Специальная секция „Биофотоника“ памяти Владимира Леонидовича Кузьмина

© И.В. Меглинский[1,2], Л.А. Зубков[3], В.В. Тучин[4,5,6]

[1] Aston Institute of Photonic Technologies, College of Engineering & Physical Sciences, Aston University, Birmingham, United Kingdom
[2] Кафедра анатомии и гистологии человека, Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет), Москва, Россия
[3] School of Biomedical Engineering Science and Health Systems, Drexel University, Philadelphia, PA, USA
[4] Институт физики и научный медицинский центр, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия
[5] Институт проблем точной механики и управления, ФИЦ „Саратовский научный центр Российской академии наук“, Саратов, Россия
[6] Лаборатория биофотоники, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

e-mail: i.meglinski@aston.ac.uk, laz23@drexel.edu, tuchinvv@mail.ru

DOI: 10.21883/0000000000

Специальная секция журнала „Оптика и спектроскопия“ „Биофотоника“ посвящена памяти выдающегося ученого, крупного специалиста в области оптики и физики рассеяния света Владимира Леонидовича Кузьмина (1940–2025). 7 мая 2025 года Владимиру Леонидовичу исполнилось бы 85 лет. На протяжении более чем пятидесяти лет научной деятельности В.Л. Кузьмин внес фундаментальный вклад в развитие теории многократного рассеяния света, уделяя особое внимание практическому применению своих теоретических разработок для решения актуальных задач биофотоники. Владимир Леонидович получил широкое признание в научном сообществе как один из ведущих экспертов по распространению электромагнитного излучения в сильно рассеивающих средах. Его фундаментальный обзор, выполненный совместно с В.П. Романовым [1], стал основой для целого поколения исследователей в области когерентных явлений при рассеянии света в неупорядоченных системах. Теоретические разработки В.Л. Кузьмина по распространению и рассеянию света в случайно-неоднородных средах [2] заложили фундамент для современных методов оптической диагностики, нашедших широкое применение в биомедицинских приложениях.

Особое внимание заслуживает вклад В.Л. Кузьмина в развитие стохастических методов моделирования переноса излучения. В 2004 г. на основе сопоставления численного метода Монте-Карло с итерационной процедурой решения уравнения Бете.Солпитера он совместно с И.В. Меглинским разработал обобщённый подход для моделирования распространения оптических волн в случайных средах [3–5], что положило начало многочисленным исследованиям когерентных эффектов многократного рассеяния. Одной из ключевых особенностей этих работ стала возможность моделирования деполяризации оптического излучения в рассеивающих средах, что позволило с высокой точностью описывать когерентные явления [6–8], такие как усиление обратного когерентного рассеяния и флуктуации интенсивности когерентного излучения.

Значителен вклад В.Л. Кузьмина в формирование теоретических основ электродинамического моделиро-

вания рассеивающих сред, позволивших перейти от молекулярного уровня описания к макроскопическим характеристикам случайно-неоднородных сред и раскрыть природу таких явлений, как критическая опалесценция, когерентное обратное рассеяние и деполяризация света в анизотропных средах [2,9].

В 2006 г. В.Л. Кузьмин принял активное участие в организации специального выпуска журнала „Квантовая электроника“ под названием „Проблемы рассеяния лазерного излучения в фотонике и биофотонике“ [10]. Его обзор в соавторстве с И.В. Меглинским о фундаментальных проблемах численного моделирования эффектов когерентного обратного рассеяния и временных корреляций интенсивности [11], а также пионерская разработка векторного метода Монте-Карло для задач поляризационной оптической когерентной томографии (ОКТ) [12], стали важными вехами в развитии биофотоники. Представленный векторный метод активно использовался для исследования интерференционной составляющей обратного рассеяния низкокогерентного излучения [13,14], для моделирования изображений ОКТ [15,16], а также для изучения распространения световых импульсов в случайно-неоднородных средах [17].

Отдельного внимания заслуживает целая плеяда работ В.Л. Кузьмина по изучению распространения циркулярно-поляризованного излучения в сильно рассеивающих случайных средах, открытию и всестороннему изучению аномальных поляризационных эффектов, включая эффект памяти поляризации [18,19–21]. Эти исследования внесли существенный вклад в понимание поляризационных явлений при многократном рассеянии света в биологических тканях.

В 2012 г. В.Л. Кузьмин совместно с учениками и коллегами сделал важный вклад в теорию распространения светового импульса и упругих волн в полубесконечных упругих средах [22]. Им была получена точная формулировка тензорной функции Грина гармонического поля, что стало значимым шагом в описании волновых явлений и имеет высокую значимость для геофизики и сейсмического мониторинга.

Начиная с 2015 г., В.Л. Кузьмин активно участвовал в изучении и моделировании диффузных волн фотонной плотности, а также в дальнейшей разработке диффузионной волновой спектроскопии [23–25]. В последние годы его заинтересовала проблема доставки оптического излучения глубоко в мозг для решения задач лазерной терапии и оптогенетики, включая работы по оптическому просветлению биологических тканей и оптической диффузионной томографии [26–28].

Настоящая специальная секция объединяет работы, отражающие развитие направлений, заложенных Владимиром Леонидовичем, и новые идеи, вдохновлённые его научным наследием. Публикации охватывают широкий круг вопросов — от фундаментальных аспектов взаимодействия света с сильно рассеивающими средами до применения современных лазерных и фотонных технологий в биомедицине.

В работе Жаворонкова и др. выполнено численное моделирование распространения и обратного рассеяния лазерного инфракрасного излучения в многослойных биологических тканях с учётом геометрии реальных криволинейных поверхностей на примере модели головы человека. Использовано итерационное решение уравнения Бете–Солпитера в лестничном приближении в сочетании с методом Монте-Карло для расчёта многократного рассеяния света в средах с различными радиусами кривизны. Проведено сравнение результатов для моделей с плоскими и сферическими границами, показано влияние толщины и кривизны слоёв на распределение интенсивности обратно рассеянного излучения. Полученные зависимости позволяют оценивать ошибки приближения плоских моделей и демонстрируют возможности применения численного моделирования для диагностики внутричерепных повреждений и оптической томографии головы.

В работе Доронина и др. представлен новый векторный алгоритм Монте-Карло для моделирования распространения когерентного поляризованного света в рассеивающих средах с учётом интерференции, фазовой задержки и вращения поляризации при многократном рассеянии. Метод основан на отслеживании полного вектора электрического поля вдоль траектории фотонов и реализован с оптимизацией под энергоэффективные процессоры серии Apple M, что обеспечивает высокую производительность и низкое энергопотребление при моделировании в реальном времени. Алгоритм поддерживает время- и поляризационно-разрешённые режимы детектирования, обеспечивая точное воспроизведение эффектов когерентного и поляризационного рассеяния. Результаты верифицированы по аналитическому решению задачи Милна и демонстрируют высокую точность при существенном сокращении вычислительных затрат, открывая путь к созданию нового поколения инструментов численного моделирования в биомедицинской оптике и фотонике.

Работа Сергеевой и др. посвящена численному анализу влияния граничных условий и структуры кожи на точность восстановления оптических характеристик в методе оптической диффузионной спектроскопии (ОДС). С использованием моделирования Монте-Карло и аналитической модели сигналов исследованы однослойная и двухслойная (эпидермис + дерма) модели кожи при контактной и бесконтактной регистрации отражённых сигналов. Показано, что контактное зондирование обеспечивает восстановление коэффициентов поглощения и транспортного рассеяния с погрешностью не более 10%, тогда как в случае бесконтактной регистрации влияние полного внутреннего отражения и поверхностного слоя эпидермиса приводит к систематическому занижению коэффициента поглощения и завышению коэффициента рассеяния. Результаты демонстрируют необходимость учёта граничных эффектов и структуры кожи при интерпретации данных ОДС и разработке неинвазивных методов оптической диагностики.

В работе Кистенева и др. предложен усовершенствованный метод декомпозиции спектров поглощения газовых смесей неизвестного состава при произвольном числе компонент, основанный на минимизации „сложности“ спектра после удаления вклада отдельных составляющих. В качестве критерия сложности используется интегральная площадь модуля первой производной спектра, что позволяет эффективно оценивать концентрации целевых газовых примесей без предварительного знания полного состава смеси. Разработанный многомерный вариант метода уменьшения сложности спектра (multiRSC) продемонстрировал высокую устойчивость к шумам и точность восстановления концентраций малых газовых компонентов в атмосферном воздухе вплоть до уровней десятков ppb, открывая новые возможности для спектрального анализа природных и биологических газовых проб.

В работе Березина и др. экспериментально и теоретически исследованы механизмы оптического просветления кожи человека *in vivo* при воздействии 50%-го водного раствора мочевины. С использованием метода оптической когерентной томографии показано, что мочевина эффективно снижает коэффициент рассеяния в дермальном слое, обеспечивая существенное просветление ткани. Молекулярное моделирование на основе методов квантовой химии и молекулярной динамики подтвердило образование устойчивых комплексов мочевины с пептидами коллагена, сопровождающееся деструкцией водородной структуры и частичным вытеснением воды из гидратной оболочки белка. Совокупность экспериментальных и теоретических данных позволила уточнить корреляцию между энергией межмолекулярного взаимодействия и эффективностью оптического просветления, открывая перспективы целенаправленного подбора оптических агентов для биомедицинских применений.

В работе Умеренкова и др. представлен анализ влияния газотрансмиттера оксида азота (NO) на агрегационную активность тромбоцитов человека *in vitro* с использованием турбидиметрической лазерной агрегометрии. Исследовано дозо- и время-зависимое действие прямого донора NO, нитропруссида натрия, на кинетику агрегации тромбоцитов, оцененную по изменению светопропускания плазмы, обогащённой тромбоцитами. Показано, что оксид азота оказывает выраженное ингибирующее влияние на процесс агрегации уже при низких концентрациях, что связано с активацией сигнального пути NO/р-ГЦ/цГМФ/ПКГ. Результаты подтверждают перспективность использования доноров NO для коррекции нарушений агрегации тромбоцитов и демонстрируют потенциал лазерной агрегометрии как высокочувствительного оптического метода анализа микрореологических свойств крови.

В работе Платоновой и др. представлено экспериментальное исследование диффузного рассеяния света в двуслойных рассеивающих средах с использованием разработанного многоканального сапфирового волоконного зонда. Метод основан на анализе пространственно-разрешённого диффузного сигнала в стационарном режиме и позволяет определять эффективный коэффициент экстинкции неоднородных биологических сред. Для верификации подхода были изготовлены жидкостные и полиакриламидные фантомы с различной толщиной верхнего слоя и контрастом рассеяния. Показана высокая чувствительность зонда к смещению границы раздела слоёв на 1 mm и возможность детектирования внутренних включений на глубине до 3 mm. Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал использования многоканальных сапфировых зондов для неинвазивной диагностики и оптического мониторинга состояния биологических тканей.

Работа Касьяненко и др. посвящена исследованию взаимодействия ближнего инфракрасного лазерного излучения (1.45 и 1.56 μm) с аваскулярными биотканями различной толщины и изменённого коэффициента поглощения вследствие диффузии просветляющего агента — глицерина. Проведён комплексный анализ температурных и оптических откликов хрящевых образцов толщиной от 100 μm до 2 mm, соотносимых с диапазоном толщин барабанной перепонки и суставных хрящей. Установлено, что толщина порядка 500 μm является пороговой: при превышении этого значения существенно меняется динамика прошедшего излучения и тепловой ответ ткани. Показано, что варьирование длины волны и концентрации глицерина позволяет управлять глубиной и интенсивностью нагрева, а также спектральным просветлением биоткани. Полученные результаты имеют практическое значение для оптимизации параметров лазерного воздействия в реконструктивной хирургии, термопластике и оптической терапии аваскулярных тканей.

В работе Борисова и др. представлено численное исследование характеристик резонансных оптико-акустических детекторов (ОАД) с цилиндрическими резонаторами переменного сечения. На основе динамической модели показано, что увеличение радиуса резонатора в области пучности стоячей акустической волны приводит к росту амплитуды давления и, следовательно, к повышению чувствительности детектора. Полученные результаты продемонстрировали, что традиционные аналитические формулы расчёта чувствительности, применяемые для резонаторов постоянного сечения, неадекватно описывают поведение систем с переменным профилем. Разработанный подход открывает возможности для оптимизации конструкции высокочувствительных оптико-акустических спектрометров, предназначенных для анализа летучих молекулярных маркеров в выдыхаемом воздухе и экологического мониторинга.

В работе Кириллина и др. методом Монте-Карло проведено моделирование оптических характеристик многослойной среды, имитирующей биоткани пальца человека для трех длин волн зеленого, красного и ИК диапазонов, на основании которого определяется выбор оптимального расстояния источник-детектор в оптической схеме носимого устройства, предназначенного для

отражательной фотоплетизмографии и пульсоксиметрии. Такое моделирование открывает новые возможности для оптимизации конструкции носимых устройств для отражательной фотоплетизмографии и пульсоксиметрии, обладающих повышенной точностью. Вакс и др. на основе методов ТГц-спектроскопии и метаболомики развивают новый подход для поиска метаболитов-маркеров онкологических заболеваний, что актуально для раннего распознавания рака, в том числе уротелиального рака. В этой работе впервые с использованием методов ТГц-спектроскопии высокого разрешения изучен химический состав продуктов термического разложения первичных метаболитов тканей опухолей мочевого пузыря.

В работе Степанова и др. на основе метода ИК термографии получена оценка тепловых индексов перфузии кожи лица. Было исследовано влияние вводной анестезии на кинетику изменения температуры различных зон на лице, обусловленную изменением микроциркуляции. Это позволило авторам убедится в способности метода ИК термографии проводить количественную оценку локальных нарушений кровотока кожи лица.

Редакторы выражают глубокую благодарность всем авторам настоящего сборника статей за активное участие и редакции журнала „Оптика и спектроскопия“ за предоставленную возможность этой публикации и помощь в работе над сборником.

Список литературы

[1] В.Л. Кузьмин, В.П. Романов. УФН, **166**, 247–278 (1996).
[2] V.L. Kuz'min, V.P. Romanov, L.A. Zubkov. Phys. Rep., **248** (2–5), 71–368 (1994).
[3] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **97** (1), 108–115 (2004).
[4] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Письма в ЖЭТФ, **79** (3), 139–142 (2004).
[5] V.L. Kuzmin, I. Meglinski. Opt. Commun., **273** (2), 307–310 (2007).
[6] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский, Д.Ю. Чурмаков. Опт. и спектр., **98** (4), 673–679 (2005).
[7] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский, Д.Ю. Чурмаков. ЖЭТФ, **127** (6), 1–12 (2005).
[8] I. Meglinski, V.L. Kuzmin et al. Proc. Roy. Soc. A, **461**, 43–53 (2005).
[9] В.Л. Кузьмин, В.П. Романов, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **96** (1), 106–116 (2004).
[10] И.В. Меглинский, В.Л. Кузьмин, А.В. Приезжев. Квант. электрон., **36** (11), 989 (2006).
[11] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Квант. электрон., **36** (11), 990–1002 (2006).
[12] Д.Ю. Чурмаков, В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Квант. электрон., **36** (11), 1009–1015 (2006).
[13] В.Л. Кузьмин, А.Ю. Азбель, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **102** (3), 507–513 (2007).
[14] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. ЖЭТФ, **132** (2), 323–330 (2007).
[15] M. Kirillin, I. Meglinski, E. Sergeeva, V.L. Kuzmin, R. Myllyla. Opt. Expr., **18** (21), 21714–21724 (2010).
[16] I. Meglinski, M. Kirillin, V.L. Kuzmin, R. Myllylä. Opt. Lett., **33**, 1581–1583 (2008).
[17] I. Meglinski, V.L. Kuzmin. Progr. Electromag. Res. M, **16**, 47–61 (2011).
[18] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **106** (2), 294–305 (2009).
[19] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **108** (1), 105–112 (2010).
[20] В.Л. Кузьмин, И.В. Меглинский. ЖЭТФ, **137** (5), 848–860 (2010).
[21] В.Л. Кузьмин, В.П. Романов, С.В. Кожевников, И.В. Меглинский. Опт. и спектр., **100** (5), 833–841 (2006).
[22] A.Y. Val'kov, V.P. Romanov, V.L. Kuzmin, M. Nikitina, S.V. Kozhevnikov, I. Meglinski. Waves in Random and Complex Media, **22** (3), 423–434 (2012).
[23] V.L. Kuzmin, M.T. Neidrauer, D. Diaz, L.A. Zubkov. J. Biomed. Opt., **20** (10), 105006 (2015).
[24] V.L. Kuzmin, A.Yu. Val'kov, L.A. Zubkov, Yu.A. Zhavoronkov. J. Phys.: Conf. Ser., **1425**, 12173 (2019).
[25] V.L. Kuzmin, A.Yu. Valkov. JQSRT, **272**, 107760 (2021).
[26] О.В. Кравценюк, В.Л. Кузьмин, В.В. Любимов, И.В. Меглинский, Опт. и спектр., **100** (6), 1029–1036 (2006).
[27] V.V. Tuchin, P.A. Dyachenko, D.K. Tuchina, Y.A. Zhavoronkov, S.V. Ul'yanov, V.L. Kuzmin. 2024 International Conference Laser Optics, ICLO 2024 – Proceedings. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 491–491. DOI: 10.1109/iclo59702.2024.10624123
[28] P.A. Timoshina, D.K. Tuchina, Y.A. Zhavoronkov, S.V. Ul'yanov, V.L. Kuzmin, V.V. Tuchin. Academic Radiology, Special issue: Metabolic Imaging and Spectroscopy. DOI: 10.1016/j.acra.2025.10.033