

Основные результаты и выводы

1. Показано, что временная автокорреляционная функция $G_1(\tau) = \langle E(t)E^*(t + \tau) \rangle$ когерентного лазерного излучения, многократно рассеянного в случайно-неоднородной мутной среде с пространственно неоднородной динамикой рассеивателей, с удовлетворительной точностью описывается диффузионной моделью. Уравнение диффузии для $G_1(\tau)$ обобщено на случай направленного движения частиц среды. С использованием численного моделирования рассеяния методом Монте-Карло установлено, что диффузионная модель применима в условиях, когда роль процессов рассеяния низкого порядка пренебрежимо мала.
2. Получены общие выражения для временной автокорреляционной функции $G_1(\tau)$ света, многократно рассеянного в многослойной мутной среде, состоящей из произвольного числа слоев. Для частных случаев двухслойной и трехслойной сред показано, что методика диффузионно-волновой спектроскопии может быть использована для получения полезной информации как о рассеивающих свет частицах (определение среднего размера частиц, коэффициентов рассеяния и поглощения), так и о макроскопической структуре образца (определение положения и размеров динамически неоднородных областей).
3. Изучено влияние поглощения на временную автокорреляционную функцию $G_1(\tau)$ многократно рассеянного света. Показано, что для

случая одной динамически неоднородной области, находящейся внутри макроскопически однородного образца, все кривые $G_1(\tau)$, измеренные в различных точках поверхности образца, должны пересечься в одной точке $\tau = \tau_1$. При условии постоянства транспортной длины свободного пробега фотона ℓ^* в пределах образца, τ_1 пропорционально $(-\Delta\mu_a/\Delta D_B)$ (где $\Delta\mu_a$, ΔD_B — отклонения коэффициентов поглощения света и диффузии рассеивателей внутри динамической неоднородности от их значений в остальной среде).

4. Установлено хорошее соответствие между теоретически рассчитанными временными автокорреляционными функциями света, диффузно отраженного от случайно-неоднородной мутной среды с макроскопически неоднородной динамикой рассеивателей, и экспериментальными данными других научных групп. Выявлено, что методика диффузионно-волновой спектроскопии может с успехом применяться для локализации потоков частиц в многократно рассеивающих свет случайно-неоднородных средах при условии, что область потока удалена от границы среды не дальше, чем на расстояние $15 \div 20\ell^*$, а скорость потока превышает 1 мм/с. Положение области потока и ее размер в этом случае могут быть определены с точностью до $1 \div 5\ell^*$.
5. Предложена модификация метода диффузионно-волновой спектроскопии, предназначенная для изучения возникающих под действием мощного лазерного излучения светоиндуцированных потоков частиц в концентрированных суспензиях. Теоретически показано, что измерения $G_1(\tau)$ могут быть использованы для определения характерных скоростей потоков в концентрированных суспензиях.

6. Временная автокорреляционная функция многократно рассеянного света рассчитана с учетом пондеромоторного действия падающего на мутную среду лазерного пучка. Теоретически предсказано, что при мощности сильно сфокусированного лазерного пучка, превышающей $1 \div 10$ Вт, эффекты лазерного ускорения микро-частиц должны играть существенную роль в экспериментах по динамическому многократному рассеянию света.
-

Я искренне благодарен всем, кто помогал мне при подготовке настоящей диссертации. Прежде всего, большое спасибо моему научному руководителю — Сергею Сергеевичу Чеснокову. Его поддержка и советы были поистине неоценимы. Кроме того, я в неоплатном долгу перед преподавателями и сотрудниками физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, чей труд позволил мне стать специалистом высокой квалификации. Отдельное спасибо сотрудникам кафедры общей физики и волновых процессов и, особенно, заведующему кафедрой Николаю Ивановичу Коротееву. Только доброжелательная и способствующая плодотворной работе атмосфера, созданная и поддерживаемая на кафедре, позволила мне выполнить описанную в диссертации работу.

При подготовке настоящей диссертации мне посчастливилось работать вместе с большим количеством замечательных людей, которым я также от души признателен. Прежде всего, большое спасибо Роже Мейнару [Roger Maunard] (Университет Дж. Фурье, Гренобль, Франция), дискуссии с которым помогли мне вникнуть в суть проблем многократного рассеяния волн в случайно-неоднородных средах. Крайне важным было для меня сотрудничество с исследователями, выполняющими экспериментальные измерения — Микелем Хекмейером [Michael

Heckmeier] и Георгом Маретом [*Georg Maret*] (Университет г. Констанц, Констанц, Германия); а также с Игорем Владиславовичем Меглинским (Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия). Сопоставление теоретических и экспериментальных результатов позволило мне лучше понять многие аспекты рассматриваемых в диссертации проблем. Я благодарен также Мишику Айразатовичу Казаряну (ФИАН им. П.Н. Лебедева), сотрудничество с которым было для меня чрезвычайно важным при подготовке последней главы настоящей диссертации.

Нельзя не отметить плодотворные дискуссии с Валерием Петровичем Кандидовым, Александром Васильевичем Приезжевым и Александром Алексеевичем Карабутовым (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия); со Станиславом Дмитриевичем Захаровым и Владимиром Афанасьевичем Щегловым (ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва, Россия).

Наконец, я благодарен своим родителям — Людмиле Алексеевне и Евгению Павловичу — за поддержку с их стороны, за полезные советы и за все те качества, ими во мне воспитанные, которые позволили мне проделать описанную в диссертации работу.

Приложения

А. Фазовая функция Хени-Гринштейна

Фазовая функция Хени-Гринштейна имеет вид [10]

$$p(\hat{\Omega}, \hat{\Omega}') = p(\hat{\Omega} \cdot \hat{\Omega}') = p(\cos \theta) = \frac{1 - g^2}{2 [1 + g^2 - 2g \cos \theta]^{3/2}}, \quad (4.1)$$

где θ — угол между направлением $\hat{\Omega}'$ распространения волны до рассеяния и направлением $\hat{\Omega}$ распространения рассеянной волны ($0 \leq \theta \leq \pi$).

Средний косинус угла рассеяния равен g :

$$\langle \cos \theta \rangle = \int_0^\pi p(\cos \theta) \cos \theta \sin \theta \, d\theta = g. \quad (4.2)$$

Б. Условия проведения эксперимента — I [136]

В эксперименте использовалась кювета размером $5 \times 4 \times 2$ см³, заполненная монодисперсной суспензией полистироловых шариков диаметром $b = 0.12$ мкм. Объемная концентрация шариков задавалась равной $\Phi = 0.058$. Для такой суспензии при комнатной температуре $D_B = 3.55 \times 10^{-12}$ м²/с, $\tau_0 = 2.66 \times 10^{-4}$ с, $\ell^* = 69$ мкм, $\mu_a \approx 0$. Внутри кюветы был расположен сделанный из оптического стекла капилляр длиной 3 см и диаметром $d = 1.5$ мм. Толщина стенок капилляра — 0.01 мм.

В экспериментах с потоком рассеивателей через капилляр протекала та же суспензия, которой была заполнена вся кювета. Ее поток создавался за счет системы находящихся на разной высоте сообщающихся сосудов. В экспериментах по визуализации области с отличающимся по интенсивности броуновским движением рассеивателей капилляр заполнялся суспензией полистироловых шариков другого размера: $b = 0.7$

мкм ($D_B = 6.08 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, $\tau_0 = 1.55 \times 10^{-3} \text{ с}$) или $b = 2.04 \text{ мкм}$ ($D_B = 2.09 \times 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, $\tau_0 = 4.52 \times 10^{-3} \text{ с}$). Объемная концентрация частиц в этих двух случаях задавалась равной $\Phi = 0.035$ и 0.067 , соответственно. Это было необходимо для сохранения величины транспортной длины свободного пробега фотона внутри капилляра равной ее значению в остальном объеме кюветы ($\ell^* = 69 \text{ мкм}$). Транспортная длина свободного пробега измерялась независимо для каждой из используемых суспензий при помощи стандартных экспериментов по измерению коэффициента пропускания слоя суспензии известной толщины [25].

На кювету падало линейно поляризованное излучение одномодового аргонового ионного лазера (длина волны $\lambda = 514.5 \text{ нм}$, радиус пучка $\approx 1 \text{ мм}$). Угол падения лазерного пучка на стенку кюветы составлял величину порядка 10° . Рассеянный назад свет собирался с поверхности диаметром 1 мм на стенке кюветы при помощи двух диафрагм и попадал на вход фотоумножителя. Таким образом, измерения проводились в пределах одного пятна спекл-картины. Чтобы уменьшить влияние рассеяния низких порядков, использовалась кросс-поляризационная схема измерений (V-H конфигурация): при помощи поляризатора из рассеянного излучения выделялась только та часть, поляризация которой была перпендикулярна поляризации исходного лазерного пучка [163].

Нормированная временная автокорреляционная функция интенсивности рассеянного света $g_2(\tau) = \langle I(t)I(t+\tau) \rangle / \langle I \rangle^2$ вычислялась с использованием электронного многоканального автокоррелометра, соединенного с выходом фотоумножителя. Использовалось 88 каналов коррелометра. Затем для получения $g_1(\tau) = \langle E(t)E^*(t+\tau) \rangle / \langle |E(t)|^2 \rangle$ применялось соотношение Зигерта (1.58). Поскольку область на границе рассеивающей среды, откуда излучение попадает на вход фотоумножителя, имеет конечный (ненулевой) размер, то вычисляемое на основе измеренной величины $g_2(0)$ значение $g_1(0)$ всегда оказывается несколь-

ко меньше единицы (т.е. $\beta \neq 1$). Для проведения количественного сопоставления теоретических и экспериментальных результатов, измеряемые в эксперименте зависимости $g_1(\tau)$ домножались на $g_1^{-1}(0)$ (т.е. величина β определялась экспериментально).

Предварительно было проверено, что ни стенки капилляра, ни наличие внутри капилляра суспензий с различными коэффициентами диффузии D_B , ни поток суспензии через капилляр не оказывают никакого влияния на среднюю интенсивность рассеянного назад света. Это означает отсутствие какой-либо возможности определения параметров неоднородной области внутри образца (и даже ее присутствия) на основе статических измерений.

Для определения значения константы γ , входящей в уравнение (3.13), перед каждым экспериментом делалось калибровочное измерение временной автокорреляционной функции диффузно отраженного излучения в отсутствие капилляра. Значение γ затем определялось путем аппроксимации экспериментально измеренных кривых формулой (3.13). В результате были получены значения $\gamma = 2.12 \div 2.82$. Изменение γ от измерения к измерению было обусловлено конечностью размеров лазерного пучка: поскольку угол падения лазерного пучка на кювету каждый раз немного изменялся, то и размер освещенной области на стенке кюветы не оставался постоянным.

В. Условия проведения эксперимента – II [138]

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 3.1. Образец ($8 \times 15 \times 15$ см³) состоял состоит из частиц рутила TiO_2 , растворенных в смоле (0.01 г рутила на 100 мл смолы, диаметр частиц 0.25 мкм, $\mu'_s = 4$ см⁻¹, $\mu_a = 0.002$ см⁻¹, $\ell^* = 0.25$ см, $D_B = 0$). Внутри образца на расстоянии $z = 0.925$ см от одной из его граней было сделано

цилиндрическое сквозное отверстие диаметром $d = 0.75$ см, в котором с помощью расположенных на разной высоте сообщающихся сосудов поддерживалось ламинарное течение взвеси полистироловых шариков в воде (диаметр частиц 0.296 мкм, объемная концентрация $\simeq 0.5\%$, $D_B = 1.5 \times 10^{-8}$ см²/с, $\tau_0 = 6.32 \times 10^{-4}$ с). Оптические свойства взвеси (μ'_s , μ_a) были близки к свойствам материала, из которого изготовлен образец. Таким образом, область внутри капилляра отличалась от окружающей среды только динамикой находящихся в ней частиц.

Когерентное лазерное излучение на длине волны $\lambda = 514$ нм мощностью до 1 Вт, генерируемое аргоновым ионным лазером с установленным внутри резонатора эталоном Фабри-Перо в ТЕМ₀₀ моде, с помощью системы зеркал и линзы вводилось в многомодовый световод (диаметр сердцевины 200 мкм, числовая апертура 0.16). Эталон Фабри-Перо внутри резонатора лазера обеспечивал достаточно большую длину когерентности излучения (около 3 м), что необходимо в экспериментах по многократному рассеянию света [102]. Пройдя по световоду, свет падал на поверхность образца. Рассеянный назад (диффузно отраженный) от образца свет собирался с помощью одномодового волоконного световода (диаметр 3.1 мкм, числовая апертура 0.13), что обеспечивало регистрацию флуктуаций интенсивности света в пределах площадки когерентности рассеянного излучения. Приемная апертура световода была расположена в точке $(x, y, 0)$, как показано на рис. 3.1.

Пройдя по световоду, рассеянное излучение поступало на работающий в режиме счета фотонов ФЭУ, соединенный с цифровым многоканальным автокоррелометром. Применение световодов для подвода лазерного излучения к образцу и регистрации рассеянного света, а также использование цифрового автокоррелометра обеспечивало высокое значение отношения сигнал/шум в процессе измерений. Временная автокорреляционная функция поля в рассеянной волне $g_1(\tau)$ вычислялась

на основе рассчитанной коррелометром автокорреляционной функции интенсивности $g_2(\tau)$ при помощи соотношения Зигерта (1.58).

Поскольку используемый в эксперименте образец не удовлетворяет условию эргодичности, усреднение произведения $I(t)I(t + \tau)$ по ансамблю реализаций достигалось методом, предложенным в работе [164]. Суть этого метода состоит в том, что усреднение осуществляется за счет перемещения образца относительно неподвижных источника и детектора с помощью шагового электрического двигателя попеременно, то в одну, то в другую сторону. В описываемых здесь экспериментах скорость движения образца составляла около 50 мкм/с. Перемена направления движения осуществлялась автоматически каждые 10 с, в результате чего образец сдвигался примерно на 500 мкм то в одну, то в другую сторону в направлении, параллельном оси капилляра.

Литература

- [1] Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. // М.-Л.: ГИТТЛ, 1951.
- [2] Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами. // М.: ИЛ, 1961.
- [3] Jakerman E. Theory of optical spectroscopy by digital autocorrelation of photon-counting fluctuations. // J. Phys A: Gen. Phys., 1970, v. 3, p. 201–215.
- [4] Бенедек Дж. Спектроскопия оптического смещения и ее приложения к задачам физики, химии биологии и техники. // УФН, 1972, т. 106, вып. 3, с. 481–504.
- [5] Laser speckle and related phenomena. Ed. Dainty J.C. // Berlin: Springer-Verlag, 1975.
- [6] Berne B.J., Pecora R. Dynamic light scattering with application to chemistry, biology, and physics. // N.Y.: Wiley, 1976.
- [7] Photon correlation spectroscopy and velocimetry. Eds. H.Z. Cummins, E.R. Pike. // N.Y. : Plenum Press, 1977.
- [8] Спектроскопия оптического смещения и корреляция фотонов. Под ред. Г. Камминса и Э. Пайка. // М.: Мир, 1978.
- [9] Кросиньяни Б., Ди Порто П., Бертолотти М. Статистические свойства рассеянного света. // М.: Наука, 1980.
- [10] Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 1. Однократное рассеяние и теория переноса.

- // М.: Мир, 1981 [См. также второе издание: Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media. // N.Y.: IEEE Press, 1997].
- [11] Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Том 2. Многократное рассеяние, турбулентность, шероховатые поверхности и дистанционное зондирование. // М.: Мир, 1981 [См. также второе издание: Ishimaru A. Wave propagation and scattering in random media. // N.Y.: IEEE Press, 1997].
- [12] Pecora R. Dynamic light scattering: applications of photon correlation spectroscopy. // N.Y.: Plenum Press, 1985.
- [13] Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. // М.: Мир, 1986.
- [14] Приезжев А.В., Тучин В.В., Шубочкин Л.П. Лазерная диагностика в биологии и медицине. // М.: Наука, 1989.
- [15] Tissue optics. Eds. Welch A.J., van Gemert M.C.J. // N.Y.: Academic Press, 1992.
- [16] Optical methods of biomedical diagnostics and therapy. Ed. Tuchin V.V. // Bellingham: SPIE, v. 1981, 1992.
- [17] Brown W. Dynamic light scattering. The method and some applications. // Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [18] Tuchin V.V. Laser light scattering in biomedical diagnostics and therapy. // Laser Appl., 1993, v. 5, № 2,3, p. 43–60.
- [19] Тучин В.В. Исследование биотканей методами светорассеяния. // УФН, 1997, т. 167, № 5, с. 517–539.
- [20] Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. // Саратов: Издательство СГУ, 1998.
- [21] Иванов А.П., Лойко В.А., Дик В.П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах. // Минск: Наука и техника,

1988.

- [22] Coherence-domain methods in biomedical optics. Ed. Tuchin V.V. // Bellingham: SPIE, v. 2732, 1996.
- [23] Coherence-domain methods in biomedical science and clinical applications. Eds. Tuchin V.V., Podbielska H., Ovrzyn B. // Bellingham: SPIE, v. 2981, 1997.
- [24] Yodh A., Tromberg B., Sevick-Muraca E., Pine D. Diffusing photons in turbid media. // Appl. Opt., 1997, v. 36, № 1, p. 9–231.
- [25] Pine D.J., Weitz D.A., Maret G., Wolf P.E., Herbolzheimer E., Chaikin P.M. Dynamical correlations of multiply scattered light. // In: Scattering and localization of classical waves in random media. Ed. Ping Sheng, World Scientific, Singapore, 1989, p. 312–372.
- [26] Pine D.J., Weitz D.A., Zhu J.X., Herbolzheimer E. Diffusing-wave spectroscopy: dynamic light scattering in the multiple scattering limit. // J. Phys. France, 1990, v. 51, № 18, p. 2101–2127.
- [27] Photon migration in tissue and biomedical applications of lasers. Special issue. // Appl. Opt., 1993, v. 32, № 4, p. 353–630.
- [28] Maret G. Recent experiments on multiple scattering and localization of light. // In: Mesoscopic quantum physics. Les Houches session LXI. Eds. Akkermans E., Montambaux G., Pichard J.-L., Zinn-Justin J., Elsevier, North-Holland, 1995, p. 147–179.
- [29] Барабаненков Ю.Н., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Состояние теории распространения волн в случайно-неоднородных средах. // УФН, 1970, т. 102, вып. 1, с. 3–42.
- [30] Барабаненков Ю.Н. Многократное рассеяние волн на ансамбле частиц и теория переноса излучения. // УФН, 1975, т. 117, вып. 1, с. 49–78.
- [31] Kuz'min V.L., Romanov V.P., Zubkov L.A. Propagation and scattering of light in fluctuating media. // Phys. Rep., 1994, v. 248,

№ 2–5, p. 71–368.

- [32] Кузьмин В.Л., Романов В.П. Когерентные эффекты при рассеянии света в неупорядоченных системах. // УФН, 1996, т. 166, № 3, с. 247–278.
- [33] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая электродинамика. // М.: Наука, 1989.
- [34] Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е. Методы квантовой теории поля в статистической физике. // М.: Физматгиз, 1962.
- [35] Frisch U. Wave propagation in random media. // In: Probabilistic methods in applied mathematics. Ed. Bharucha-Reid A.T., N.Y.: Academic Press, 1968, p. 76–198.
- [36] Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. // М.: Наука, 1967.
- [37] Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Часть 2. Случайные поля. // М.: Наука, 1978.
- [38] Апресян Л.А., Кравцов Ю.А. Теория переноса излучения: Статистические и волновые аспекты. // М.: Наука, 1983.
- [39] Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Статистическая физика. Часть 2. Теория конденсированного состояния. // М.: Наука, 1978.
- [40] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. // М.: Физматгиз, 1959.
- [41] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. // М.: Наука, 1970.
- [42] Bicout D., Brosseau C., Martinez A.S., Schmitt J.M. Depolarization of multiply scattered waves by spherical diffusers: influence of the size parameter. // Phys. Rev. E, 1994, v. 49, № 3, p. 1767–1770.
- [43] Романов С.В. Статистическое моделирование матриц Мюллера дисперсных объектов в условиях многократного рассеяния света.

- Дисс. к.ф.-м.н. // Саратов, Россия, 1997.
- [44] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. // М.: Наука, 1989.
 - [45] Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. // М.: Наука, 1976.
 - [46] Голубенцев А.А. Подавление интерференционных эффектов при многократном рассеянии света. // ЖЭТФ, 1984, т. 86, вып. 1, с. 47–59.
 - [47] Stephen M.J. Temporal fluctuations in wave propagation in random media. // Phys. Rev. B, 1988, v. 37, № 1, p. 1–5.
 - [48] Van Albada M.P., Lagendijk A. Observation of weak localization of light in a random medium. // Phys. Rev. Lett., 1985, v. 55, № 24, p. 2692–2695.
 - [49] Wolf P.E., Maret G. Weak localization and coherent backscattering of photons in disordered media. // Phys. Rev. Lett., 1985, v. 55, № 24, p. 2696–2699.
 - [50] MacKintosh F.C., John S. Coherent backscattering of light in the presence of time-reversal-noninvariant and parity-nonconserving media. // Phys. Rev. B, 1988, v. 37, № 4, p. 1884–1897.
 - [51] Akkermans E., Wolf P.E., Maynard R., Maret G. Theoretical study of the coherent backscattering of light by disordered media. // J. Phys. France, 1988, v. 49, № 1, p. 77–98.
 - [52] Альтшулер Б.Л. Флуктуации остаточной проводимости неупорядоченных проводников. // Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 41, вып. 12, с. 530–533.
 - [53] Альтшулер Б.Л., Хмельницкий Д.Е. Флуктуационные свойства проводников малых размеров. // Письма в ЖЭТФ, 1985, т. 42, вып. 7, с. 291–293.
 - [54] Альтшулер Б.Л., Спивак Б.З. Изменение реализации случайного потенциала и проводимость образцов малых размеров. // Письма

- в ЖЭТФ, 1985, т. 42, вып. 9, с. 363–365.
- [55] Hikami S. Anderson localization in a nonlinear- σ -model representation. // Phys. Rev. B, 1985, v. 24, № 5, p. 2671–2679.
- [56] Альтшулер Б.Л., Спивак Б.З. Мезоскопические флуктуации в контакте сверхпроводник — нормальный металл — сверхпроводник. // ЖЭТФ, 1987, т. 92, вып. 2, с. 607–615.
- [57] Special issue: Disordered solids. // Physics Today, 1988, v. 3, № 12, p. 1–176.
- [58] Чандрасекар С. Перенос лучистой энергии. // М.: ИЛ, 1953.
- [59] Кейз К., Цвайфель П. Линейная теория переноса. // М.: Мир, 1972.
- [60] Барабаненков Ю.Н. Уравнение переноса излучения в модели изотропных точечных рассеивателей. // ДАН СССР, 1967, т. 174, № 1, с. 53–55.
- [61] Дэвисон Б. Теория переноса нейтронов. // М.: Атомиздат, 1960.
- [62] Белл Д., Глистон С. Теория ядерных реакторов. // М.: Атомиздат, 1974.
- [63] Duderstadt J.J., Hamilton L.J. Nuclear Reactor Analysis. // N.Y.: Wiley, 1976.
- [64] Марчук Г.И., Лебедев В.И. Численные методы в теории переноса нейтронов. // М.: Атомиздат, 1981.
- [65] Соболев В.В. Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет. // М.: Гостехиздат, 1956.
- [66] Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. // М.: Наука, 1972.
- [67] Klitsner T., VanCleve J.E., Fischer H.E., Pohl R.O. Phonon radiative heat transfer and surface scattering. // Phys. Rev. B, 1988, v. 38, № 11, p. 7576–7594.
- [68] Swartz E.T., Pohl R.O. Thermal boundary resistance. // Rev. Mod. Phys., 1989, v. 61, № 3, p. 605–668.

- [69] Furutsu K. Multiple scattering of waves in a medium of randomly distributed particles and derivation of transport equation. // Rad. Sci., 1975, v. 10, № 1, p. 29–44.
- [70] Furutsu K. Diffusion equation derived from space-time transport equation. // J. Opt. Soc. Am., 1980, v. 70, № 4, p. 360–366.
- [71] Furutsu K. Diffusion equation derived from space-time transport equation in anisotropic media. // J. Math. Phys., 1980, v. 21, № 4, p. 765–777.
- [72] Furutsu K., Yamada Y. Diffusion approximation for a dissipative random medium and the applications. // Phys. Rev. E., 1994, v. 50, № 5, p. 3634–3640.
- [73] Yoo K.M., Liu F., Alfano R.R. When does the diffusion approximation fail to describe photon transport in random media? // Phys. Rev. Lett., 1990, v. 64, № 22, p. 2647–2650.
- [74] Durduran T., Chance B., Yodh A.G., Boas D.A. Does the photon diffusion coefficient depend on absorption? // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, v. 14, № 10, p. 3358–3365.
- [75] Haskell R.C., Swaasand L.V., Tsay T., Feng T., McAdams M.S., Tromberg B.J. Boundary conditions for the diffusion equation in radiative transfer. // J. Opt. Soc. Am. A, 1994, v. 11, № 10, p. 2727–2741.
- [76] Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. Том 1. // М.: ИЛ, 1958.
- [77] Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. Том 2. // М.: ИЛ, 1960.
- [78] Zhu J.X., Pine D.J., Weitz D.A. Internal reflection of diffuse light in random media. // Phys. Rev. A, 1991, v. 44, № 6, p. 3948–3959.
- [79] Patterson M.S., Chance B., Wilson B.C. Time resolved reflectance and transmittance for the noninvasive measurement of tissue optical

- properties. // *Appl. Opt.*, 1989, v. 28, № 12, p. 2331–2336.
- [80] Bicout D., Maret G. Multiple light scattering in Taylor-Couette flow. // *Physica A*, 1994, v. 210, № 1, p. 87–112.
- [81] Scheffold F., Härtl W., Maret G., Matijević E. Observation of long-range correlations in temporal intensity fluctuations of light. // *Phys. Rev. B*, 1997, v. 56, № 17, p. 10942–10952.
- [82] Ackerson B.J., Dougherty R.L., Reguigui N.M., Nobbmann U. Correlation transfer: Application of radiative transfer solution methods to photon correlation problems. // *J. Thermophys. Heat Transfer*, 1992, v. 6, № 3, p. 577–588.
- [83] Dougherty R.L., Ackerson B.J., Reguigui N.M., Dorri-Nowkoorani F., Nobbmann U. Correlation transfer: Development and application. // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1994, v. 52, № 4, p. 713–720.
- [84] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. // М.: Наука, 1986.
- [85] Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Том 8. Квантовая механика — I. // М.: Мир, 1966.
- [86] Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. // М.: Мир, 1968.
- [87] Path integrals and their applications in quantum, statistical, and solid state physics. Eds. G.J. Papadopoulos, J.T. Devreese. // N.Y.: Plenum press, 1978.
- [88] Dashen R. Path integrals for waves in random media. // *J. Math. Phys.*, 1979, v. 20, № 5, p. 894–920.
- [89] Maret G., Wolf P.E. Multiple light scattering from disordered media. The effect of brownian motion of scatterers. // *Z. Phys. B*, 1987, v. 65, № 2–3, p. 409–413.
- [90] Pine D.J., Weitz D.A., Chaikin P.M., Herbolzheimer E. Diffusing-wave spectroscopy. // *Phys. Rev. Lett.*, 1988, v. 60, № 12, p. 1134–1137.

- [91] Bicout D., Akkermans E., Maynard R. Dynamical correlations for multiple light scattering in laminar flow. // J. Phys. I France, 1991, v. 1, № 4, p. 471–491.
- [92] Bicout D., Maynard R. Diffusing wave spectroscopy in inhomogeneous flows. // Physica A, 1993, v. 199, № 3–4, p. 387–411.
- [93] Wu X-L., Pine D.J., Chaikin P.M., Huang J.S., Weitz D.A. Diffusing-wave-spectroscopy in a shear flow. // J. Opt. Soc. Am. B, 1990, v. 7, № 1, p. 15–20.
- [94] Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назарлиев М.А., Дарбинджан Р.А., Каргин Б.А., Елепов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. // Новосибирск: Наука, 1974.
- [95] Ярославский И.В., Тучин В.В. Распространение света в многослойных рассеивающих средах. Моделирование методом Монте-Карло. // Оптика и спектроскопия, 1992, т. 72, вып. 4, с. 934–939.
- [96] Jentink H.W., de Mul F.F.M., Hermesen R.G.A.M., Graaff R., Greve J. Monte Carlo simulations of laser Doppler blood flow measurements in tissue. // Appl. Opt., 1990, v. 29, № 16, p. 2371–2381.
- [97] Feng S., Zeng F. Monte Carlo simulations of photon migration path distributions in multiple scattering media. // Proc. SPIE, 1991, v. 1888, p. 78–89.
- [98] Graaff R., Koelnik M.H., de Mul F.F.M., Zijlstra W.G., Dassel A.C.M., Aarnoudse J.G. Condensed Monte Carlo simulation for the description of light transport. // Appl. Opt., 1993, v. 32, № 4, p. 426–434.
- [99] Durian D.J. Influence of boundary reflection and refraction on diffusive photon transport. // Phys. Rev. E, 1994, v. 50, № 2, p. 857–866.
- [100] Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Часть 1. Случайные процессы. // М.: Наука, 1976.

- [101] Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. Введение в статистическую радиофизику и оптику. // М.: Наука, 1981.
- [102] Bellini T., Glasser M.A., and Clark N.A., Degiorgio V. Effects of finite laser coherence in quasielastic multiple scattering. // Phys. Rev. A., 1991, v. 44, № 8, p. 5215–5223.
- [103] Bicout D.J., Maynard R. Multiple light scattering in turbulent flow. // Physica B, 1995, v. 204, № 1, p. 20–26.
- [104] Photon migration in tissue. Ed. Chance B. // N.Y.: Plenum Press, 1989.
- [105] Yodh A., Chance B. Spectroscopy and imaging with diffusing light. // Physics Today, 1995, v. 10, № 3, p. 34–40.
- [106] Selected papers on tissue optics: applications in medical diagnostics and therapy. Ed. Tuchin V.V. // Bellingham: SPIE Milestone Series, v. MS 102, 1994.
- [107] Weitz D.A., Pine D.J., Pusey P.N., Tough R.J.A. Nondiffusive brownian motion studied by diffusing-wave spectroscopy. // Phys. Rev. Lett., 1989, v. 63, № 16, p. 1747–1750.
- [108] Kao M.H., Yodh A.G., Pine D.J. Observation of Brownian motion on the time scale of hydrodynamic interactions. // Phys. Rev. Lett., 1993, v. 70, № 2, p. 242–245.
- [109] Leutz W., Maret G. Ultrasonic modulation of multiply scattered light. // Physica B, 1995, v. 204, № 1, p. 14–19.
- [110] MacKintosh F.C., John S. Diffusing-wave spectroscopy and multiple scattering of light in correlated random media. // Phys. Rev. B, 1989, v. 40, № 4, p. 2383–2406.
- [111] Fraden S., Maret G. Multiple light scattering from concentrated interacting suspensions. // Phys. Rev. Lett., 1990, v. 65, № 4, p. 512–515.
- [112] Qiu X., Wu X.L., Xue J.Z., Pine D.J., Weitz D.A., Chaikin P.M.

- Hydrodynamic interactions in concentrated suspensions. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, v. 65, № 4, p. 516–519.
- [113] Horne D.S., Davidson C.M. Application of diffusing-wave spectroscopy to particle sizing in concentrated dispersions. // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1993, v. 77, № 1, p. 1–8.
- [114] Nägele G. On the dynamics and structure of charge-stabilized suspensions. // *Phys. Rep.*, 1996, v. 272, № 5,6, p. 215–372.
- [115] Zahn K., Méndez-Alcaraz J.M., Maret G. Hydrodynamic interaction may enhance the self-diffusion of colloidal particles. // *Phys. Rev. Lett.*, 1997, v. 79, № 1, p. 175–178.
- [116] Durian D.J., Weitz D.A., Pine D.J. Multiple light-scattering probes of foam structure and dynamics. // *Science*, 1991, v. 252, № 5006, p. 686–688.
- [117] Hoballah H., Höhler H., Cohen-Addad S. Time evolution of the elastic properties of aqueous foam. // *J. Phys. II France*, 1997, v. 7, № 9, p. 1215–1224.
- [118] Höhler H., Cohen-Addad S., Hoballah H. Periodic nonlinear bubble motion in aqueous foam under oscillating shear strain. // *Phys. Rev. Lett.*, 1997, v. 79, № 6, p. 1154–1157.
- [119] Cohen-Addad S., Hoballah H., Höhler R. Viscoelastic response of a coarsening foam. // *Phys. Rev. E*, 1998, to be published.
- [120] Feng S., Kane C., Lee P.A., Stone A.D. Correlations and fluctuations of coherent wave transmission through disordered media. // *Phys. Rev. Lett.*, 1988, v. 61, № 7, p. 834–837.
- [121] Berkovits R., Feng S. Correlations in coherent multiple scattering. // *Physics Reports*, 1994, v. 238, № 3, p. 135–172.
- [122] Stephen M.J., Cwilich G. Intensity correlation function and fluctuations in light scattered from a random medium. // *Phys. Rev.*

- Lett., 1987, v. 59, № 3, p. 285–287.
- [123] Scheffold F., Härtl W., Maret G., Matijević E. Dynamic long-range speckle correlations. // 17th General Conference of the Condensed Matter Division, European Physical Society & 6^{emes} Journées de la Matière Condensée, Société Française de Physique (Grenoble, France, August 25–29, 1998).
 - [124] Stark H., Lubensky T.C. Multiple light scattering in nematic liquid crystals. // Phys. Rev. Lett., 1996, v. 77, № 11, p. 2229–2232.
 - [125] Stark H., Lubensky T.C. Multiple light scattering in anisotropic random media. // Phys. Rev. E, 1997, v. 55, № 1, p. 514–533.
 - [126] Stark H., Kao M.H., Jester K.A., Lubensky T.C., Yodh A.G., Collings P.J. Light diffusion and diffusing-wave spectroscopy in nematic liquid crystals. // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, v. 14, № 1, p. 156–178.
 - [127] Heiderich A., Maynard R., Van Tiggelen B.A. Multiple light scattering in ordered nematic liquid crystals. // J. Phys. II France, 1997, v. 7, № 5, p. 765–792.
 - [128] Stark H. Radiative transfer theory and diffusion of light in nematic liquid crystals. // Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1998, to be published.
 - [129] Boas D.A., Campbell L.E. and Yodh A.G. Scattering and imaging with diffusing temporal field correlations. // Phys. Rev. Lett., 1995, v. 75, № 9, p. 1855–1858.
 - [130] Boas D.A., Meglinsky I.V., Zemany L., Campbell L.E., Chance B., Yodh A.G. Diffusion of temporal field correlation with selected applications. // In: Coherence-domain methods in biomedical optics. Ed. Tuchin V.V., Proc. SPIE, 1996, v. 2732, p. 34–46.
 - [131] Boas D.A. Diffuse photon probes of structural and dynamical properties of turbid media: theory and biomedical applications. Ph.D. dissertation in physics. // Pennsylvania, USA, 1996 (<http://dpdw.eotc.tufts.edu/boas/Publications/Dissertation/diss.html>).

- [132] Boas D.A., Yodh A.G. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation. // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, v. 14, № 1, p. 192–215.
- [133] Boas D.A., Bizheva K.K., Siegel A.M. Using dynamic low coherence domain interferometry to image Brownian motion within highly scattering media. // Opt. Lett., 1998, v. 23, № 2, p. 319–321.
- [134] Heckmeier M., Maret G. Visualization of flow in multiple scattering liquids. // Europhys. Lett., 1996, v. 34, № 3, p. 257–262.
- [135] Heckmeier M., Maret G. Static imaging of dynamic fluctuations in multiple light scattering media. // Opt. Commun., 1998, v. 148, № 1–3, p. 1–5.
- [136] Heckmeier M. Vielfachstreuung von licht in dynamisch heterogenen und optisch anisotropen medien. // Konstanz, Germany: Hartung-Gorre-Verlag, 1998.
- [137] Меглинский И.В., Боас Д.А., Йод А.Г., Чанс Б., Тучин В.В. Развитие метода корреляции флуктуаций интенсивности для неинвазивного мониторинга и измерения параметров кровотока. // Изв. ВУЗов, сер. ПНД, 1996, т. 4, № 6, с. 65–75.
- [138] Меглинский И.В. Экспериментальное обоснование применения метода лазерной корреляционной спектроскопии для исследований биотканей *in vivo*. Дисс. к.ф.-м.н. // Саратов, Россия, 1997.
- [139] Свешников А.Г., Боголюбов А.Н., Кравцов В.В. Лекции по математической физике. // М.: Издательство МГУ, 1993.
- [140] Джексон Дж. Классическая электродинамика. // М.: Мир, 1965.
- [141] Kuzmin V.L., Romanov V.P. Multiply scattered light correlations in an expanded temporal range. // Phys. Rev. E, 1997, v. 56, № 5, p. 6008–6019.
- [142] O’Leary M.A., Boas D.A., Chance B., Yodh A.G. Refraction of diffuse photon density waves. // Phys. Rev. Lett., 1992, v. 69, № 18, p. 2658–

2661.

- [143] Den Outer P.N., Nieuwenhuizen Th.M., Lagendijk A. Location of objects in multiple-scattering media. // J. Opt. Soc. Am. A, 1993, v. 10, № 6, p. 1209–1218.
- [144] Boas D.A., O’Leary M.A., Chance B., Yodh A.G. Scattering and wavelength transduction of diffuse photon density waves // Phys. Rev. E, 1993, v. 47, № 5, p. R2999–R3002.
- [145] Boas D.A., O’Leary M.A., Chance B., Yodh A.G. Scattering of diffuse photon density waves by spherical inhomogeneties within turbid media: analytic solution and applications. // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1994, v. 91, p. 4887–4891.
- [146] Wang L., Jacques S.L. Monte Carlo modelling of light transport in multi-layered tissues in standard C. // Univ. of Texas, M.P. Anderson Cancer Center, 1992–1998 (<ftp://ftp.osa.org/BioOptic/PDFS/WANG/WANG.htm>).
- [147] O’Leary M.A., Boas D.A., Chance B., Yodh A.G. Images of inhomogeneous turbid media using diffuse photon density waves. // In: OSA proceedings on advances in optical imaging and photon migration. Ed. Alfano R.R., OSA, 1994, p. 106–115.
- [148] O’Leary M.A., Boas D.A., Chance B., Yodh A.G. Experimental images of heterogeneous turbid media by frequency-domain diffusing-photon tomography. // Opt. Lett., 1995, v. 20, № 5, p. 426–428.
- [149] Schotland J.C. Continuous-wave diffusion imaging. // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, v. 14, № 1, p. 275–279.
- [150] Yao Y., Wang Y., Pei Y., Zhu W., Barbour R.L. Frequency-domain optical imaging of absorption and scattering distributions using a born iterative method. // J. Opt. Soc. Am. A, 1997, v. 14, № 1, p. 325–342.
- [151] Hebden J.C., Delpy D.T. Enhanced time-resolved imaging with a diffusion model of photon transport. // Opt. Lett., 1997, v. 19, № 2,

p. 311–313.

- [152] Matson C.L. A diffraction tomographic model of the forward problem using diffuse photon density waves. // Optics Express, 1997, v. 1, № 1, p. 6–12 (<http://epubs.osa.org/opticsexpress/>).
- [153] Boas D.A. A fundamental limitation of linearized algorithms for diffuse optical tomography. // Optics Express, 1997, v. 1, № 13, p. 404–413 (<http://epubs.osa.org/opticsexpress/>).
- [154] Cheng X., Boas D. Diffuse optical tomography using continuous wave illumination. // Optics Express, 1998, v. 3, № 3, p. 118–123 (<http://epubs.osa.org/opticsexpress/>).
- [155] Walker S.A., Boas D.A., Gratton E. Photon density waves scattered from cylindrical inhomogeneities: theory and experiments. // Appl. Opt., 1998, v. 37, № 10, p. 1935–1944.
- [156] Эшкин А. Давление лазерного излучения. // УФН, 1973, т. 110, вып. 1, с. 101–114.
- [157] Захаров С.Д., Земсков К.И., Казарян М.А., Коротков Н.П. Применение светоиндуцированного движения частиц в пучке лазера на парах меди. // Известия РАН. Сер. физ., 1992, т. 56, № 4, с. 182–187.
- [158] Захаров С.Д., Казарян М.А., Коротков Н.П. Ударный разгон частиц в поле лазерного излучения. // Письма в ЖЭТФ, 1994, т. 60, вып. 5, с. 317–319.
- [159] Kazaryan M.A., Korotkov N.P., Zakharov S.D. Hydrodynamic flows in suspensions caused by powerful pulse-periodic light beams. // Physica Scripta, 1995, v. 52, № 5, p. 678–679.
- [160] Лебедев П.Н. Опытное исследование светового давления. // В кн. Лебедев П.Н. Собрание сочинений. М.: Наука, 1963.
- [161] Аскарьян Г.А. Движение частиц в луче лазера. // УФН, 1973, т. 110, вып. 1, с. 115–116.

- [162] Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. // М.: Физматгиз, 1962.
- [163] Schmitt J.M., Gandjbakhche A.H., Bonnar R.F. Use of polarized light to discriminate short-path photons in a multiply scattering medium. // Appl. Opt., 1992, v. 31, № 10, p. 6535–6546.
- [164] Xue J.-Z., Pine D.J., Milner S.T., Wu X.-L., Chaikin P.M. Nonergodicity and light scattering from polymer gels. // Phys. Rev. A., 1992, v. 46, № 10, p. 6550–6563.