

УДК 535.3, 519.85

## ПРОСТРАНСТВЕННО-СЕЛЕКТИВНАЯ СПЕКЛ-КОРРЕЛОМЕТРИЯ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Исаева<sup>а</sup>, А.В. Неустроев<sup>а</sup><sup>а</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, isanna.1987@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования методом Монте-Карло переноса излучения в средах со сложной структурой и динамикой с использованием оригинального подхода спекл-коррелометрии на основе использования локализованного источника излучения и приемника излучения с кольцевой апертурой. В качестве модельных сред рассматривались «динамические» протяженные объекты с различной геометрией и локализацией в «статическом» однородном слое, имитирующие биологические структуры с различными характеристиками микроциркуляции крови. Получены оценки коэффициента обратного рассеяния модельной среды, оцениваемого как отношение «динамических» парциальных составляющих обратно рассеянного поля к полному рассеянному полю. При этом «динамические» парциальные составляющие обратно рассеянного поля, и полное рассеянное поле регистрируются детектором с заданным набором значений радиусов кольцевых апертур. В результате анализа зависимости коэффициентов обратного рассеяния от радиусов кольцевых детекторов были определены глубины залегания «динамического» протяженного объекта для различных случаев глубины локализации объекта. Также показано, что зависимости коэффициента обратного рассеяния от радиуса кольцевого приемника излучения для сред с различными оптическими свойствами и содержащими «динамический» объект с различными геометрическими размерами могут быть описаны  $\delta$ -функцией, а наблюдаемый сдвиг пикового значения может быть обусловлен изменением показателя анизотропии рассеяния.

**Ключевые слова:** рассеяние, лазерное излучение, спеклы, модельные среды.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации.

## SPATIALLY SELECTIVE SPECKLE-CORRELOMETRY OF RANDOM INHOMOGENEOUS MEDIA: SIMULATION RESULTS

А.А. Isaeva<sup>а</sup>, А.В. Neustroev<sup>а</sup><sup>а</sup>ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, isanna.1987@mail.ru

**Abstract.** The paper deals with the results of Monte Carlo simulation of light propagation in a media with complex structure and dynamics by an original speckle-correlometry approach based on ring-like apertures and localized source of probe light. The «dynamic» lengthy objects with different geometry and depth location in the «static» inhomogeneous layer imitating biotissues with different characteristics of blood microcirculation were chosen as simulated media. The backscattering coefficient of laser light for the simulated media evaluated as a ratio of the «dynamic» partial components of the backscattered field to the full backscattered field is obtained. At the same time the «dynamic» partial components of the backscattered field and the full backscattered field are detected by the ring detector with the set value of ring aperture radius. The depth location of «dynamic» lengthy objects was determined analyzing the results of the dependence of the backscattering coefficient on the ring detector radii. It was also shown that the dependences of the backscattering coefficient on the ring detector radius in the case of probed media with different optical properties and containing the «dynamic» lengthy object with different geometric sizes can be described by the  $\delta$ -like function. But the displacement of the peak value of  $\delta$ -like function can be caused by the change of the scattering anisotropy factor.

**Keywords:** scattering, laser light, speckles, simulated media.

**Acknowledgements.** The work has been carried out under financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

### Введение

Неинвазивные методы диагностики с использованием лазерного излучения оптического диапазона широко используются в современной биомедицине. К подобным подходам следует отнести спекл-коррелометрические методы полного поля, в частности, метод LASCA (Laser Speckle Contrast Analysis), впервые предложенный Д. Брайерсом в 1996 г. [1–3]. Методы, основанные на статистическом анализе спекл-модулированных изображений поверхности объекта при его зондировании лазерным лучом, успешно применяются для исследования микрогемодинамики в поверхностных слоях внутренних органов [4–6] и процессов гемодинамики крови в капиллярах ногтевого ложа [7], процессов метаболического контроля местного кровотока в приповерхностных слоях кожи при гипертермии [8], процессов термической модификации фиброзных тканей при нагреве инфракрасным лазером [9], критических состояний границ раздела жидкой и газовой фаз в неупорядоченных пористых средах [10].

Для расширения возможностей применения спекл-коррелометрических методов, в частности, пространственно-селективной спекл-коррелометрии, в областях биомедицины необходима разработка и построение адекватных математических моделей, позволяющих проанализировать чувствительность подхода к динамическим характеристикам движущихся рассеивающих центров в анализируемой среде. В ходе работы была построена модель распределения излучения в «статической» однородной среде, содержащей протяженный «динамический» объект, с применением метода Монте-Карло и подхода спекл-коррелометрии с пространственной селекцией, и на основе построенной модели проведена оценка эффективности использования подхода для диагностики биологических тканей.

### Метод спекл-коррелометрии с пространственной селекцией

Спекл-коррелометрические методы, несмотря на ряд имеющихся преимуществ, таких как неинвазивность, быстродействие, возможность диагностики в режиме реального времени, обладают низкой разрешающей способностью по глубине зондирования, что обусловлено особенностями формирования регистрируемого излучения в результате многократного рассеяния спекл-модулированного поля. Рассеянное поле, формирующее сигнал, представляет собой суперпозицию парциальных составляющих, которые распространяются в слое на различную глубину. Парциальные составляющие несут информацию о значениях подвижности рассеивающих центров, определяющих динамические процессы, протекающие в анализируемом слое. Таким образом, регистрируемый сигнал характеризует некоторое «интегральное» значение подвижности. Подобному интегральному значению соответствует значение подвижности, полученное в результате пространственного усреднения по глубине порядка транспортной длины для рассеивающей среды, которая соответствует длине волны зондирующего излучения. Транспортная длина – расстояние в рассеивающей среде, на котором теряется информация о первоначальном направлении распространения зондирующего излучения и происходит полная рандомизация волновых векторов парциальных составляющих излучения.

В работе предложен оригинальный подход на основе использования локализованного источника зондирующего излучения и селекции парциальных составляющих рассеянного поля [11–13]. Селекция на основе использования кольцевых пространственных фильтров с различными значениями радиусов внутреннего и внешнего колец позволяет осуществлять дискриминацию парциальных составляющих, проникающих в среду на различную глубину. Идея подхода проиллюстрирована на рис. 1, на котором показано проникновение зондирующего лазерного излучения в исследуемую среду. Каждый выбранный кольцевой фильтр селективирует набор фотонов, траектории которых лежат в пределах некоторого объема, соответствующего проникновению излучения на заданную глубину. Такой объем, ограничивающий траектории совокупности парциальных составляющих рассеянного излучения, имеет форму «banana shape» [12] (рис. 1). Регистрируемое излучение, проходящее через кольцевой пространственный фильтр с большими радиусами, соответствует большей глубине.

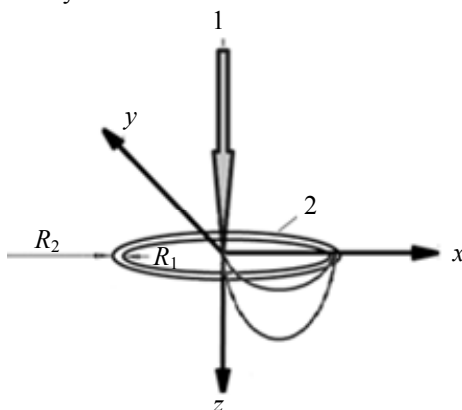


Рис. 1. Взаимная локализация источника зондирующего излучения (1) и кольцевого детектора (2):  $R_1$  – радиус внутреннего кольца детектора;  $R_2$  – радиус внешнего кольца детектора

### Результаты моделирования

В рамках настоящей работы была проведена оценка эффективности описанного выше подхода пространственно-селективной спекл-коррелометрии с использованием метода статистического моделирования (метода Монте-Карло) [14–17].

Анализ динамических и структурных свойств биотканей, в частности, кожи человека и животного, представляет определенный интерес, так как они имеют сложную многослойную структуру с различной динамикой кровотока в каждом слое. В качестве модельной среды был выбран «статический» однородный слой, содержащий протяженный «динамический» объект с различной геометрией и глубиной залегания, имитирующий кровеносный сосуд. Модель однородной среды представляла собой плоскопараллельный слой бесконечной ширины и бесконечной толщины (в масштабе размеров объекта; для упрощения расчетов толщина полагалась равной 10 000 мкм) с коэффициентами рассеяния  $\mu_s = 0,01 \text{ мкм}^{-1}$  и поглощения  $\mu_a = 10^{-11} \text{ мкм}^{-1}$  и параметром анизотропии ( $g = 0,3$  или  $g = 0,85$ ). Протяженный «динамический» объект представлял собой бесконечный круговой цилиндр, ось которого параллельна верхней границе однородной среды, с глубинами залегания  $d_{cil} = 500 \text{ мкм}$  и  $d_{cil} = 700 \text{ мкм}$  и радиусами оснований  $R_{cil} = 10 \text{ мкм}$  и  $R_{cil} = 100 \text{ мкм}$  (рис. 2). Радиусы «динамического» объекта были выбраны на основе анализа данных, опубли-

ликованных в литературе, согласно которым средний радиус кровеносного капилляра составляет 8–10 мкм, а артериол и посткапиллярных венул – примерно 50–150 мкм.

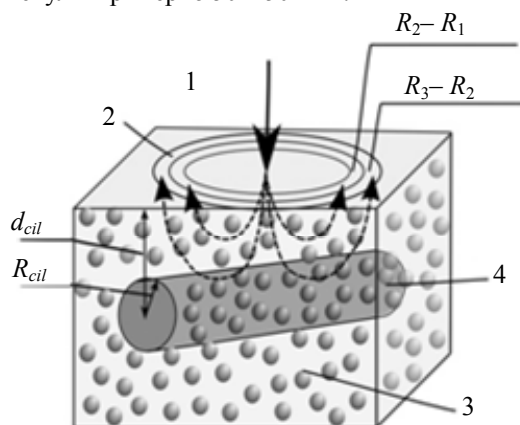


Рис. 2. Моделируемая среда и распространение излучения. Среда представлена большим количеством рассеивателей: 1 – локализованный источник зондирующего излучения (например, сфокусированный лазерный пучок); 2 – участок поверхности зондируемой среды, с которого с помощью кольцевой апертуры выделяется детектируемый оптический сигнал ( $R_1, R_2, R_3$  – радиусы кольцевой апертуры детектора); 3 – слой, содержащий «статические» рассеиватели; 4 – протяженный объект, содержащий «динамические» рассеиватели ( $R_{cil}$  – радиус протяженного объекта,  $d_{cil}$  – глубина залегания протяженного объекта)

С учетом того, что при регистрации спекл-модулированного изображения время экспозиции превышает время корреляции, парциальные составляющие, достигшие заданного «динамического» объекта, состоящего на 100% из подвижных рассеивателей, и испытавшие даже однократное взаимодействие с рассеивателями, вносили вклад в формирование регистрируемых динамических спеклов. При этом детектирование сигнала осуществлялось с поверхности исследуемой среды с учетом радиуса кольцевого детектора. Как было отмечено выше, изменение радиуса кольцевого детектора позволяет осуществлять селекцию регистрируемого обратно рассеянного излучения, проходящего на различную глубину в среде. Кольцевые детекторы с большими радиусами регистрируют излучение, прошедшее на большую глубину. Коэффициент обратного рассеяния в зависимости от среднего радиуса кольцевого детектора оценивался как

$$R_{bs}(r_d) = \frac{I_{dyn}(r_d)}{I_{dyn+stat}(r_d)}, \quad (1)$$

где  $r_d = \frac{R_N + R_{N-1}}{2}$  – средний радиус кольцевого детектора;  $R_N$  – значения внешних радиусов детектора;  $R_{N-1}$  – значения внутренних радиусов детектора;  $I_{dyn}(r_d)$  – интенсивность, пропорциональная числу фотонов, испытавших столкновения с «динамическими» рассеивателями и зарегистрированных детектором с радиусом  $r_d$ ;  $I_{dyn+stat}(r_d)$  – интенсивность, пропорциональная сумме фотонов, испытавших столкновения с «динамическими» и со «статическими» рассеивателями и зарегистрированных детектором с радиусом  $r_d$ . Зависимости коэффициента обратного рассеяния от расстояния между источником и детектором для различных параметров среды и геометрических размеров «динамического» объекта, рассчитанные по формуле (1) с использованием данных, полученных методом численного моделирования, представлены на рис. 3, 4.

Наблюдается немонотонная зависимость коэффициента обратного рассеяния от радиуса кольцевого детектора, при этом положение максимума кривой зависимости коэффициента обратного рассеяния, рассчитанного по результатам моделирования, определяется глубиной залегания протяженного «динамического» объекта в зондируемой среде [18] как

$$d_{cil} \approx \frac{r_d}{2\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Значения радиусов кольцевого детектора, рассчитанные по формуле (2) на основе результатов моделирования, полученных методом Монте-Карло, представлены в таблице.

Зависимости коэффициента обратного рассеяния от расстояния между источником и детектором для различных параметров среды и геометрических размеров «динамического» объекта (рис. 3, 4) могут быть интерпретированы как отклик среды на сигнал, описываемый  $\delta$ -функцией, при этом наблюдаемый сдвиг пикового сигнала может быть обусловлен изменением показателя анизотропии рассеяния.

Показатель анизотропии среды $g$	Глубина залегания и радиус протяженного «динамического» объекта, $d_{cil}$ , мкм и $R_{cil}$ , мкм		Глубина залегания протяженного «динамического» объекта, $d_{cil}^{модел}$ , мкм
$g = 0,3$	$R_{cil} = 10$	$d_{cil} = 500$	$d_{cil}^{модел} = 498$
		$d_{cil} = 700$	$d_{cil}^{модел} = 629$
	$R_{cil} = 100$	$d_{cil} = 500$	$d_{cil}^{модел} = 498$
		$d_{cil} = 700$	$d_{cil}^{модел} = 618$
$g = 0,85$	$R_{cil} = 10$	$d_{cil} = 500$	$d_{cil}^{модел} = 542$
		$d_{cil} = 700$	$d_{cil}^{модел} = 650$
	$R_{cil} = 100$	$d_{cil} = 500$	$d_{cil}^{модел} = 553$
		$d_{cil} = 700$	$d_{cil}^{модел} = 629$

Таблица. Значения глубин залегания протяженного «динамического» объекта, полученные по результатам моделирования, для различных параметров моделируемого протяженного «динамического» объекта

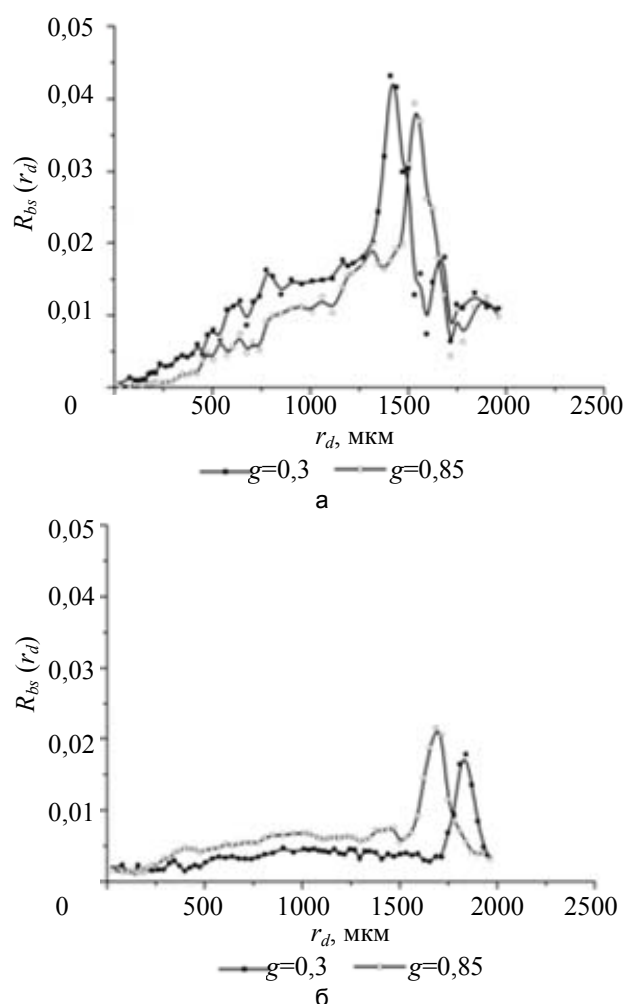


Рис. 3. Зависимость коэффициента обратного рассеяния от расстояния между детектором и источником для случая анизотропного рассеяния  $g = 0,85$  и изотропного рассеяния  $g = 0,3$  в однородной «статической» среде с глубинами залегания «динамического» объекта:  $d_{cil} = 500$  мкм (а) и  $d_{cil} = 700$  мкм (б) и радиусом  $R_{cil} = 10$  мкм

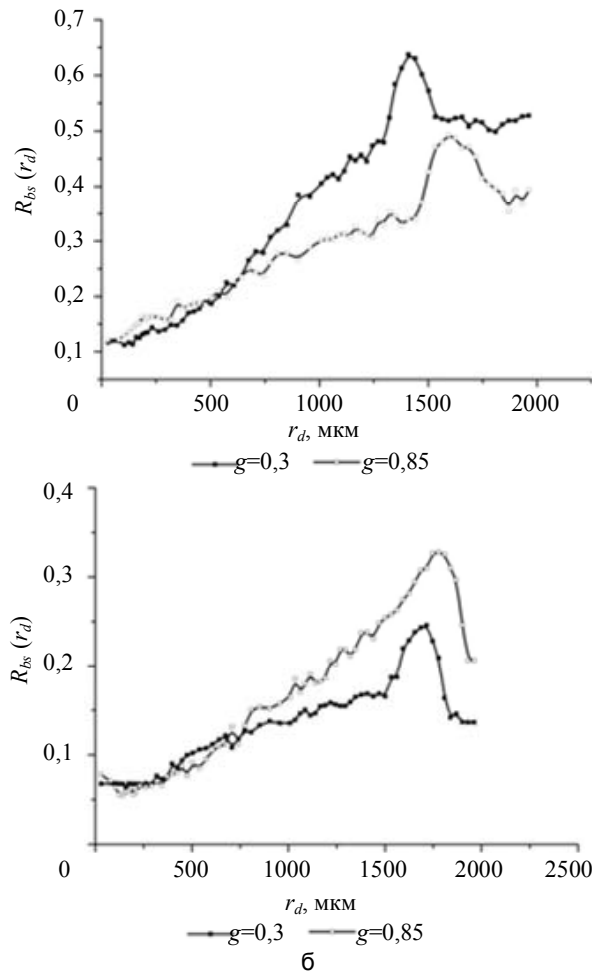


Рис. 4. Зависимость коэффициента обратного рассеяния от расстояния между детектором и источником для случая анизотропного рассеяния  $g = 0,85$  и изотропного рассеяния  $g = 0,3$  в однородной «статической» среде с глубинами залегания «динамического» объекта:  $d_{cil} = 500$  мкм (а) и  $d_{cil} = 700$  мкм (б) и радиусом «динамического» объекта  $R_{cil} = 100$  мкм

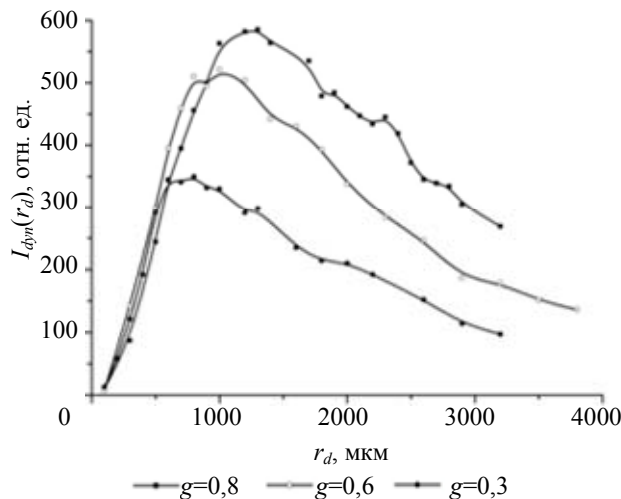


Рис. 5. Зависимость интенсивности составляющей рассеянного излучения, пропорциональной числу фотонов, испытавших столкновения с «динамическими» рассеивателями, от радиуса кольцевого детектора  $r_d$  для «статической» среды с различными показателями анизотропии, содержащей бесконечно протяженный плоский «динамический» объект [19]

Результаты моделирования, представленные в [19] для бесконечно протяженного плоского «динамического» объекта в «статическом» однородном слое, подобного сечению параллельно оси цилиндриче-

ского протяженного объекта, также демонстрируют зависимость парциальных компонент рассеянного излучения, испытавших столкновения с «динамическими» рассеивателями, от показателей анизотропии (рис. 5). Погрешность анизотропии обусловлена увеличением рандомизации направлений распространения фотонов в зондируемой среде, что вызывает смещение пика доли «динамических» фотонов (рис. 6).

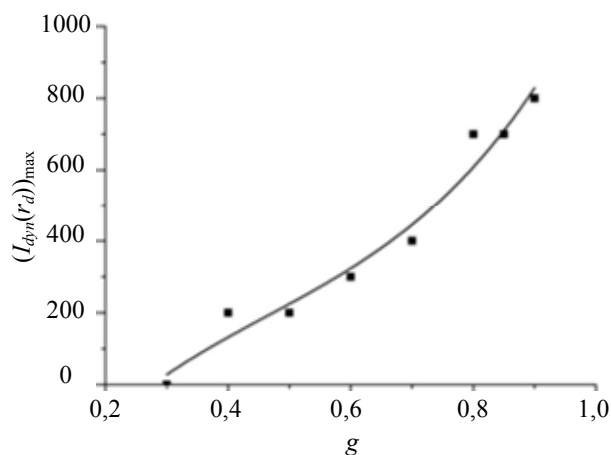


Рис. 6. Влияние показателя анизотропии среды на смещение максимума интенсивности составляющей рассеянного излучения, пропорциональной числу фотонов, испытавших столкновения с «динамическими» рассеивателями [19]

### Заключение

Анализируя зависимости коэффициента обратного рассеяния от радиуса кольцевого детектора для случая изотропного и анизотропного рассеяния в однородной «статической» среде, содержащей «динамический» протяженный объект с различной глубиной залегания, следует отметить следующее.

1. Наблюдается уширение динамического отклика среды на падающий сигнал, описываемый  $\delta$ -функцией, при условии увеличения радиуса цилиндрического «динамического» объекта, и возрастание доли парциальных составляющих обратного рассеянного излучения, испытавших динамическое рассеяние.
2. Наблюдается сдвиг пикового значения динамического отклика среды в условиях изотропного ( $g = 0,3$ ) и анизотропного рассеяния ( $g = 0,85$ ).

Исходя из зависимостей коэффициента обратного рассеяния излучения с учетом «динамических» и «статических» парциальных составляющих поля, полученных на основе подхода с селекцией многократно рассеянного излучения с использованием пространственных кольцевых фильтров с различными значениями внешнего и внутреннего радиусов, можно получить оценку глубины проникновения излучения и, соответственно, определить глубину залегания протяженного объекта, отличающегося от окружающей случайно-неоднородной среды своими характеристиками подвижности.

Таким образом, полученные результаты могут быть использованы при развитии метода калибровки спекл-коррелометрии полного поля с пространственной кольцевой фильтрацией регистрируемого излучения и демонстрируют возможность интерпретации результатов визуализации и диагностики биологических тканей.

### Литература

1. Briers J.D. Webster S. Laser speckle contrast analysis (LASCA): a non-scanning, full-field technique for monitoring capillary blood flow // *Journal of Biomedical Optics*. 1996. V. 1. N 2. P. 174–179.
2. Briers J.D. Laser Doppler and time-varying speckle: a reconciliation // *Journal of Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1996. V. 13. N 2. P. 345–350.
3. Richards G. and Briers J.D. Capillary blood flow monitoring using laser speckle contrast analysis (LASCA): improving the dynamic range // *Proc. of SPIE*. 1997. V. 2981. P. 160–171.
4. Зимняков Д.А., Хмара М.Б., Виленский М.А., Козлов В.В., Садовой А.В., Горфинкель И.В., Здражевский Р.А., Исаева А.А. Спекл-корреляционный мониторинг микрогемодинамики внутренних органов // *Оптика и спектроскопия*. 2009. Т. 107. № 6. С. 941–947.
5. Skipetrov S.E., Maynard R. Dynamic multiple scattering of light in multilayer turbid media // *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. 1996. V. 217. N 2–3. P. 181–185.
6. Boas D.A., Dunn A.K. Laser speckle contrast imaging in biomedical optics // *Journal of Biomedical Optics*. 2010. V. 15. N 1. Art. 011109.
7. Виленский М.А., Агафонов Д.Н., Зимняков Д.А., Тучин В.В., Здражевский Р.А. Спекл-корреляционный анализ микрокапиллярного кровотока ногтевого ложа // *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 4. С. 324–328.

8. Roustit M., Millet C., Blaise S., Dufournet B., Cracowski J.L. Excellent reproducibility of laser speckle contrast imaging to assess skin microvascular reactivity // *Microvascular Research*. 2010. V. 80. N 3. P. 505–511.
9. Зимняков Д.А., Свиридов А.П., Кузнецова Л.В., Баранов С.А., Игнатъева Н.Ю., Лунин В.В. Анализ кинетики термической модификации биотканей методом спекл-коррелометрии // *Журнал физической химии*. 2007. Т. 81. № 4. С. 725–731.
10. Зимняков Д.А., Садовой А.В., Виленский М.А., Захаров П.В., Миллюля Р. Критическое поведение границ раздела фаз в пористых средах: анализ масштабных свойств с использованием некогерентного и когерентного света // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2009. Т. 135. № 2. С. 351–368.
11. Boas D.A., Yodh A.G. Spatially varying dynamical properties of turbid media probed with diffusing temporal light correlation // *Journal of Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 1997. V. 14. N 1. P. 192–215.
12. Lemieux P.-A., Vera M.U., Durian D.J. Diffusing-light spectroscopies beyond the diffusion limit: the role of ballistic transport and anisotropic scattering // *Physical Review E*. 1998. V. 57. N 4. P. 4498–4515.
13. Зимняков Д.А., Исаева А.А., Исаева Е.А., Ушакова О.В., Здражевский Р.А. О спекл-коррелометрическом методе оценки транспортного коэффициента рассеяния случайно-неоднородных сред // *Письма в журнал технической физики*. 2012. Т. 38. № 20. С. 43–49.
14. Wang L., Jacques S.L., Zheng L. MCML-Monte Carlo modeling of light transport in multi-layered tissues // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 1995. V. 47. N 2. P. 131–146.
15. Воробьева Е.А., Гуров И.П. Модели распространения и рассеяния оптического излучения в случайно-неоднородных средах. В кн. *Проблемы когерентной и нелинейной оптики* / Под ред. И.П. Гурова, С.А. Козлова. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2006. С. 82–98.
16. Kuzmin V.L., Meglinski I.V. Coherent multiple scattering effects and Monte Carlo method // *JETP Letters*. 2004. V. 79. N 3. P. 109–112.
17. Berrocal E., Sedarsky D.L., Paciaroni M.E., Meglinski I.V., Linne M.A. Laser light scattering in turbid media Part I: Experimental and simulated results for the spatial intensity distribution // *Optics Express*. 2007. V. 15. N 17. P. 10649–10665.
18. Feng S., Zeng F.-A., Chance B. Photon migration in the presence of a single defect: a perturbation analysis // *Applied Optics*. 1995. V. 34. N 19. P. 3826–3837.
19. Isaeva A.A., Zimnyakov D.A. Full-field speckle analysis of spatially heterogeneous scatter dynamics with the improved depth resolution in stratified random media // *Proc. of SPIE*. 2011. V. 8338. Art. 83380Y1.

**Исаева Анна Андреевна**

– кандидат физико-математических наук, ассистент кафедры, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, isanna.1987@mail.ru

**Неустроев Артем Вячеславович**

– студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, neustroev.artiom@yandex.ru

**Anna A. Isaeva**

– PhD, assistant, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, isanna.1987@mail.ru

**Artem V. Neustroev**

– student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, neustroev.artiom@yandex.ru

*Принято к печати 06.10.14*

*Accepted 06.10.14*