

## Влияние мелкодисперсной примеси на рассеяние света в «чистой» фильтрованной воде

Рассматривается проблема несоответствия теоретических и экспериментальных значений спектрально-углового показателя рассеяния «чистой» фильтрованной воды. Для объяснения противоречия выдвигается гипотеза о существовании двумерных пространственных корреляций положений мелкодисперсной взвеси в жидкости. Получены аналитические зависимости рассеяния света в приближении статистически-равновесного распределения частиц по поверхностям сфер, случайно расположенных в среде. Анализируются экспериментальные данные об угловом показателе рассеяния «чистой» фильтрованной воды (размеры частиц не превышают 0,2 мкм). Результаты расчетов по модели сферически-поверхностного распределения мелких частиц в воде качественно соответствуют спектрально-угловой функции рассеяния фильтрованной воды.

**Введение.** Угловой показатель рассеяния воды  $\beta(\theta, \lambda)$  – энергия, рассеянная в заданном направлении единицей объема жидкости, – важный гидрооптический параметр, определяющий особенности распространения света в водной среде. Задачей интерпретации измерений световых полей в море и выходящего из его толщи излучения является установление связи между спектральными свойствами рассеяния и микрофизическими характеристиками среды, такими как относительный показатель преломления взвешенных частиц и функция распределения частиц по размерам. Для морской воды характерно разнообразие типов взвешенных веществ: минеральные частицы (песок, глина, известковые и кремниевые останки планктона), частицы биологического происхождения (детрит, клетки фитопланктона), пузырьки воздуха. Несмотря на различия количественного и качественного состава частиц, графики измеренных показателей рассеяния в логарифмическом масштабе выглядят примерно одинаково. Если классифицировать совокупность экспериментальных индикатрис рассеяния (нормированных угловых показателей рассеяния), то их можно отнести к типу индикатрис рассеяния на оптически «мягких» частицах, т.е. на частицах с относительным показателем преломления, близким к единице. Характерными особенностями индикатрис рассеяния как экспериментальных, так и теоретических по модели оптически «мягких» частиц являются: 1) наличие сильного пика рассеяния вперед в окрестности  $0^\circ$ ; 2) плавное, монотонное поведение функции рассеяния в задней полусфере ( $90 - 180^\circ$ ); 3) малые значения вероятности рассеяния назад. Очевидно, что формальное определение микрофизических свойств рассеяния по индикатрисе рассеяния покажет наличие крупных частиц с относительным показателем преломления, близким к единице. Хотя разработанные в настоящее время различные способы интерпретации данных измерений функции рассеяния позволяют судить о характеристиках взвешенных частиц, однако для решения обратной задачи используется информация не о подробной угловой

структуре показателя рассеяния, а о его интегральной характеристике – вероятности рассеяния назад [1]. Результаты эксперимента и теоретического подхода к рассеянию света в воде как к объемному свойству среды<sup>1</sup> становятся сопоставимыми только в случае, если перейти к отношению угловых показателей рассеяния  $\beta(\theta, \lambda) / \beta(\theta, \lambda_0)$  [2].

При интерпретации нефелометрических измерений особо чистых естественных и искусственных вод теория рассеяния, построенная на предположении о равновесном некоррелированном расположении рассеивающих частиц в жидкости<sup>2</sup>, сталкивается с принципиальными трудностями. С точки зрения теоретического приближения о взаимно независимом рассеянии на частицах увеличение анизотропии рассеяния в более чистых водах принято объяснять присутствием крупных частиц биологического происхождения для вод Мирового океана, а для очищенной пресной воды – загрязнением при наполнении измерительной камеры прибора. Авторами работы [4] был проведен анализ временного хода показателя рассеяния при условии постоянной промывки нефелометра фильтрованной водой в течение 6 ч. Использовалась вода, очищенная от взвеси с помощью фильтров с диаметром пор  $d = 0,2$  мкм. Было показано, что хотя со временем рассеяние уменьшалось во всем диапазоне углов, анизотропия рассеяния усиливалась. Обнаруженная закономерность не объясняется предположением об основном вкладе крупных частиц в рассеяние света в области малых углов в «чистой» воде. Рост анизотропии рассеяния с уменьшением показателя рассеяния пресной воды согласуется с аналогичной тенденцией, наблюдаемой в чистых океанских водах при увеличении их прозрачности [5]. По мнению Копелевича, теоретически этот эффект может объясняться присутствием крупных частиц с показателем преломления, близким к единице; иными словами, электромагнитные свойства частиц незначительно отличаются от электромагнитных свойств воды. Следует заметить, что поскольку в дальнейшем упомянутые гипотетические частицы не были идентифицированы альтернативными методами (например фильтрацией), то их физико-химические свойства также слабо отличаются от свойств воды. Иными словами, это и есть сама вода.

**Влияние согласованного пространственного распределения частиц на рассеяние света.** Для объяснения оптического феномена рассеяния в «чистых» водах автором выдвигается гипотеза об особом, специфическом характере распределения частиц взвеси в водной среде. Пусть частицы в заданный момент времени  $t$  могут находиться в подпространстве  $V_1(t)$ , в каждой точке которого вероятность нахождения частицы строго больше нуля,

<sup>1</sup> В зарубежной терминологии используется понятие объемная функция рассеяния, которое применительно к воде, с точки зрения автора, является неудачным, поскольку фактически постулирует независимость рассеяния от эффектов более низкой размерности. В качестве подтверждения значительности влияния необъемных неоднородностей можно привести пример оптического стекла, причина рассеяния в котором – линейные дефекты, или свили, а свильность стекол – одна из основных характеристик их качества.

<sup>2</sup> Вследствие химической нестабильности чистого вещества процесс его загрязнения, в частности по мнению российского академика Третьякова [3], считается неравновесным.

причем размерность подпространства  $V_1(t)$  не совпадает с размерностью полного трехмерного пространства  $V$ . В остальных точках пространства  $V - V_1(t)$  вероятность нахождения частицы строго равна нулю. Поскольку  $V_1(t)$  – функция времени, то условие эргодичности не соблюдается. Для выполнения условия объемной однородности среды требуется, чтобы размерность подпространства  $V_1(t)$  была меньше трех<sup>3</sup>. Предположим, что в подмножестве  $V_2(t) \in V_1(t)$  статистическое распределение частиц подчиняется равновесному распределению Пуассона. Равновесность распределения означает равную вероятность нахождения частицы в любой точке  $p \in V_2(t)$  независимо от положений других частиц. Вследствие этого отклонение числа частиц  $\Delta n_i^p$  фракции  $i$  в  $\epsilon$ -окрестности точки  $p$  от среднего значения  $\overline{n_i^p} = \overline{n_i}$  удовлетворяет условию

$$\overline{\Delta n_i^p \Delta n_j^q} = \delta_{ij} \delta_{pq} \overline{n_i}, \quad (1)$$

где  $\delta_{ij}, \delta_{pq}$  – символы Кронекера. Пусть  $A_i(\theta, kl_p)$  – амплитуда рассеяния частицы  $i$ -й фракции как функция угла  $\theta$ , зависящая от волнового числа  $k$  и расстояния  $l_p$  от источника до приемника через центр рассеяния. Интенсивность рассеяния совокупности частиц есть результат осреднения квадрата амплитуды:

$$I(\theta) = \left[ \sum_i \sum_p A_i(\theta, kl_p) (\overline{n_i} + \Delta n_i^p) \right]^2. \quad (2)$$

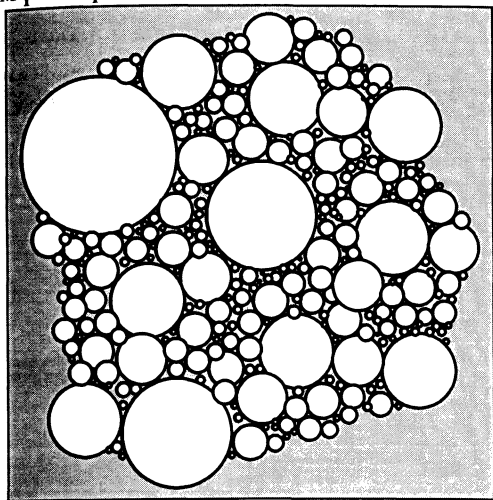
Вследствие определения  $\overline{\Delta n_i^p} = 0$  и условия (1) результат осреднения формулы (2) будет выражаться в виде суммы двух слагаемых:

$$I(\theta) = \sum_i \sum_p A_i^2(\theta, kl_p) \overline{n_i} + \left[ \sum_i \sum_p A_i(\theta, kl_p) \overline{n_i} \right]^2. \quad (3)$$

Первое слагаемое есть классическое выражение для интенсивности рассеяния случайно распределенных частиц  $I(\theta) = \sum_i I_i(\theta) N_i$  при  $l \gg \lambda$ , где  $N_i$  – объемная концентрация частиц  $i$ -й фракции, а  $I_i(\theta)$  – соответствующая интенсивность рассеяния. Второе слагаемое, описывающее эффект пространственной

<sup>3</sup> Автор статьи различает понятия пространственной и объемной однородности. Объемная однородность есть категория теории сплошных сред. Для того чтобы говорить о средней величине в малом объеме случайно-неоднородной среды, необходимо рассматривать поведение достаточно большого количества молекул. Если в плотной среде существуют структурные особенности фрактальной размерности, то, естественно, при объемном осреднении структурные особенности теряются.

корреляции частиц, выражает квадрат средней амплитуды рассеяния. Для его численной оценки необходимо провести суммирование амплитуд рассеяния с учетом фазового множителя  $e^{ikl}$ . Второй член может быть существенно больше первого, поскольку при наличии пространственной корреляции интенсивность рассеяния зависит от числа частиц по квадратичному закону. Максимальное относительное влияние пространственных корреляций на рассеивающие свойства среды будет наблюдаться в случае наличия мелких частиц, так как их численная концентрация сильно увеличивается с уменьшением размера.



Р и с. 1. Аппроксимация подпространства объема жидкости, где в фиксированный момент времени может находиться частица, системой сферических поверхностей

В качестве начального приближения аппроксимируем подпространство  $V_1(t)$ , т.е. геометрическое место точек, где может находиться частица, системой сферических поверхностей с конкретным законом распределения по радиусу (см. рис. 1). Из анализа рис. 1 становится понятно, что система шаров не является математически плотной в трехмерном пространстве. Вид и степень упаковки характеризуют структурное состояние среды. Следовательно, функция распределения сферических поверхностей по размерам должна зависеть от физико-химических свойств среды. Назовем трехмерную односвязную область минимально возможного объема, содержащего пространственно

скоррелированную совокупность отдельных частиц, квазичастицей. Смысл выделения области с повышенной корреляцией примесей состоит в том, чтобы перейти от сложной процедуры сложения амплитуд рассеяния реальных частиц к сложению интенсивностей рассеяния квазичастиц. Другими словами, задача расчета рассеяния света на всех частицах, находящихся в подпространстве  $V_1(t)$ , сводится к расчету рассеяния на отдельной квазичастице. В рассматриваемом примере двумерных пространственных корреляций квазичастица представляет собой шар радиусом  $a$  с показателем преломления, равным показателю преломления среды, на поверхности которого находятся реальные частицы. Случайный характер распределения частиц в подпространстве  $V_1(t)$  учитывается первым слагаемым формулы (3). Поэтому интенсивность рассеяния, обусловленного пространственными корреляциями, будет выражаться в виде суммы рассеяния на полых сферах с однородной, оптически тонкой оболочкой. Поскольку число частиц в единице объема мало, то падающее поле в любой точке квазичастицы будет одинаковым с высокой точностью. Таким образом, метод вычисления амплитудной матрицы рассеяния квазичастицы аналогичен приближению Релея – Ганса [6].

Сферически расходящаяся рассеянная элементом объема  $\Delta V$  волна выражается через параллельную и перпендикулярную компоненты падающей поперечной волны  $E_{\parallel}, E_{\perp}$ :

$$\begin{pmatrix} \Delta E_{\parallel} \\ \Delta E_{\perp} \end{pmatrix} = \frac{e^{ik(r-z)}}{-ikr} e^{i\delta} p(\xi) \Delta V \begin{pmatrix} S_2 & 0 \\ 0 & S_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $r$  – расстояние от центра квазичастицы до приемника,  $z$  – расстояние от источника до центра квазичастицы,  $\delta$  – разность фазы в точке  $\xi$  относительно центра квазичастицы,  $p$  – вероятность нахождения частицы в точке  $\xi$ . В отличие от теории Релея – Ганса под элементами амплитудной матрицы рассеяния  $S_1, S_2$  будет пониматься средняя амплитуда рассеяния одной частицы из ансамбля частиц, т.е.  $\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_i S_i$ . Используя понятие форм-фактор

$$f(\theta, \varphi) = \frac{1}{n} \int_V p(v) e^{i\delta} dv \quad (5)$$

как функцию зенитного  $\theta$  и азимутального  $\varphi$  углов, запишем результаты интегрирования по объему квазичастицы в виде

$$\begin{pmatrix} E_{\parallel}^q \\ E_{\perp}^q \end{pmatrix} = \frac{e^{ik(r-z)}}{-ikr} n f(\theta, \varphi) \begin{pmatrix} \bar{S}_2 & 0 \\ 0 & \bar{S}_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{\parallel} \\ E_{\perp} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Формула (6) отличается от выражения для амплитуды рассеяния одной частицы множителем  $n f(\theta, \varphi)$ , причем  $n$  не обязательно целое и определяется из условия  $n = \int_V p(v) dv$ . Для любой области интегрирования, соответствующей квазичастице,  $f(0) \equiv 1$ , в чем и состоит удобство этого понятия.

Форм-фактор однородного шара

$$f(\theta) = \frac{3}{u^3} (\sin u - u \cos u), \quad u = 2x \sin \frac{\theta}{2}, \quad (7)$$

где  $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$  – параметр дифракции квазичастицы. Вычислив производную по радиусу от произведения функции (7) на объем шара и разделив результат на площадь поверхности, получим выражение для форм-фактора полого шара:

$$f(\theta) = \frac{1}{4\pi a^2} \frac{\partial}{\partial a} \left[ \frac{4}{3} \pi a^3 \frac{3}{u^3} (\sin u - u \cos u) \right] = \frac{\sin \left[ 2x \sin \frac{\theta}{2} \right]}{2x \sin \frac{\theta}{2}}. \quad (8)$$

Рассмотрим некоторые особенности спектрально-углового характера рассеяния на квазичастицах. Интенсивность рассеяния неполяризованного света в дальней зоне на расстоянии  $r$  от квазичастицы

$$I(\theta, \lambda, r) = \frac{1}{k^2 r^2} \frac{\sin^2 \left[ 2x \sin \frac{\theta}{2} \right]}{\left[ 2x \sin \frac{\theta}{2} \right]^2} M^2(a) \frac{|\bar{S}_1(\lambda)|^2 + |\bar{S}_2(\lambda)|^2}{2}, \quad (9)$$

где  $M(a) = 4\pi a^2 C(a)$  – математическое ожидание расположения реальной частицы на сферической поверхности радиуса  $a$  при поверхностной концентрации  $C(a)$ . Как видно из (9), для больших значений параметра  $u = \frac{4\pi a}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2}$  спектрально-угловой закон рассеяния имеет вид:

$$I(\theta, \lambda) \sim \frac{\lambda^4}{\sin^2 \theta / 2} \left( |\bar{S}_1(\theta, \lambda)|^2 + |\bar{S}_2(\theta, \lambda)|^2 \right), \quad (10)$$

а при малом значении –

$$I(\theta, \lambda) \sim \lambda^2 \left( |\bar{S}_1(\theta, \lambda)|^2 + |\bar{S}_2(\theta, \lambda)|^2 \right). \quad (11)$$

В приближении Релея – Ганса (т. е. если  $m - 1 \ll 1$  и размер реальных частиц много меньше длины волны) комплексные амплитуды рассеяния равны:  $S_1 = -\frac{2}{3}ix^3(m-1)$ ,  $S_2 = -\frac{2}{3}ix^3(m-1)\cos\theta$ , где  $m$  – относительный показатель преломления. Тогда выражению (10) соответствует спектральный закон рассеяния  $\lambda^{-2}$ , а выражению (11) – закон  $\lambda^{-4}$ .

Отличие структуры выражения (9) от формул теории рассеяния на изолированной частице состоит в наличии множителя  $\sin^2 u / u^2$ . Свойство мультипликативности эффекта пространственных корреляций частиц объясняет причину соответствия модельных и экспериментальных индикатрис рассеяния морской воды при переходе к относительным величинам  $\beta(\theta, \lambda) / \beta(\theta, \lambda_0)$ . Множитель  $\sin^2 u(\theta) / u^2(\theta)$ , имеющий осцилляционную структуру, аппроксимируется функциональной зависимостью

$$f(\lambda, \theta) = \frac{1}{2} \left[ 2x \sin \frac{\theta}{2} \right]^{-2} \quad (12)$$

от угла рассеяния  $\theta$ , как только  $2x \sin \frac{\theta}{2} > \frac{\pi}{4}$ . Следовательно, начиная с определенных углов рассеяния  $\theta_1$ , результаты интегрирования интенсивности рассеяния по функции распределения квазичастиц от

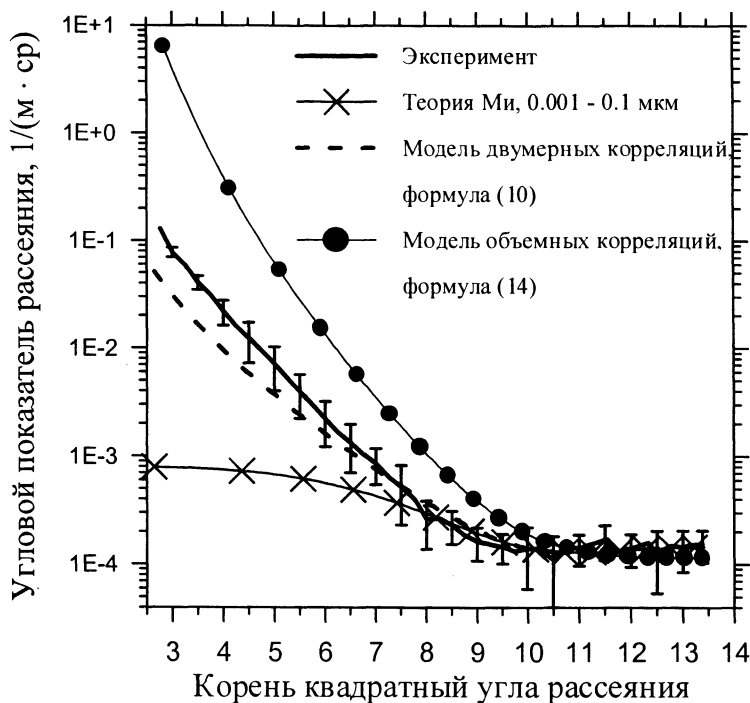
$$a_{\min} > a_1 \approx \frac{\lambda}{16 \sin[\theta_1/2]} \quad (13)$$

до  $a_{\max} \gg a_{\min}$  не будут существенно отличаться от результата умножения на множитель (12).

**Проявление эффектов пространственных корреляций частиц в экспериментах по измерению рассеяния света в «чистой» фильтрованной воде.** Проанализируем спектральные и угловые особенности рассеяния «чистой» фильтрованной воды, наблюдаемые в эксперименте. Диаметр пор фильтра составляет 0,2 мкм, что является стандартным размером при приготовлении чистой воды, используемой для промывки кювет оптических приборов и калибровки измерителей показателя ослабления. Вода проходила дополнительную очистку методом обратного осмоса. Измерения показателя рассеяния выполнены многоспектральным измерителем объемной функции рассеяния (*MVSM*), изготовленным в рамках совместного Украинско-Американского международного проекта Украинского научно-технологического центра. Описание принципа работы нефелометра опубликовано в [7]. Использование специальной перископической призмы, помещенной в измерительную светозащитную камеру, позволяет измерять рассеяние во всем диапазоне углов. Уровень паразитных засветок, обусловленных отражением света источника от оптических поверхностей, пренебрежимо мал, если призма не находится в зоне прямого света и не направлена на иллюминатор. Этому условию соответствует диапазон углов от 7°. На рис. 2 показан результат осреднения данных измерений углового показателя рассеяния на длине волны 0,443 мкм, за вычетом молекулярного рассеяния. Экспериментальная кривая построена на основе 8 серий измерений для трех различных образцов воды. Расчет показателя рассеяния полидисперсной взвеси выполнен по алгоритму теории Ми для полидисперсной минеральной взвеси ( $m = 1,17$ ). Радиусы частиц изменялись по закону Юнге с показателем степени  $\gamma = 4$  в интервале от 0,001 до 0,1 мкм. Вследствие резкого уменьшения эффективности рассеяния мелкими частицами изменение минимального размера не сказывается на результатах расчетов. Выбор показателя преломления обусловлен тем обстоятельством, что в моделях оптических свойств природных вод минеральная взвесь считается мелкодисперсной фракцией взвешенных частиц. Заметим, что изменения в разумных пределах параметров модели  $m$  или  $\gamma$  незначительно повлияют на индикатрису рассеяния. Например, при  $\gamma = 3$  рассеяние в окрестности 0° возрастает только на 10%, а при  $m = 1,02$  даже уменьшается.

Из результатов сравнения кривых, приведенных на рис. 2, становится очевидной несостоятельность предположения о пространственно-равномерном распределении мелких частиц в воде. В области 30°, т.е. на границе диапазона, для которого теория термодинамических флуктуаций для

чистой воды<sup>4</sup> была экспериментально подтверждена Морелем [8], общепринятое приближение объясняет только 15% регистрируемого сигнала. Соответственно в окрестности 9° этот процент уменьшается до единицы. Иными словами, для чистых вод в интервале углов от 0° до примерно 50° нельзя пользоваться приближением о случайном распределении частиц в воде.



Р и с. 2. Сравнение экспериментальных данных об угловом показателе рассеяния фильтрованной воды на длине волны 0,443 мкм с результатами, полученными по различным моделям пространственного распределения частиц в воде (вертикальные отрезки – доверительные интервалы)

Выше было показано, что интегрирование по распределению квазичастиц можно заменить умножением на коэффициент, выражаемый формулой (12), если выполняется условие (13). Следует отметить, что размер квазичастиц, рассматриваемых как шар с тонкой оболочкой, должен быть много большим диаметра самих частиц, то есть  $a_{\min} \gg 0,2$ . Кроме того, квазичастицы с размером, меньшим длины волны, не оказывают влияния на рассеяние в области малых углов. Поэтому для описания эффекта двумерных корреляций в диапа-

<sup>4</sup> Специфика эксперимента состояла в обеспечении максимальной степени очистки воды и исключении влияния всевозможных источников загрязнения путем использования специальных материалов. Тем не менее кривая показателя рассеяния приведена не для всего углового диапазона, а для интервала углов от 30 до 150°. За последние 40 лет не появилось ни одного подтверждения теории Эйнштейна – Смолуховского для углов рассеяния, меньших 30°. В действительности же требование высокой химической чистоты в экспериментах с «чистой» водой доказывает неаддитивность оптических свойств чистой воды и примесей при их малых концентрациях.



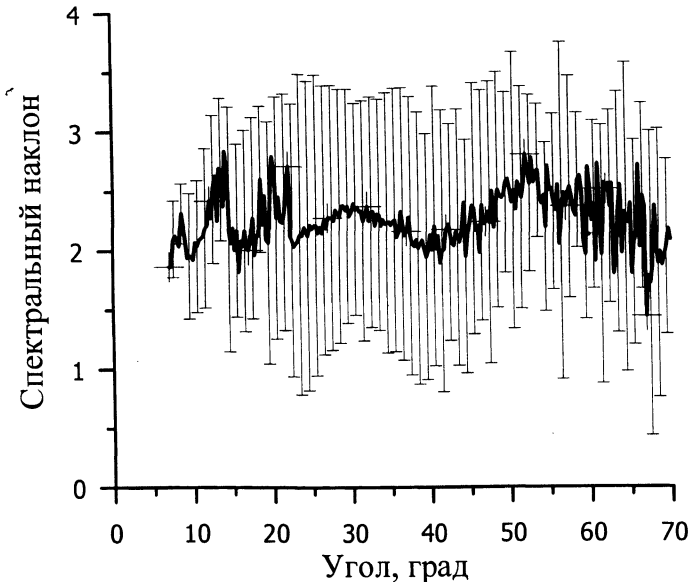
зоне углов от 7 до 180° будем пользоваться  $\overline{S_1(\lambda)}$ ,  $\overline{S_2(\lambda)}$  полученны путем численного интегрирования формул Ми по функции распределения Юнге. Как видно из рис. 2, выражение (10) качественно правильно передает угловую структуру экспериментальной функции рассеяния. Причину неидеального совпадения кривых в области малых углов следует искать в несовершенстве модели, в которой предполагается двумерная размерность пространственных корреляций частиц в воде и сферичность формы квазичастиц.

Если в «чистой» воде наблюдается агрегация мелкодисперсной взвеси, то соответствующей моделью будут сферические квазичастицы с распределением взвеси по всему объему шара. Форм-фактор однородного шара определяется формулой (7). При  $u \gg 1$  зависимость, описывающая оптический эффект объемных корреляций, имеет вид

$$I_3(\theta, \lambda) \sim \frac{\lambda^6}{\sin^4 \theta / 2} \left( |\overline{S_1(\theta, \lambda)}|^2 + |\overline{S_2(\theta, \lambda)}|^2 \right). \quad (14)$$

Соответствующая формуле (14) кривая существенно более вытянутая, чем кривая экспериментального углового показателя рассеяния.

Очевидное несоответствие предположения о равновесности распределений примесей экспериментам по измерению рассеяния принято объяснять неизбежным загрязнением чистой воды крупными частицами. Покажем, что такое предположение противоречиво, основываясь на анализе спектральных свойств углового показателя рассеяния. На рис. 3 построен спектральный наклон  $\alpha$  показателя рассеяния  $\beta(\theta, \lambda) \sim \lambda^{-\alpha}$  фильтрованной воды, вычисленный для каждого угла по 8 спектральным каналам в диапазоне от 0,443 до 620 мкм.



Р и с. 3. Спектральный наклон углового показателя рассеяния фильтрованной воды как функция угла рассеяния (вертикальные отрезки – доверительные интервалы)

Высокие значения доверительного интервала свидетельствуют о нестабильности оптических свойств «чистой» воды. Спектральный наклон по формуле (10) в интервале углов  $10 - 60^\circ$  меняется от 2 до 1,9. В модели крупных агрегированных частиц формула (14) дает значение, близкое к нулю, а теория Ми для мелких частиц – от 4 до 3,4. Из рис. 3 видно, что модель двумерных корреляций лучше всего соответствует экспериментальным данным. Если бы в воде действительно присутствовали реальные крупные частицы, то спектральный наклон в области малых углов был бы близок к нулю. Наличие фракции частиц с широким распределением по размерам приводило бы к значениям параметра наклона  $\alpha$ , близким к  $\gamma - 3$ , где  $\gamma$  – показатель степенного закона распределения частиц по размерам. Чтобы объяснить наблюдаемый спектральный наклон, необходимо увеличить долю мелких, а не крупных частиц, полагая что  $\gamma \approx 5$ , тогда как типичное значение  $\gamma = 4$ . Таким образом, существующий подход не в состоянии объяснить одновременно спектральные и угловые особенности рассеяния света в «чистой» воде.

**Основные выводы.** Проведенный теоретический анализ и сравнение полученных аналитических зависимостей с экспериментальными данными по показателю рассеяния света в «чистой» фильтрованной воде показывают, что:

– спектральные свойства рассеяния оптически чистых вод не могут быть объяснены в рамках классического приближения о пространственно-равномерном распределении взвеси;

– для правильной интерпретации данных измерения спектрально-угловых свойств рассеяния воды необходимо учитывать пространственные корреляции распределения мелких частиц в среде.

Гипотеза о существовании пространственных корреляций частиц позволяет объяснить сильную анизотропию рассеяния в водной среде и высокую селективность рассеяния в чистых водах Мирового океана. В качестве начального приближения пространственного распределения частиц в водной среде предложена модель сферических квазичастиц, на поверхностях которых располагаются мелкие частицы. В отличие от традиционного линейного закона формулы модели содержат квадратичную зависимость рассеяния от концентрации взвеси. Такая нелинейность дает объяснение принципиальным трудностям использования чистой воды в качестве эталона рассеяния. Результаты расчетов по модели качественно соответствуют экспериментальным данным об угловом показателе рассеяния для фильтрованной пресной воды с размерами пор фильтра менее  $0,2 \text{ мкм}$  в интервале углов от  $7$  до  $177^\circ$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Twardowski M.S., Boss E., Macdonald J.B. et al.* A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, № C7. – P. 14129 – 14142.
2. *Chami M., Shybanov E.B., Khomenko G.A. et al.* Spectral variation of the volume scattering function measured over the full range of scattering angles in a coastal environment // *Appl Opt.* – 2006. – 45, № 15. – P. 3605 – 3619.

3. *Третьяков Ю.Д.* Процессы самоорганизации в химии материалов // Успехи химии. – 2003. – 72, №8. – С. 731 – 762.
4. *Shybanov E.B., Lee M.E.* Distinctive features of light scattering in pure waters // Proceed. of Optics of Natural Waters ONW-2003, St.Petersburg. – 2003. – P. 297 – 301.
5. *Kopelevich O.V.* The current low-parametric models of seawater optical properties // Proceed. of Int. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters». – St.Petersburg. – 2001. – P. 18 – 23.
6. *Борен К.Ф., Хафмен Д.Р.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 660 с.
7. *Lee M., Lewis M.* A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean // J. Atmos. Ocean. Tech. – 2003. – № 20. – P. 563 – 571.
8. *Morel A.* Etude experimentale de la diffusion de la lumiere par l'eau, les solution de chlorure de sodium et l'eau de mer optiquement pures // J. Chim. Phys. – 1966. – № 10. – P. 1359 – 1366.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,  
Севастополь

Материал поступил  
в редакцию 19.09.06  
После доработки 19.10.06

**ABSTRACT** Problem of inconsistency between the theoretical predictions and the experimental data of the angular-spectral shape of the volume scattering function in the filtered fresh «pure» water (nanopure water) is considered. To explain the contradiction, the hypothesis of two-dimensional spatial correlation of locations of fine-dispersed suspension in fluid is proposed. The analytical solutions for light scattering are obtained in approximation of statistically equilibrium particle distribution on the surfaces of randomly distributed spheres. The volume scattering functions of nanopure water (particle size is less than 0.2 micron) are analyzed. The model calculations of spherical quasi-particles with the distribution of small particles on the surfaces are in consistency with the experimental data of the volume scattering functions in the filtered fresh water.