

УДК 551.463.5

© Е. Б. Шибанов*, М. Е. Ли, 2022

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

*E-mail: e-shybanov@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ГИДРОЗОЛЯ НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАССЕЯНИЯ СВЕТА МОРСКОЙ ВОДОЙ В МАЛЫХ УГЛАХ

Статья поступила в редакцию 14.02.2022, после доработки 05.09.2022, принята в печать 11.09.2022

Для корректной интерпретации результатов измерений спектрально-угловой структуры однократно рассеянного света в природной и в искусственной воде высокой прозрачности ставилась задача аналитически и экспериментально определить влияние изменения дисперсного состава взвешенных частиц на спектральные свойства рассеяния света в малых углах. Считалось, что в воде всегда существует определенная корреляция в положениях рассеивающих центров, вследствие чего индикатриса рассеяния света водой имеет острый пик в нуле градусов. На основе алгоритмов то теории Ми рассчитывались суммы интенсивностей и амплитуд рассеяния света полидисперсной взвесью со степенным законом распределения частиц, максимальный размер которых варьировался. Квадрат суммы амплитуд рассеяния сопоставлялся с величиной классического слагаемого. Показано, что в коротковолновой области видимого диапазона спектра с увеличением максимального радиуса частиц, начиная примерно с 0,2 мкм, происходит существенная компенсация эффекта пространственной корреляции частиц. Причем вклад дополнительного слагаемого сильнее уменьшается в области больших углов рассеяния. Измерены спектральные свойства рассеяния света морской водой при последовательной фильтрации через нуклеопоровые фильтры с диаметром пор 2, 1, 0,45 мкм. Анализировалась область углов рассеяния от 6 до 90°. Бралась пробы воды с поверхности Черного моря. Относительная прозрачность морской воды варьировалась от 16 до 19 м. Было обнаружено, что после фильтрации через фильтр с порами $d = 1$ мкм появляются спектральные особенности рассеяния света, с выраженным характерным минимумом спектральной кривой в окрестности 30°. Наиболее отчетливо эффект проявлялся на следующем этапе фильтрации, т. е. при $d = 0,45$ мкм. Показано, что угловая зависимость показателя степени спектрального наклона, полученного в результате обработки экспериментальных данных, соответствует теоретическим предсказаниям.

Ключевые слова: рассеяние света, спектральные свойства, угловой показатель рассеяния, гидрозоль, морская вода, форм-фактор, пространственные корреляции, распределение частиц по размерам, фильтрация

© E. B. Shybanov*, M. E. Lee, 2022

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, 299011, Kapitanskaya Str., 2, Sevastopol. Russia

*E-mail: e-shybanov@mail.ru

EFFECT OF A POLYDISPERSE HYDROSOL ON THE SPECTRAL PROPERTIES OF LIGHT SCATTERING BY SEAWATER AT FORWARD ANGLES

Received 14.02.2022; Revised 05.09.2022; Accepted 11.09.2022

In this paper we discuss the problem how to analyze the results of spectral volume scattering function measurements in natural waters and artificial ones. Analytical predictions and experimental proves of the remarkable changes in the properties of the light scattering at small angles after a filtration of water sample are presented. It was proposed that a certain correlations in the positions of scattering centers always exist in the water which were resulted in the volume scattering function of any natural water was strong forward peaked. Based on Mie theory the sums of scattering amplitudes and scattering radiances were calculated for a power-law particle size distribution while the maximal radius was varied. The square of the sum of the scattering amplitudes was compared with the value of the classical term. It is shown that in the “blue” a significant compensation of the effect of spatial correlation of particles occurs with an increasing of the maximum radius of particles, starting from the radius is about 0.2 μm . The contribution of the additional term decreases faster at general angles region. The spectral properties of light scattering by seawater during sequential filtration through nucleopore filters with a pore diameter of 2, 1, and 0.45 μm have been measured. The volume

Ссылка для цитирования: Шибанов Е.Б., Ли М.Е. Влияние полидисперсности гидрозоль на спектральные свойства рассеяния света морской водой в малых углах // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 18–26. doi:10.48612/fpg/41ha-gn1d-hxup

For citation: Shybanov E.B., Lee M.E. Effect of a Polydisperse Hydrosol on the Spectral Properties of Light Scattering by Seawater at Forward Angles. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 18–26. doi:10.48612/fpg/41ha-gn1d-hxup

scattering function data at scattering angles from 6 to 90 degrees were analyzed. Water samples were taken from the surface of the Black Sea at the beginning of October. The Secchi depths are varied from 16 up to 19m. It was found that after filtration through a filter with pores diameter equal to 1 μm , the typical deep at 30° of spectral slope of volume scattering function was appeared. Such deep becomes stronger after the next stage of filtration, when diameter of pores was equal to 0.45 μm . It is shown that the angular dependence of the exponent of the spectral slope obtained as a result of processing the experimental data is in consistent with theoretical predictions.

Keywords: light scattering, spectral properties, volume scattering function, hydrosol, sea water, form-factor, spatial correlations, particle size distribution, filtration

1. Введение

Совершенствование теории предполагает глубокий анализ основных принципов ее построения. Принцип аддитивности влияния различных компонент морской среды на ее оптические характеристики составил основы гидрооптики. Он следует из предположения о независимом расположении рассеивающих центров и на малости длины волны по сравнению с расстояниями между частицами [1]. Насколько строго такое допущение? Хорошо известно, что индикатриса рассеяния морской воды имеет острый пик в направлении нулевого угла. Из теории рассеяния известно, что ряд разложения рассеянной электромагнитной волны по угловым функциям можно оборвать, например, для сферических частиц на порядковом номере полинома, оцениваемым как $n_{\text{max}} \approx x + 6 \cdot x^{1/3}$, где x — параметр дифракции. Иными словами, производная индикатрисы рассеяния света на частицах в нуле должна равняться нулю. Устойчивый по времени пик будет свидетельствовать о наличии определенных, хотя и малых, корреляций в положениях рассеивающих центров.

Для морских индикатрис доля рассеяния в узком интервале углов от 0 до 4°, за вычетом молекулярной составляющей, как правило, составляет более 50% [2, 3]. Интересна величина вклада реальных частиц. К сожалению, в области малых углов имеются существенные проблемы измерений, в основном вследствие паразитных лучей, обусловленных в первую очередь дифракцией на апертуре [4, с. 181]. При этом минимальная величина углового показателя рассеяния света морской водой вблизи 0°, равная $100 \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ на длине волны 510 нм, по литературным данным на 5 порядков превышает его теоретическое значение, рассчитанное для молекулярного рассеяния на длине волны 400 нм [5]. В литературе имеется очень мало сведений об экспериментально измеренных спектральных свойствах рассеяния морской воды в диапазоне углов 0–30°. Наиболее детальные спектральные измерения индикатрисы рассеяния света от 30 до 150° впервые были проведены Морелем [6]. Основной его результат состоит в том, что по мере приближения к направлению проникающего в среду светового излучения рассеяние становится менее селективным, что качественно согласуется с предложенной позднее моделью двухкомпонентной взвеси [7]. Однако данный результат противоречит интерпретации результатов измерения поляризационных свойств рассеяния [8], поскольку оптически мягкие частицы с уменьшением угла сильнее рассеивают коротковолновую радиацию. Область малых углов всегда вызвала множество вопросов. Например, всем разработчикам оптических нефелометров известно, что для получения опорной калибровочной воды высокого качества необходимо удалить из нее не только крупные частицы, но и существенно уменьшить концентрацию остальных растворенных примесей. Но растворенная часть примеси не должна сильно искажать форму молекулярной индикатрисы, поскольку это тоже молекулы. В последние годы выявились несоответствия данных измерений индикатрисы рассеяния абсолютно чистой воды теоретическим представлениям и в области больших углов рассеяния. В идеально чистой воде в естественных условиях обнаружены газовые компоненты не только в растворенной форме, но и в виде стабильных пузырьков малого размера — бабстонов [9, 10]. Однако результаты экспериментальной оценки их размера в растворе NaCl дают величины порядка 0,1 мкм [11], и не превышающие 0,6 мкм для других электролитов [12], что не может объяснить результаты измерений рассеяния света в малых углах в чистой воде.

Основываясь на физических принципах межмолекулярного взаимодействия в жидкости, в работе [13] была предложена гипотеза о согласованном распределении неоднородностей в объеме воды, с линейным размером большим длины световой волны. Гипотеза постулирует существование подпространства, с объемной мерой равной нулю, в котором располагаются примеси и мелкие частицы [14]. Таким образом, вклад реальных частиц в рассеяние света вперед в чистых природных водах может быть незначительным. Целью данной работы является определение условий, при которых по результатам оптических измерений можно оценить количественный и, возможно, качественный состав взвешенных в морской воде частиц.

2. Теория и численные расчеты

Нижеизложенный подход, предложенный в [14] и развитый в [13], основан на следующих принципах и постулатах.

1. Термодинамические процессы в жидкости слишком медленны по сравнению со временем взаимодействия излучения со средой. Если ограничить размер оптических неоднородностей долями миллиметра, то характерное время взаимодействия света с неоднородностями будет меньше 10^{-12} с. Для сравнения средний период, за который молекула воды меняет свое положение равновесия, равняется 10^{-11} с. Из энергетических соображений в жидкости молекулам выгодно распадаться на кластеры, временные структуры, между которыми располагаются свободные, несвязанные молекулы.

2. Пассивные примеси, по определению не взаимодействуя с объемом воды, располагаются между кластерами воды. Границы кластеров образуют пространство пониженной размерности, в котором примеси и свободные молекулы располагаются случайно и статистически равновесно.

3. Кластер воды совместно с расположенными на его границе примесями определяется как оптическая квазичастица, время существования которой должно быть ограничено, вследствие генерации водой собственных звуковых колебаний (меньше 10^{-7} с). Квазичастицы разного размера (и формы) заполняют объем жидкости.

На рис. 1 показан пример случайного расположения частиц в объеме воды, при условии, что частицы не могут находиться внутри сфер разного диаметра.

Поскольку радиусы и центры соседних сфер независимы, то в первом приближении задача сводится к расчету рассеяния света на локальных квазичастицах, представляющих собой частицы с оболочкой. Падающее поле считается однородным и определяется суперпозицией внешнего поля и среднего поля, обусловленного рассеянием на всех частицах. По той причине рассеяние будет определяться внешней оболочкой и внутренним объемом кластера.

Пусть в некоторой области находятся n одинаковых частиц. Тогда для учета их взаимного расположения необходимо возвести в квадрат сумму всех фазовых множителей.

$$\left| \sum_{j=1}^n e^{i\varphi_j} \right|^2 = n + 2 \sum_{j=1}^n \sum_{k=j+1}^n \cos(\varphi_j - \varphi_k). \quad (1)$$

Двойная сумма учитывает всевозможные парные сочетания фаз. Величина $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e^{i\varphi_j}$ есть форм-фактор области, где расположены частицы. Форм-фактор определяет способ сложения амплитуд с учетом фазового множителя и влияет на спектральный ход рассеяния в зависимости от угла наблюдения и отношения характерного размера к длине волны. Если существует $n \cdot (n - 1)/2$ таких областей, в которых случайным образом расположены только две частицы, то выражение для интенсивности рассеяния, нормированной на интенсивность рассеяния одной частицы, будет аналогично выражению (1) и отличаться в основном первым слагаемым правой части.

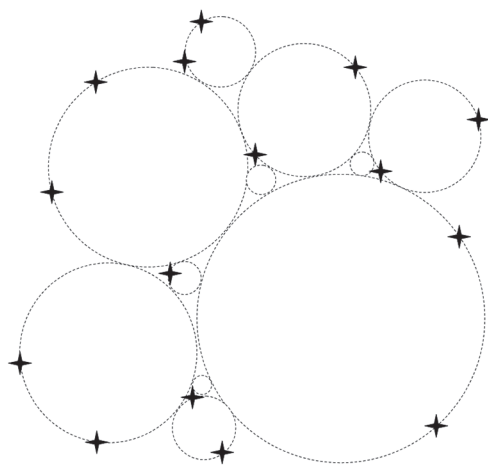


Рис. 1. Модель неоднородностей воды. Пунктирными линиями обозначены положения, в которых могут находиться реальные частицы, обозначенные крестиками

Fig. 1. Schematic for nonuniformities of water. The suspended particles (crosses) are located in positions marked by dotted lines

$$\sum_{j=1}^{n(n-1)/2} \left| e^{i\varphi_{j,1}} + e^{i\varphi_{j,2}} \right|^2 = n \cdot (n - 1) + 2 \sum_{j=1}^{n(n-1)/2} \cos(\varphi_{j,1} - \varphi_{j,2}). \quad (2)$$

Вследствие случайного характера распределения частиц в одинарной сумме в (2) могут повторяться сочетания $\varphi_{j,1}, \varphi_{j,2}$. Однако вероятность такого события уменьшается с ростом n как $1/n$. Таким образом задача учета эффектов пространственных корреляций в положениях частиц в воде сводится к задаче расчета рассеяния света на оптических квазичастицах.

В случае полидисперсного распределения реальных частиц по размерам, и при условии малости их размеров по сравнению с характерным размером квазичастицы, в выражение для интенсивности рассеяния войдет квадрат средних амплитуды рассеяния полидисперсной взвеси. Пусть $\partial N/\partial r$ — функция распределения квазичастиц по размерам. Тогда интенсивность рассеяния света ансамблем квазичастиц будет выражаться через интеграл.

$$I(\theta, \lambda) = \lambda^2 \frac{|\overline{S}_1|^2 + |\overline{S}_2|^2}{8\pi^2} \int [f_s(\theta, \lambda) \cdot s(r) \cdot n_s - f_v(\theta, \lambda) \cdot v(r) \cdot n_v]^2 \partial N / \partial r dr, \quad (3)$$

где $\overline{S}_i = \int_{r_0}^{r_{\max}} S_i(r) p(r) dr / \int_{r_0}^{r_{\max}} p(r) dr$ — осредненный по функции распределения реальных частиц $p(r)$ элемент амплитудной матрицы рассеяния; $f_s(\theta, \lambda), f_v(\theta, \lambda)$ — форм-факторы поверхности квазичастицы и ее объема; $s(r), v(r)$ — площадь поверхности и объем квазичастицы; n_s, n_v — концентрация реальных частиц на единицу поверхности квазичастицы и в единице объема; θ — угол рассеяния.

Второе слагаемое в квадратных скобках с обратным знаком учитывает влияние рассеяния на всех частицах среды, поскольку внутри квазичастицы частицы отсутствуют.

В данной работе нас интересует отношение дополнительного слагаемого к классическому слагаемому без учета влияния форм-фактора. Вычислим это отношение как функцию угла рассеяния в зависимости от максимально возможного размера при степенном распределении Юнге. На основе теории Ми была написана программа расчета суммы интенсивностей рассеяния частиц полидисперсной взвеси, а также и суммы амплитуд рассеяния света полидисперсной взвесью. Рассчитаны интегралы комплексных амплитуды $S_1(\lambda), S_2(\lambda)$ по степенной функции распределения. Интегрирование проводилось от размера, много меньшего длины волны, до максимального радиуса r_{\max} , являющегося параметром задачи. Полученный результат нормировался на сумму интенсивностей рассеяния для заданного распределения по размерам. Поскольку квадрат суммы амплитуд нелинейно зависит от концентрации и числа частиц, считалось, что это отношение равно единице, если максимальный радиус r_{\max} стремиться к нижнему пределу интегрирования.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2 для различных углов рассеяния, получены для длины волны $\lambda = 0,443$ мкм и при относительном показателе преломления взвешенных частиц, равном $n = 1,17$. Понятно, что если $r_{\max} \rightarrow 0$, то нормированный квадрат амплитуды близок к релейской индикатрисе рассеяния, а с ростом r_{\max} как анализируемая величина, так и индикатриса рассеяния становится более вытянутой вперед.

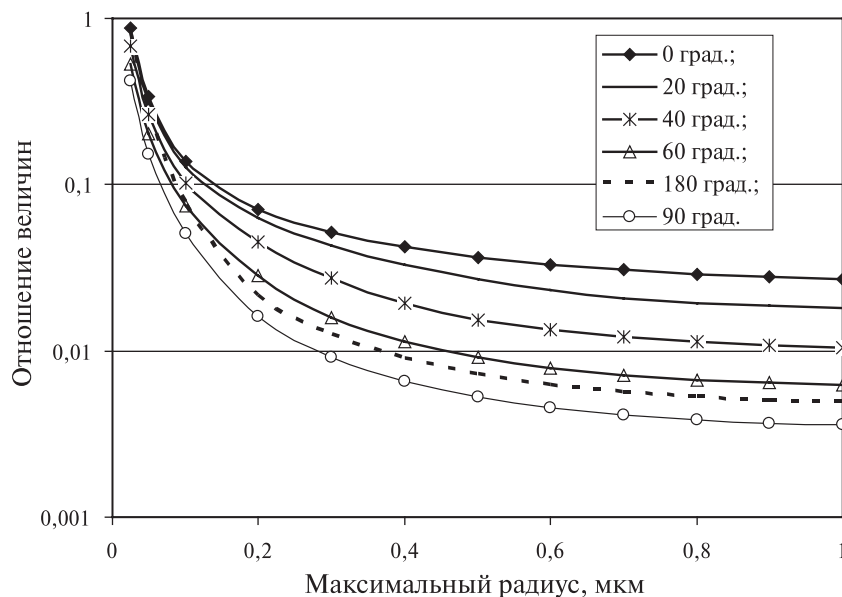


Рис. 2. Отношение квадрата суммы амплитуд рассеяния взвешенных в воде частиц, при условии равенства фазы световой волны, к интенсивности рассеяния в зависимости от максимально возможного радиуса частиц в распределении Юнге. Длина волны 0,443 мкм. Относительный показатель преломления $n = 1,17$

Fig. 2. The ratio of the square of the sum of the scattering amplitudes for suspended particles in water to the radiance, provided that the phases of the light wave are equal, depending on the maximal radius of particle for the power law distribution. Wavelength was equal to 0.443 μm . Relative refractive index was equal to 1.17

Основная особенность показанных кривых состоит в падении эффективности рассеяния с ростом параметра r_{\max} , что есть следствие сложения амплитуд с различными фазами. Очевидно, что интеграл по всем направлениям от нормированного квадрата амплитуды становится существенно меньше единицы при увеличении r_{\max} . Поэтому доля классического слагаемого, описывающего рассеяние на случайно распределенных частицах, будет расти по мере того, как в рассеянии света будут вносить вклад более крупные частицы. Приведенный пример показывает, что учет пространственных корреляций наиболее важен, когда относительное количество более крупных частиц резко уменьшается, то есть для чистых искусственных и особо чистых природных вод. Вторая особенность поведения кривых на рис. 2 состоит в заметном снижении эффектов корреляции фаз рассеянного света с увеличением угла. Учет форм фактора приведет еще к большему разбросу кривых для малых и больших углов рассеяния.

3. Эксперимент

Рассеивающие свойства морской воды определялись с помощью Многоканального Измерителя Объемной Функции Рассеяния (MVSM), разработанного в период с 2002 по 2006 гг. [15]. Измерения проводились в 12-ти интервалах длин волн 380, 400, 412, 435, 456, 490, 532, 560, 590, 625, 683, 780 нм со спектральным разрешением от 10 до 20 нм. Угловой диапазон измерения составлял от 0,55 до 177,75°. Данные получены в ходе оптической экспедиции на океанографической платформе в п. Кацивели в начале сентября 2019 г. Пробы брались с поверхности и с глубины 25–30 м. Относительная прозрачность морской воды по диску Секки варьировалась от 16 до 19 м.

Для оценки влияния взвешенных частиц пробы морской воды фильтровались через фильтры с диаметром пор 2, 1 и 0,45 мкм. Чтобы снизить эффект уменьшения эффективного диаметра пор вследствие засорения фильтра частицами фильтрация проводилась последовательно, начиная с образцов воды, пропущенных через фильтры, имеющие больший диаметр пор. На рис. 3 показаны величины углового показателя рассеяния света морской водой на длине волны 465 нм за вычетом значений полученных для воды очищенной методом обратного осмоса.

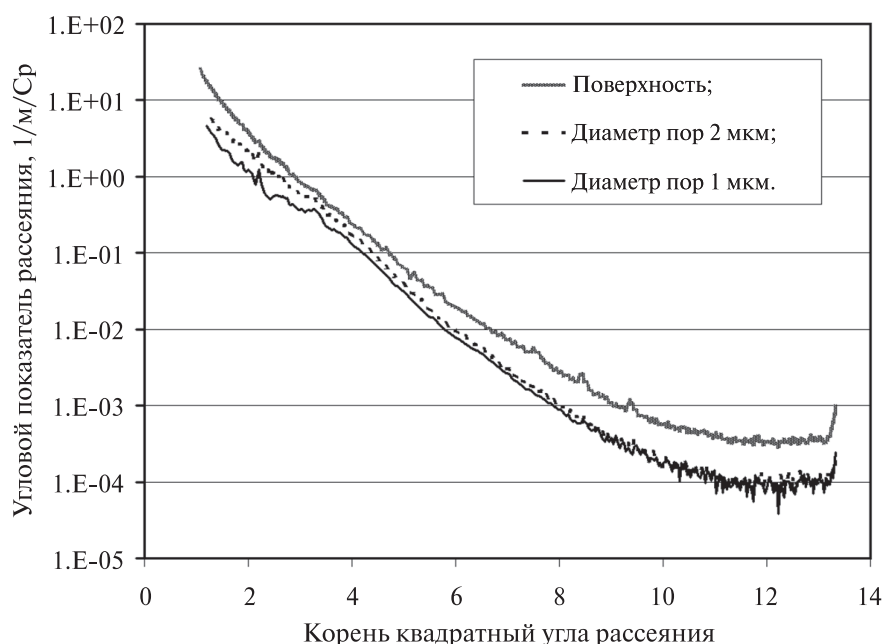


Рис. 3. Угловой показатель рассеяния света фильтрованной морской водой на длине волны 465 нм в сравнении с показателем рассеяния света в пробе, взятой с поверхности моря. Величины рассчитаны за вычетом рассеяния света в воде, очищенной методом обратного осмоса

Fig. 3. The volume scattering function (VSF) of filtered sea water at 465 nm compared to VSF of the surface sea water. All data are presented with account for the light scattering in reference fresh water purified by the method of reverse osmosis

Из рисунка видно, что удаление из воды частиц, больших 2 мкм, заметно снижает показатель рассеяния во всем угловом интервале. После следующего этапа фильтрации происходит также уменьшение показателя рассеяния, но по сравнению с сильной угловой зависимостью, на 6-порядков, такое уменьшение кажется несущественным. Данные закономерности наблюдались во всех спектральных интервалах. Отметим, что величины показателя рассеяния воды, отфильтрованной через 0,45 мкм и 1 мкм, практически совпадали. Также оказались достаточно близкими значения угловых показателей рассеяния света для фильтрованной морской воды — диаметр пор 2 мкм, и для проб воды, взятых с глубин 25–30 м.

Проанализируем спектральные свойства рассеяния света морской водой, содержащей только мелкие частицы. На рис. 4 приведен показатель рассеяния морской воды на всех длинах волн. С целью уменьшения влияния погрешности измерений на качество рисунка величины молекулярного рассеяния не вычитались. Рисунок демонстрирует достаточно сложную спектрально-угловую структуру рассеяния света в воде, содержащей только мелкие частицы ($d < 1$ мкм).

Разброс кривых в области больших углов в основном обусловлен молекулярным рассеянием. Однако аналогичная тенденция наблюдается и при уменьшении угла, начиная с 30° . Как уже отмечалось, индикатриса рассеяния остается сильно вытянутой вперед. Кроме того, наименьший спектральный разброс значений рассеяния наблюдается примерно на 30° и увеличивается в сторону малых и больших углов. Наличие локального минимума селективности рассеяния света водой, за вычетом молекулярного рассеяния, было подтверждено как модельными расчетами [13], так и было обнаружено в экспериментах по измерению спектрально-углового показателя рассеяния света в разбавленной суспензии Маалокса. Несмотря на близость угловых показателей рассеяния света фильтрованной воды через фильтры с порами 1 и 0,45 мкм, обнаруживаются определенные спектральные различия, показанные на рис. 5.

Спектральные особенности рассеяния света приведены для следующих образцов:

- морской воды, относительная прозрачность которой по диску Секки составляла 19 м, отфильтрованной через фильтр с диаметром пор 1 мкм;
- морской воды, отфильтрованной через фильтр с диаметром пор 0,45 мкм;
- морской воды, взятой с поверхности возле платформы.

Спектрально-угловой показатель рассеяния для каждого угла аппроксимировался степенной зависимостью от длины волны $\beta_p(\lambda_0, \theta)(\lambda/\lambda_0)^{-\gamma(\theta)}$. Кривые построены без вычета молекулярной составляющей. Поэтому чем выше селективность рассеяния в обычных углах, тем чище вода. Для всех образцов фильтрованной воды обнаруживается локальный минимум кривой показателя степени $\gamma(\theta)$ в окрестности угла 30° . Этот минимум проявляется более отчетливо с уменьшением размер пор фильтра. В морской воде, взятой с поверхности, локальный минимум практически не заметен.

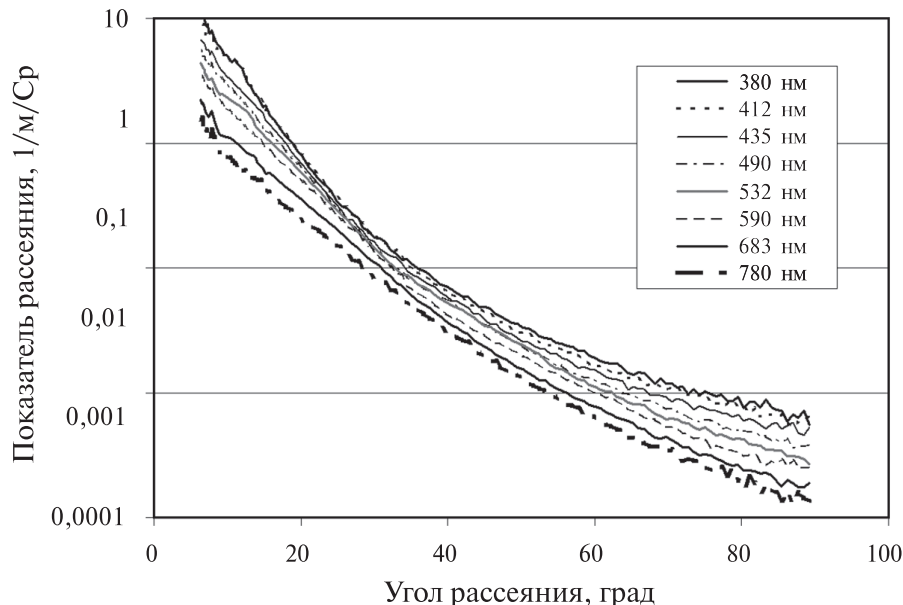


Рис. 4. Угловой показатель рассеяния морской воды, профильтрованной через фильтр с диаметром пор 1 мкм

Fig. 4. The VSFs of the filtered seawater. Pore sizes were equal to 1 μm

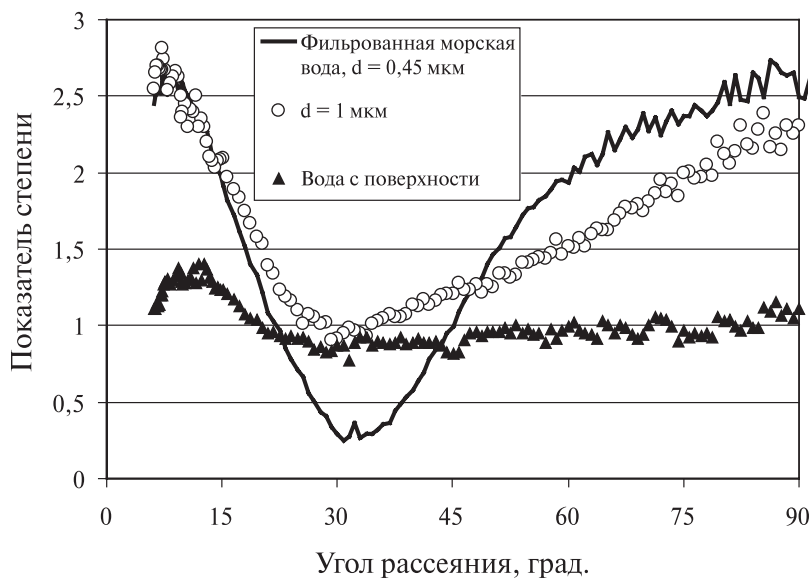


Рис. 5. Спектральные закономерности рассеяния света морской водой в передней полусфере

Fig. 5. Spectral properties of VSF for seawater at forward direction

4. Выводы

Рассеяние света морской водой остается сильно анизотропным при фильтрации проб воды через фильтры с размерами пор 2, 1 и 0,45 мкм. Как показали результаты экспериментов, дальнейшая фильтрация через фильтр с меньшими размерами пор лишь незначительно уменьшает величину показателя рассеяния света водой в малых углах. Этот свидетельствует о том, что механизм рассеяния света в фильтрованной воде уже не связан с крупными взвешенными частицами, а индикатриса рассеяния света водой остается анизотропной вследствие корреляции в положениях оптических неоднородностей.

Для объяснения полученных результатов предлагается использовать новое понятие — оптическая квазичастица, позволяющее учесть влияние корреляций положений мелких частиц и других оптических неоднородностей на рассеяние света водой. Показан статистический смысл этого термина. Хотя аналитическое выражение для интенсивности рассеяния света, учитывающее согласованное распределение частиц в воде, явно зависит от неизвестной априори функции распределения квазичастиц по размерам, это выражение пропорционально квадрату суммы интенсивностей рассеяния света ансамблем полидисперсных частиц. Поэтому становится возможным теоретически предсказать закономерности изменения вклада рассеяния на квазичастицах в полное рассеяние света морской водой при изменении функции распределения частиц, взвешенных в воде.

Результаты экспериментов показали, что после удаления из морской воды взвешенных частиц, размер которых превышает 1 мкм, угловой показатель рассеяния света приобретает спектральные особенности в передней полусфере, нехарактерные для рассеяния света на частицах. Такие необычные спектральные особенности рассеяния света описываются моделью оптических неоднородностей воды, предложенной в [13]. На основании приведенных модельных расчетов и результатов экспериментов можно предположить, что рассеяния света в воде происходит не сразу на частицах, а через интерфейс возможных положений частиц — совокупность пространственных функций распределения. При этом анизотропия рассеяния формируется за счет форм-фактора элементов этого интерфейса. И те примеси, которые были бы неразличимы в случае статистически равновесного распределения во всем объеме, вносят вклад в рассеяние света.

Полученные результаты объясняют также следующий факт — малое разнообразие форм индикатрис рассеяния света естественной водой, несмотря на большое разнообразие примесей. При этом вероятность рассеяния назад в основном определяется показателем преломления примесей [16].

Финансирование

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-45-920048 «Новый подход в исследовании характеристик рассеяния света в полидисперсных водных суспензиях прибрежных акваторий с учетом физико-хи-

мических и структурных процессов» и частично в рамках государственного задания Тема 0555-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»).

Funding

The work was carried out within the framework of the RFBR grant No. 18-45-920048 “A new approach to the study of the characteristics of light scattering in polydisperse aqueous suspensions of coastal waters, taking into account physicochemical and structural processes” and partly within the framework of the state task theme No. 0555-2021-0003 “Development of methods operational oceanology based on interdisciplinary studies of the processes of formation and evolution of the marine environment and mathematical modeling with the use of data from remote and contact measurements” (code “Operational Oceanology”).

Литература

1. *Ван де Хюлст. Г.* Рассеяние света малыми частицами. Москва: ИЛ, 1961. 536 с.
2. *Копелевич О.В., Буренков В.И.* О нефелометрическом методе определения общего показателя рассеяния света морской водой // Известия АН СССР, ФАО. 1971. Т. 7. № 12. С. 1280–1289.
3. *Маньковский В.И.* О соотношении между интегральным показателем рассеяния света морской водой и показателем рассеяния в фиксированном направлении // Морские гидрофизические исследования. 1971. № 6 (56). С. 146–154.
4. *Jonasz M., Fournier G.R.* Light scattering by particles in water (Theoretical and experimental foundations). Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007. 704 p.
5. *Petzold T.J.* Volume scattering functions for selected ocean waters // SIO Ref. 72–78, Scripps Institute of Oceanography, San Diego, CA, 1972. 79 p.
6. *Morel A.* Interpretation des variations de la forme de l'indicatrice de diffusion de la lumière par les eaux de mer // Annals of Geophysics. 1965. Vol. 21, N2. P. 157–162.
7. *Копелевич О.В.* Малопараметрическая модель оптических свойств морской воды. Оптика океана. Т. 1. Физическая оптика океана. М.: Наука, 1983. С. 208–234.
8. *Voss K.J., Fry E.S.* Measurement of the Mueller matrix for ocean water // Applied Optics. 1984. Vol. 23. P. 4427–4439. doi:10.1364/AO.23.004427
9. *Бункин Н.Ф., Бункин Ф.В.* Бабстоны — стабильные микроскопические газовые пузырьки в сильно разбавленных растворах электролитов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1992. Т. 101, № 2. С. 512–527.
10. *Hampton M.A., Nguyen A.V.* Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force // Advances in Colloid Interface Science. 2010. Vol. 154, Iss. 1–2. P. 30–55. doi:10.1016/j.cis.2010.01.006
11. *Bunkin N.F. et al.* Formation and dynamics of ion-stabilized gas nanobubble phase in the bulk of aqueous NaCl solutions // The Journal of Physical Chemistry. B. 2016. Vol. 120. P. 1291–1303. doi:10.1021/acs.jpcc.5b11103
12. *Bunkin N.F. et al.* Nanobubble clusters of dissolved gas in aqueous solutions of electrolyte: I. Experimental proof // The Journal of Physical Chemistry. 2012. Vol. 137. P. 054706. doi:10.1063/1.4739528
13. *Шибанов Е.Б.* и др. Гипотеза о пространственном согласовании оптических неоднородностей воды и ее подтверждение в экспериментах по измерению рассеяния света // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 92, Вып. 10. С. 741–745.
14. *Шибанов Е.Б.* Влияние мелкодисперсной примеси на рассеяние света в «чистой» фильтрованной воде // Морской гидрофизический журнал 2008. № 2. С. 46–56.
15. *Lee M.E., Lewis M.* A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2003. N20. P. 563–571. doi:10.1175/1520-0426(2003)20<563: ANMFT-M>2.0.CO;2
16. *Boss E. et al.* The particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution // Journal of Geophysical Research. 2004. Vol. 109. C01014, doi:10.1029/2002JC001514

References

1. *Van de Hulst H.C.* Light scattering by small particles. New York: Dover, 1957. 470 p.
2. *Kopelevich O.V., Burenkov V.I.* About nephelometric method for retrieval of total light scattering by seawater. *Izvestiya AN SSSR, AOP.* 1971, 7, 12, 1280–1289 (In Russian).
3. *Man'kovskiy V.I.* The ratio between the integral light scattering if sea water and volume scattering function at solid angle.

- Morskiye Gidrofizicheskiye Issledovaniya*. 1971, 6(56), 146–154 (In Russian).
4. *Jonasz M., Fournier G.R.* Light scattering by particles in water (Theoretical and experimental foundations). Academic Press is an imprint of Elsevier, 2007. 704 p.
 5. *Petzold T.J.* Volume scattering functions for selected ocean waters. *SIO Ref.* 72–78, Scripps Institution of Oceanography, San Diego, 1972. 79 p.
 6. *Morel A.* Interpretation des variations de la forme de l'indicatrice de diffusion de la lumière par les eaux de mer. *Annals of Geophysics*. 1965, 21, 2, 157–162.
 7. *Kopelevich O.V.* Low parametrical model for optical properties of seawater. Ocean optics. Vol. 1. Physical optics of ocean. *M., Nauka*, 1983, 208–234 (In Russian).
 8. *Voss K.J., Fry E.S.* Measurement of the Mueller matrix for ocean water. *Applied Optics*. 1984, 23, 4427–4439. doi:10.1364/AO.23.004427
 9. *Bunkin N.F., Bunkin F.V.* Bubbles — stable microscopic gas bubbles in highly dilute electrolyte solutions. *Soviet Physics — JETP*. 1992, 101, 2, 512–527 (In Russian).
 10. *Hampton M.A., Nguyen A.V.* Nanobubbles and the nanobubble bridging capillary force. *Advances in Colloid Interface Science*. 2010, 154, 1–2, 30–55. doi:10.1016/j.cis.2010.01.006
 11. *Bunkin N.F. et al.* Formation and dynamics of ion-stabilized gas nanobubble phase in the bulk of aqueous NaCl solutions. *The Journal of Physical Chemistry*. B, 2016, 120, 1291–1303. doi:10.1021/acs.jpcc.5b11103
 12. *Bunkin N.F. et al.* Nanobubble clusters of dissolved gas in aqueous solutions of electrolyte: I. Experimental proof. *The Journal of Physical Chemistry*. 2012, 137, 054706. doi:10.1063/1.4739528
 13. *Shybanov E.B. et al.* Hypothesis of the spatial adjustment of optical inhomogeneities of water and its confirmation through experiments on measurements of light scattering. *JETP Letters*. 2010, 92, 10, 671–675. doi: 10.1134/S0021364010220078
 14. *Shybanov E.B.* Effect of finely divided admixtures on the scattering of light in “pure” filtered water. *Physical Oceanography*. 2008, 18, 2, 86–95. doi:10.1007/s11110-008-9012-8
 15. *Lee M.E., Lewis M.* A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2003, 20, 563–571. doi:10.1175/1520-0426(2003)20<563:ANMFTM>2.0.CO;2
 16. *Boss E. et al.* The particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution. *Journal of Geophysical Research*. 2004, 109, C01014. doi:10.1029/2002JC001514

Об авторах

ШИБАНОВ Евгений Борисович	Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22	ORCID ID: 0000-0001-7943-305X, WoS ResearcherID: ABB-9097-2021, Scopus AuthorID: 6507075380, elibrary AuthorID 854564. e-mail: e-shybanov@mail.ru
ЛИ Михаил Ен Гон	Доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом оптики и биофизики моря, главный научный сотрудник отдела оптики и биофизики моря, Морской гидрофизический институт РАН (299011, ул. Капитанская, д. 2, г. Севастополь, Россия), ROR 05961na22	Scopus AuthorID: 56142710400, elibrary AuthorID: 865650 e-mail: michael.lee.mhi@gmail.com