис. 1, а и б объяснить с точки зрения теории рассеяния света невозможно. По этому вопросу обратимся к работе [2], в которой показан механизм спектральной изменчивости $K_b(\lambda)$.

* Виктор Иванович Маньковский (mankovskiy@mhi-gas.ru).

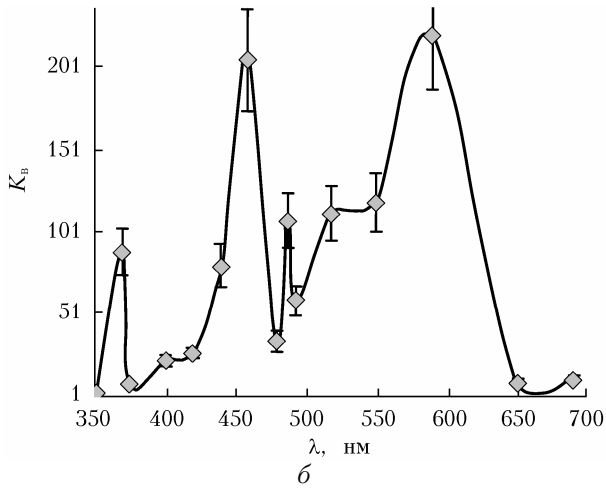
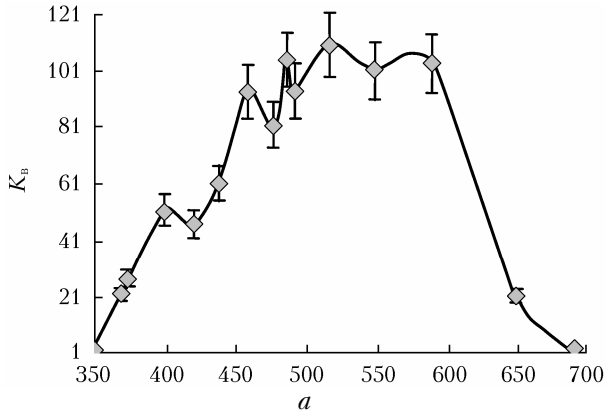


Рис. 1. Спектральное распределение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал по данным [3]: *a* – глубина 20 м; *b* – глубина 1 м

Модель спектральной изменчивости $K_B(\lambda)$ в водах оз. Байкал

Согласно [2] спектральная изменчивость коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света водой происходит следующим образом.

Индикатриса рассеяния света водой $\sigma_B(\theta, \lambda)$ является суммой индикатрис рассеяния света частицами взвеси $\sigma_C(\theta, \lambda)$ и молекулярного рассеяния $\sigma_M(\theta, \lambda)$. Коэффициент асимметрии суммарной индикатрисы

$$K_B(\lambda) = [\sigma_C(\lambda)\uparrow + \sigma_M(\lambda)\uparrow] / [\sigma_C(\lambda)\downarrow + \sigma_M(\lambda)\downarrow], \quad (1)$$

где \uparrow означает рассеяние вперед ($\theta = 0-90^\circ$), \downarrow – рассеяние назад ($\theta = 90-180^\circ$).

Коэффициент асимметрии молекулярной индикатрисы на любой длине волны равен единице, т.е. $\sigma_M(\lambda)\uparrow = \sigma_M(\lambda)\downarrow$. С учетом того, что $\sigma_M(\lambda)\uparrow + \sigma_M(\lambda)\downarrow = \sigma_M(\lambda)$, формулу (1) запишем в виде

$$K_B(\lambda) = [\sigma_C(\lambda)\uparrow + 0,5\sigma_M(\lambda)] / [\sigma_C(\lambda)\downarrow + 0,5\sigma_M(\lambda)]. \quad (2)$$

Спектральная изменчивость рассеяния частицами и молекулярного рассеяния разная: $\sigma_M \sim \lambda^{-4}$ [7], $\sigma_C \sim \lambda^{-1...-2}$ [8]. Вследствие этого с изменением длины волны относительный вклад индикатрисы частиц

и молекулярной индикатрисы в суммарную индикатрису меняется по-разному, что приводит к изменению ее коэффициента асимметрии. Воспользуемся этой моделью для расчета спектральной изменчивости коэффициента асимметрии в водах оз. Байкал.

В таблице и на рис. 2 приведено распределение $K_B(\lambda)$, рассчитанное по формуле (2) при $\sigma_C(\lambda) \sim \lambda^{-1}$ и $\sigma_M \sim \lambda^{-4}$. Изменение коэффициента асимметрии по спектру рассчитывалось от $\lambda = 520$ нм, где его величина была принята такой же, как и на рис. 1, a ($K_B(520) = 110$). Необходимый для расчетов показатель рассеяния на этой длине волны $\sigma_B(520) = 1,55 \text{ м}^{-1}$, исходя из соотношения $K_B(520) = 35,1 \times \ln\sigma(520) + 94,7$, полученного по результатам измерений индикатрис рассеяния света в оз. Байкал [9].

Спектральное распределение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света водой в оз. Байкал, рассчитанное по модели из работы [2]

$\lambda, \text{ нм}$	350	400	450	500	520	550	600	650	700	750
K_B	97,0	103,0	107,3	109,6	110,0	111,0	111,9	112,7	113,6	114,3

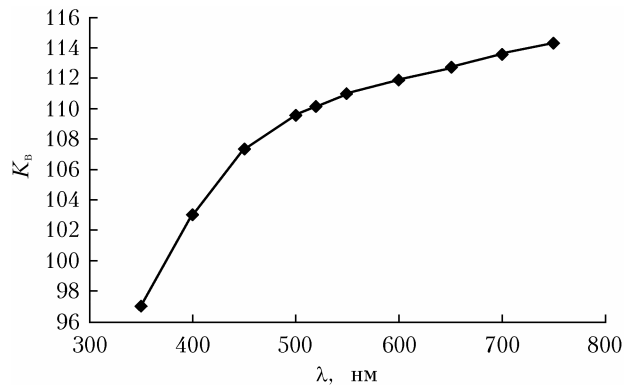


Рис. 2. Спектральное распределение коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света водой в оз. Байкал по модели из [2] с параметрами: $\sigma_C(\lambda) \sim \lambda^{-1}$, $\sigma_M(\lambda) \sim \lambda^{-4}$, $K_B(520) = 110$, $\sigma_B(520) = 1,55 \text{ м}^{-1}$, $\sigma_M(520) = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ [10, табл. 3.1]

Показатели рассеяния частицами вперед и назад в формуле (2) определены по соотношениям

$$\sigma_B(520)\downarrow = \sigma_B(520) / [K_B(520) + 1];$$

$$\sigma_C(520)\downarrow = \sigma_B(520)\downarrow - \sigma_M(520)\downarrow;$$

$$\sigma_C(520)\uparrow = \sigma_B(520) - \sigma_B(520)\downarrow - \sigma_M(520)\uparrow.$$

Как видно из таблицы и рис. 2, $K_B(\lambda)$ изменяется по спектру без экстремумов, плавно, в целом пропорционально длине волны.

Коэффициент γ спектральной изменчивости показателя рассеяния частицами $\sigma_C(\lambda) \sim \lambda^{-\gamma}$ в модели распределения $K_B(\lambda)$ в оз. Байкал в настоящей работе принят $\sigma_C(\lambda)\uparrow \sim \lambda^{-1}$ и $\sigma_C(\lambda)\downarrow \sim \lambda^{-1}$. В [2] распределения $K_B(\lambda)$ рассчитаны при других значениях коэффициента спектральной изменчивости частицами: $\gamma\uparrow > \gamma\downarrow$ и $\gamma\uparrow < \gamma\downarrow$. Результаты расчетов показывают, что во всех случаях $K_B(\lambda)$ изменяется с длиной волны плавно, без экстремумов (см. рисунок в [2]).

Заключение

Анализ приводимых в [3] данных спектральной изменчивости коэффициента асимметрии индикатрисы рассеяния света в водах оз. Байкал показывает:

1) $K_v(350) = 1$ на рис. 1, *a* и *б* противоречит теоретическим и известным в литературе экспериментальным данным;

2) модельное спектральное распределение $K_v(\lambda)$ в водах оз. Байкал в принципе иное, чем на рис. 1, *a* и *б*. Оно имеет вид плавно возрастающей по спектру (без экстремумов), в целом пропорционально длине волны, функции.

Приведенная в статье информация полезна для дальнейших исследований оптических свойств вод Байкала, особенно с учетом критической значимости этого водоема.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0003.

Список литературы

1. *Шифрин К.С.* Гидрооптические характеристики // Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 10–11.
2. *Маньковский В.И.* Спектральная изменчивость индикатрис рассеяния света морской водой // Океанология. 1984. Т. 24, вып. 1. С. 63–69.
3. *Таращанский Б.А., Коханенко Г.П., Миргазов Р.Р., Рябов Е.В., Ягунов А.С.* Методы и результаты мониторинга оптических характеристик водной среды байкальского нейтринного телескопа, осуществляемого стационарным глубоководным прибором ASP-15 // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 793–802; *Tarashchanskii B.A., Kokhanenko G.P., Mirgazov R.R., Ryabov E.V., Yagunov A.S.* Monitoring of optical properties of water near the Baikal Neutrino Telescope with the use of a submerged device ASP-15: Methods and results // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 2. P. 188–197.
4. *Morel A.* Optical properties of pure water and pure sea water // Optical Aspects of Oceanography / N. Jerlov, E. Steemann Nielsen (eds.). New York: Academic Press, 1974. P. 1–24.
5. *Shybanov E.B.* Effect of finely divided admixtures on the scattering of light in “pure” filtered water // Phys. Oceanography. 2008. V. 18, N 2. P. 86–95.
6. *Копелевич О.В.* Экспериментальные данные об оптических свойствах морской воды // Физическая оптика океана. Л.: Наука, 1983. Табл. 7.3. С. 168.
7. *Dawson L.H., Hulbert E.O.* The scattering of light by water // J. Opt. Soc. Am. 1937. V. 27. P. 199–201.
8. *Копелевич О.В., Шифрин К.С.* Современные представления об оптических свойствах морской воды // Оптика океана и атмосферы. М.: Наука, 1981. С. 4–55.
9. *Маньковский В.И.* Характеристики индикатрис рассеяния света в водах озера Байкал // Автоматизация научных исследований и световой режим водоемов. Новосибирск: Наука, 1984. С. 125–137.
10. *Шифрин К.С.* Оптические константы чистой воды // Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 66.

V.I. Mankovskiy. Spectral variability of light scattering phase function in Lake Baikal waters.

Data on the spectral variability of the coefficient of asymmetry of the light scattering phase function in the water of Lake Baikal obtained by Tarashchansky B.A. et al. in the work “Methods and Results of Monitoring the Optical Characteristics of the Water Environment of the Baikal Neutrino Telescope, Carried out by a Stationary Deep-Sea Device ASP-15” are analyzed. It is shown that these data contradict the theoretical and experimental results. The model calculation of the spectral variability of the coefficient of asymmetry of the light scattering phase function in the waters of Lake Baikal has been performed.