

Возможности метода интегральной индикатрисы светорассеяния для определения показателя преломления вещества больших оптически мягких сферических частиц

Н. В. ШЕПЕЛЕВИЧ

Учреждение Российской академии наук

Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия

e-mail: jet@icm.krasn.ru

Выявлена связь интегральной индикатрисы светорассеяния больших оптически мягких непоглощающих сферических частиц с показателем преломления их вещества. Предложен способ определения показателя преломления вещества взвесей частиц.

Ключевые слова: интегральная индикатриса светорассеяния, показатель преломления, приближение Релея—Ганса—Дебая, теория Ми.

Введение

Интегральная индикатриса светорассеяния $F(\theta_0)$ представляет собой долю потока, рассеянного в конус с углом раствора $2\theta_0$, ко всему потоку рассеянной энергии. В работе [1] показано, что в приближении Релея—Ганса—Дебая (РГД) интегральная индикатриса светорассеяния однородного шара инвариантна в координатах $\rho\theta_0$ (здесь $\rho = 2\pi a/\lambda$, a — радиус сферического рассеивателя, λ — длина волны зондирующего излучения в дисперсионной среде). В [1] развит теоретический метод определения среднего размера клеток по половинному уровню рассеяния, который наблюдается при $\rho\theta_0 = 1.75$, а в [2] предложен способ практической реализации метода интегральной индикатрисы.

В естественных условиях большинство частиц биологического происхождения находятся в среде с показателем преломления, близким к показателю преломления вещества рассеивателей. Таким образом, для диапазона длин волн (обычно видимая область), при котором поглощение биологических клеток пренебрежимо мало, относительный показатель преломления m ($m = m_p/m_0$, m_p — показатель преломления вещества частиц, m_0 — показатель преломления дисперсионной среды) близок к 1. О таких частицах принято говорить как об оптически мягких.

В литературе имеются данные о вариациях относительного показателя преломления вещества многих биологических объектов. Так, в работе [3] с помощью метода фазово-контрастной микроскопии измерены показатели преломления вещества одиночных биологических частиц (фибробласт L929). При этом среднее значение показателя преломления составило $m_p \approx 1.42$ ($m \approx 1.07$, $m_0 = 1.33$). Для клеток крови в водной среде относительный показатель преломления изменяется в пределах $1.01 < m < 1.08$ [4].

Более полную информацию о значениях показателя преломления вещества биологических частиц можно найти в работах [1, 5, 6].

При анализе составляющих взвеси наряду с размером и показателем преломления необходима также информация о концентрации частиц. Действительно, фиксируемое прибором значение оптической плотности по рассеянию D (в случае однократного рассеяния) определяется как

$$D = N\sigma = N\pi a^2 K_p, \quad (1)$$

где $N = c \cdot l$, c — концентрация частиц, l — длина кюветы; σ — коэффициент рассеяния одной частицы, K_p — фактор эффективности рассеяния, который в случае больших оптически мягких шаров связан с относительным показателем преломления вещества и размером частиц выражением [7]

$$K_p(\Delta) = 2 - 4 \frac{\sin \Delta}{\Delta} + 4 \frac{1 - \cos \Delta}{\Delta^2}, \quad (2)$$

где $\Delta = 2\rho|m - 1|$.

При решении обратной оптической задачи необходима априорная информация о концентрации частиц. Обычно концентрацию взвеси находят альтернативными способами, например, по содержанию углерода, азота, хлорофилла “а” [8], а затем с использованием (1), (2) можно восстановить и значение показателя преломления. Однако следует отметить, что такие методы лишь косвенно позволяют оценить концентрацию (биомассу) биологических объектов, так как содержание той или иной составляющей вещества частиц значительно варьирует в зависимости от факторов внешней среды [9].

Цель настоящей работы — теоретическое исследование возможностей определения показателя преломления вещества частиц по значениям интегральной индикатрисы светорассеяния без привлечения альтернативных измерений.

1. Связь показателя преломления вещества частиц с интегральной индикатрисой светорассеяния

В работе [10] было показано, что для случая больших сферических частиц в приближении РГД интегральная индикатриса принимает вид

$$F(\rho\theta_0) = 1 - \frac{1}{2(\rho\theta_0)^2} K_p(2\rho\theta_0), \quad (3)$$

где $K_p(2\rho\theta_0)$ совпадает по форме с известной формулой Хюльста для $K_p(\Delta)$ (2). Таким образом, можно получить опосредованную связь между относительным показателем преломления и интегральной индикатрисой. Действительно, при заданном значении Δ из вида уравнения (3) следует, что график функции

$$1 - \frac{1}{2(\rho\theta_0)^2} K_p(\Delta) \quad (4)$$

должен пересекаться с кривой интегральной индикатрисы (3) в точке θ_m , где выполняется условие

$$2\rho\theta_0 = 2\rho|m - 1|, \text{ или } \theta_0 = \theta_m = |m - 1|. \quad (5)$$

Для проверки этого результата все дальнейшие вычисления выполнялись на основе точной теории светорассеяния на шаре — теории Ми. При этом интенсивность светорассеяния вычислялась по алгоритму, предложенному в [11], погрешность вычислений значений интегральной индикатрисы $F(\theta_0)$ составляла не более 0.1 %.

На рис. 1 представлены расчеты по проверке (5) для нескольких значений ρ и m (здесь также представлен результат (8), обсуждение которого рассмотрено в следующем разделе). Очевидно, что для фазовых сдвигов $\Delta < 3-4$ кривая (4) действительно пересекает соответствующую ми-кривую интегральной индикатрисы в точке θ_m или близкой к ней. Здесь следует отметить ряд особенностей. Из рис. 1, в видно, что точек пересечения кривых (3) и (4) нет. Это объясняется тем, что представление K_p в виде (2) является предельным при $m \rightarrow 1$. Действительное значение K_p более сложным образом зависит от ρ и m [12]. В частности, при заданном значении Δ наблюдается систематическое увеличение K_p при возрастании m . При этом максимальные отклонения K_p от (2) наблюдаются в области первого максимума кривой фактора эффективности ($\Delta \approx 4$). Вышесказанное и приводит к уменьшению значений (4), рассчитанных по теории Ми. Однако при $\Delta \approx 4$ ми-кривая интегральной индикатрисы F существенно отклоняется от кривой (3), в результате чего условие (5) выполняется достаточно точно.

Отмеченным поведением K_p объясняется и отклонение точки пересечения ми-кривых F и (4) от условия (5), продемонстрированное на рис. 1, г. Укажем также, что на

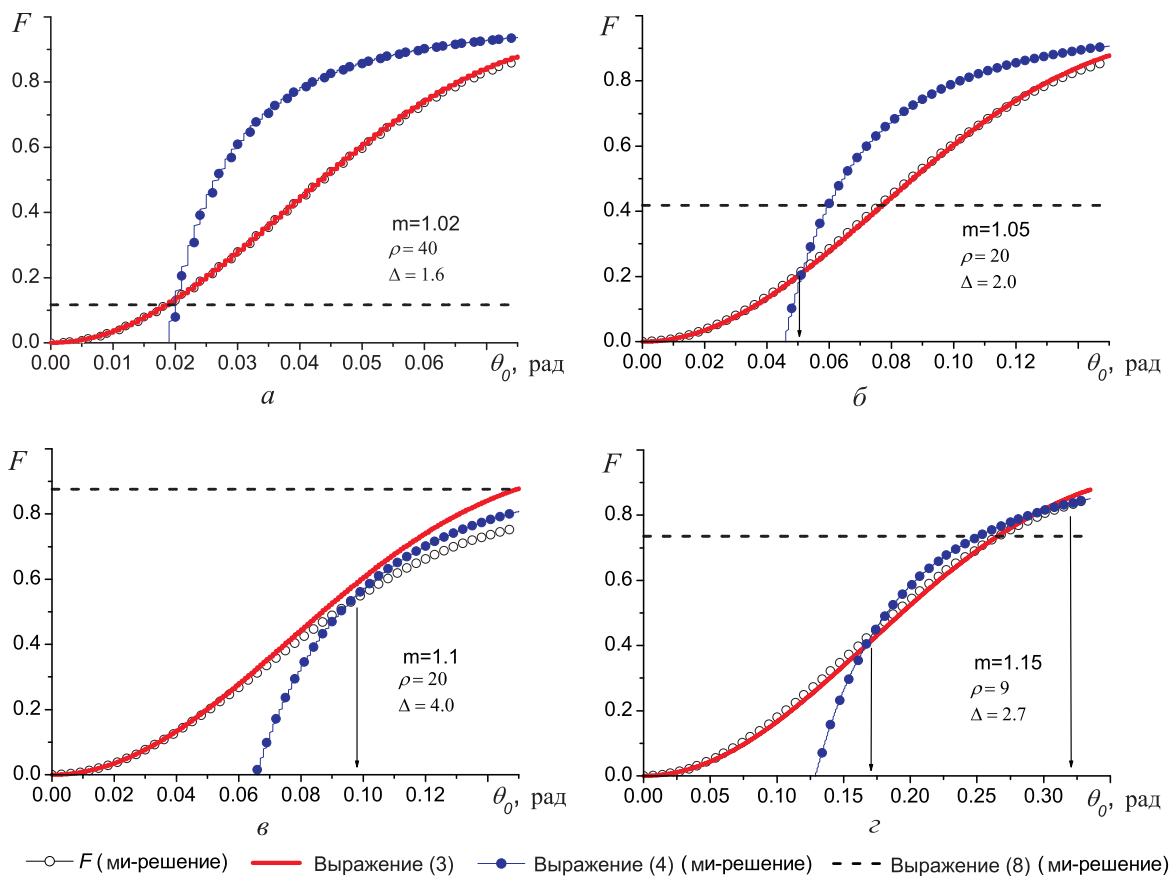


Рис. 1. Зависимость совместного решения (4) и выражения для интегральной индикатрисы однородного шара, рассчитанных по теории Ми, от значений относительного показателя преломления m ($\Delta \leq 4$)

этом рисунке точек пересечения ми-кривых F и (4) две. Их абсциссы соответствуют показателям преломления при одном и том же ρ , для которых значения K_p одинаковы и находятся по разные стороны от первого максимума кривой фактора эффективности светорассеяния. При этом первое значение m , как видно из рис. 1, *з*, завышается в силу вышесказанных причин, а второе соответственно занижается.

Резюмируя, можно сделать следующие выводы. Во-первых, совместное использование (4) и ми-решения позволяет установить опосредованную связь относительного показателя преломления с интегральной индикатрисой оптически мягких сферических частиц в широких пределах изменения их размеров (вплоть до $\Delta = 4$). Во-вторых, положение точки пересечения ми-кривых $F(\theta_0)$ и (4) в угловой разверстке не зависит от ρ и практически удовлетворяет условию (5), т. е. для диапазона $1.01 \leq \theta_0 \leq 1.15$ рабочей областью для определения относительного показателя преломления будут являться углы $\theta_0 \approx 0.01-0.15$ рад (или $\theta_0 \approx 0.6-10^\circ$). В-третьих, с увеличением m значения K_p , вычисленные по теории Ми, более заметно отличаются от (2), что приводит к небольшому систематическому отклонению совместного решения $F(\theta_0)$ и (4) от условия (5) в сторону больших углов.

2. К возможности определения показателя преломления вещества частиц по интегральной индикатрисе светорассеяния

Для больших ($\rho \gg 1$) оптически мягких шаров в области РГД поток рассеянного в заднюю полусферу углов рассеяния излучения [7]

$$D_b = N|m - 1|^2(1 - \ln 2)\pi a^2. \quad (6)$$

Тогда из отношения всего рассеянного потока (1) к потоку, рассеянному в заднюю полусферу углов рассеяния (6),

$$\frac{D}{D_b} = \frac{|m - 1|^2(1 - \ln 2)}{K_p} \quad (7)$$

можно найти значение $K_p/|m - 1|^2$ и с учетом (5) получить, что в точке пересечения интегральной индикатрисы с кривой (4) ордината составляет величину

$$\nu = 1 - \frac{1 - \ln 2}{2\rho^2} \cdot \frac{D}{D_b}. \quad (8)$$

Отношение D/D_b не зависит от концентрации частиц и определяется экспериментально. Значение ρ легко найти по половинному уровню рассеяния.

На рис. 1 горизонтальные штриховые линии соответствуют значениям ν , рассчитанным по теории Ми. Очевидно, что лишь для графика 1, *а* наблюдается пересечение интегральной индикатрисы с ми-кривой в точке θ_m .

Для выяснения границ применимости вышеуказанного подхода были просчитаны значения угла $\theta_0 = \theta_\nu$ (при котором $F(\theta_\nu) = \nu$) в диапазоне изменений показателя преломления $1.01 \leq m \leq 1.2$ при размере частиц от $\rho = 6$ на нижней границе до ограниченного максимальным значением $\Delta = 5$. Результаты расчетов представлены на рис. 2. На рис. 2, *а* показан наиболее интересный участок ($m \leq 1.05$), на котором возможно определение m .

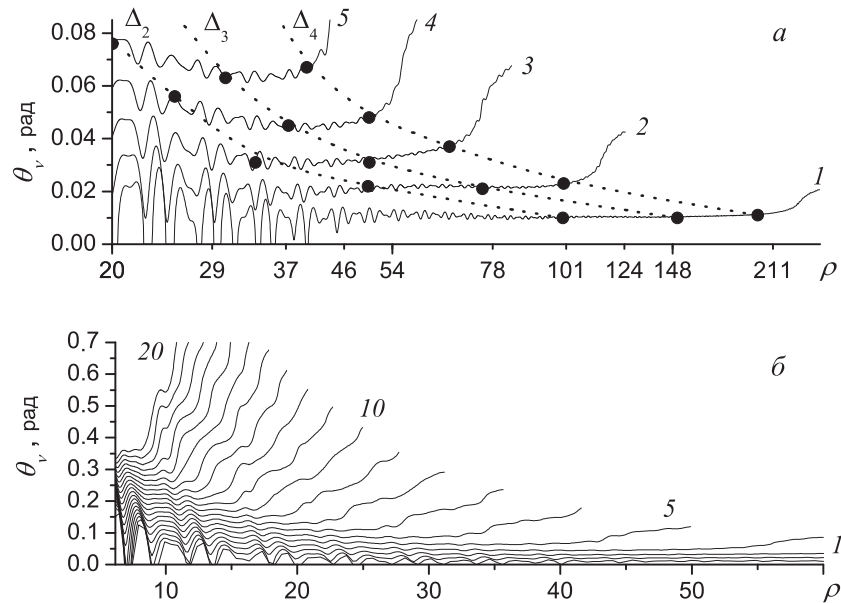


Рис. 2. Зависимость положений в угловой разверстке точки пересечения кривой интегральной индикатрисы и (8), рассчитанных по теории Ми. Вычисления выполнены для относительных показателей преломления в диапазоне $1.01 \leq m \leq 1.2$ с шагом 0.01, т. е. кривой 1 соответствует значение относительного показателя преломления 1.01, кривой 2 — 1.02 и т. д. На рис. 2, а значения ρ на оси абсцисс представлены в логарифмическом масштабе; пунктиром показаны значения фазовых сдвигов: $\Delta_2 = 2$, $\Delta_3 = 3$, $\Delta_4 = 4$

Как следует из рис. 2, а, значения θ_ν в широком диапазоне изменения ρ (вплоть до $\Delta \approx 4$) остаются практически постоянными. Иначе говоря, для взвесей, имеющих распределения по размерам, в рамках указанных диапазонов изменения ρ значение θ_ν может служить мерой величины $m - 1$.

В диапазоне $m \leq 1.05$ для ряда значений ρ выполняется неравенство $\nu < 0$. Для таких точек принималось $\theta_\nu = 0$ (см. рис. 2). Однако осцилляции на отмеченных кривых (особенно сильные при относительно небольших значениях ρ и обусловленные поведением величины D_b для одиночной частицы) будут заметно сглажены даже для достаточно узких распределений частиц взвеси по размерам, что устранил имеющиеся неоднозначности.

Отметим, что в пределе $|m - 1| \rightarrow 0$ $\theta_\nu = \theta_m = |m - 1|$ (см. кривые на рис. 2, а для $m = 1.01, 1.02$). Однако при увеличении значений $|m - 1|$ это правило нарушается. В таком случае необходимо пользоваться данными рис. 2, а.

Таким образом, на основе проведенного исследования получена связь относительного показателя преломления вещества оптически мягких сфер с интегральной индикатрисой светорассеяния в диапазоне $\Delta < 4$ и предложен способ нахождения его значений методом интегральной индикатрисы. Данный способ может быть использован и для оценки значений концентрации частиц взвеси с помощью (1).

Список литературы

- [1] Сидько Ф. Я., Лопатин В. Н., Парамонов Л. Е. Поляризационные характеристики взвесей биологических частиц. Новосибирск: Наука, 1990. 119 с.

- [2] ПАТ. РФ № 2098794. Оптический способ определения размера частиц в суспензии / В.Н. Лопатин, А.Д. Апонасенко, Л.А. Щур, В.С. Филимонов. Опубл. в БИ, 1997. № 34.
- [3] BEUTHAN J., MINET O., HELFMANN J. ET AL. The spatial variation of the refractive index in biological cells // *Phys. Med. Biol.* 1996. Vol. 41. P. 369–382.
- [4] KEOHANE K.W., METCALF W.K. The cytoplasmic refractive index of lymphocytes, its significance and its changes during active immunization // *Quart. J. Exper. Physiol. Cognate Med. Sci.* 1959. Vol. 44. P. 343–346.
- [5] BOLIN F.P., PREUSS L.E., TAYLOR R.C., FERENEC R.J. Refractive index of some mammalian tissues using a fiber optic cladding method // *Appl. Opt.* 1989. Vol. 28. P. 2297–2303.
- [6] ЛОПАТИН В.Н., СИДЬКО Ф.Я. Введение в оптику взвесей клеток. Новосибирск: Наука, 1988. 250 с.
- [7] ВАН ДЕ ХЮЛСТ Г. Рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 536 с.
- [8] YENTSCH C.S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean // *Limnol. Oceanogr.* 1962. Vol. 7, N 4. P. 201–205.
- [9] ЛОПАТИН В.Н., АПОНАСЕНКО А.Д., ЩУР Л.А. Биофизические основы оценки состояния водных экосистем (теория, аппаратура, методы, исследования). Новосибирск: Наука, 2000. 360 с.
- [10] ЛОПАТИН В.Н., ШЕПЕЛЕВИЧ Н.В., ПРОСТАКОВА И.В. Определение параметров взвесей оптически мягких частиц // *Вычисл. технологии.* 2004. Т. 9. Спецвыпуск, посвященный 30-летию Института вычислительного моделирования СО РАН. С. 72–83.
- [11] БОРЕН К., ХАФМЕН Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 660 с.
- [12] PERELMAN A.YA. Application of Mie series of soft particles // *Pure and Appl. Geophys.* 1978. Vol. 116. P. 1077–1088.

Поступила в редакцию 20 октября 2009 г.