

## ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 535.016, 535.361, 535.393

# Локализованные световые потоки от несферических радиально симметричных диэлектрических микрочастиц

Ю.Э. Гейнц, А.А. Землянов, Е.К. Панина\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 4.02.2015 г.

Представлены результаты численного моделирования ближнего поля рассеяния световой волны (область «фотонной (нано)струи» – ФС) на диэлектрических непоглощающих радиально симметричных частицах микронных размеров. Показано, что кварцевые микрочастицы различной пространственной формы и ориентации формируют ФС с различными размерными и амплитудными характеристиками. Фотонные струи от полусфер обладают высокой протяженностью, но относительно невысокой интенсивностью. Использование конических частиц может дать существенное увеличение протяженности ФС до величин порядка двух десятков длин волн падающего излучения.

*Ключевые слова:* фотонная струя, метод численной электродинамики, радиально симметричные частицы; *photonic jet, method of computational electrodynamics, radially symmetric particles.*

### Введение

Изолированные диэлектрические микросферы активно изучаются и широко применяются в лазерной физике и дифракционной оптике. К настоящему времени в научной литературе накоплен большой объем теоретической и экспериментальной информации по исследованию ближнеполевой структуры падающей световой волны при рассеянии излучения на сферических частицах. Более простая технология создания сферических частиц с требуемыми размерами и контролируемой внутренней структурой делает их востребованными объектами при решении ряда практических задач.

Обладая высокой пространственной симметрией, сферические частицы, имеющие размеры порядка длины волны падающего излучения, могут создавать в области ближнего поля протяженные локализованные световые потоки высокой интенсивности – так называемые фотонные (нано)струи (ФС) [1]. Характерной особенностью ФС является ее высокая интенсивность при существенной пространственной локализации светового поля. Так, протяженность ФС от микросфер может достигать десятков длин волн излучения, а поперечный размер струи в ряде случаев становится ниже дифракционного предела [2]. Вместе с тем пространственная форма и интенсивность ФС весьма чувствительны к изменению размера и оптических свойств микросферы. В работе [3] наглядно показано, что варьирование данных параметров позволяет суще-

ственным образом удлинить ФС либо повысить ее пиковую интенсивность.

Развитие оптических технологий ведет к необходимости дальнейшего улучшения характеристик ФС (увеличение длины, повышение пространственного разрешения), а соответственно, к поиску новых способов формирования ФС с заданными параметрами. Продолжается исследование традиционных однородных микросфер, но в иной конфигурации формирования ФС, например, путем возбуждения структурных резонансов оптического поля микросфер [4–6] или использования острофокусированных лазерных пучков [7, 8]. Особое внимание уделяется изучению ФС от частиц с оптически неоднородной внутренней структурой (многослойных частиц) [3, 9].

В последнее десятилетие в дифракционной оптике все большее применение находят миниатюрные оптические элементы, имеющие пространственную форму, отличную от сферической, например микроконусы [10], микропирамиды [11], микродиски [12], микрокубоиды [13]. Подобные мезомасштабные объекты также могут модифицировать пространственную структуру падающего на них излучения и создавать локализованные световые потоки. В связи с этим интересным представляется исследование ФС, образованных микрочастицами различных пространственных форм, но одинаковых оптических свойств, облучаемых излучением с длиной волны  $\lambda = 0,532$  мкм. Именно этот вопрос и рассматривается в настоящей статье.

Нами представлены результаты теоретических исследований пространственных и амплитудных характеристик ФС, формируемых в окрестности несферических частиц. Основная идея, предложенная

\* Юрий Эльмарович Гейнц (ygeints@iao.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Екатерина Константиновна Панина (pek@iao.ru).

в работе, заключается в выявлении наиболее «выигрышных» моделей с точки зрения формирования высокоинтенсивных локализованных световых потоков, а также в сравнении полученных результатов с классическим случаем формирования ФС от изолированной слабопоглощающей микросферы.

## Метод дискретной дипольной аппроксимации

Для численного расчета пространственной структуры оптических полей в окрестности микро-частиц нами был применен метод дискретной дипольной аппроксимации (ДДА) [14–16]. В отличие от формул Ми [17] метод ДДА позволяет решить задачу рассеяния световой волны на объектах различных пространственных форм, а не только эллипсоидах и сферах.

Основным отличием метода ДДА от других подобных методик [18, 19] является то, что при проведении процедуры дискретизации рассеивающего свет объекта на заданное число элементарных поляризуемых частей  $N_d$  они считаются электрическими диполями, закон излучения которых известен. Таким образом, если известна амплитуда возбуждающего диполь электромагнитного поля, то можно определить и отклик данного конкретного диполя и так же поступить со всеми остальными диполями. Результирующее значение поля будет суперпозицией внешнего поля и поля, составленного всеми элементарными диполями объема рассеивающего излучения объекта с учетом взаимодействия диполей между собой. Для примера на рис. 1 показана комбинированная частица, представляющая собой усеченный конус, дополненный полусферой слева, смоделированная нами с использованием метода ДДА.

Впервые метод ДДА в современной формулировке с учетом эффекта временного запаздывания полей от элементарных диполей был предложен в 1973 г. в работе [14], авторы которой использовали данный подход для расчета характеристик рассеяния частиц межзвездной пыли. Наибольшее развитие метод ДДА получил в исследованиях

В. Draine и Р. Flatau [15, 16] в плане уточнения вида функции поляризуемости среды (учет магнитной составляющей) и расширения области применения ДДА на объекты с анизотропией оптических свойств, а также с периодической внутренней структурой.

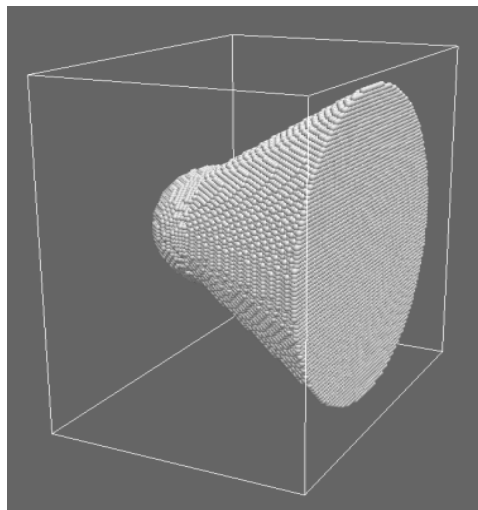


Рис. 1. Рассеивающий излучение объект (усеченный конус + полусфера) в дипольном представлении

Подробное математическое описание метода ДДА приведено, например, в [15].

## Характеристика ФС от микро-частиц

Фотонную струю как локализованную световую структуру принято характеризовать следующими размерными параметрами: длина  $L$ , полуширина  $R$ , удаленность максимума интенсивности ФС от поверхности частицы  $d$ . Амплитудной характеристикой ФС является величина пиковой (относительной) интенсивности  $B_{\max}$  оптического поля в области ближней зоны рассеяния. Данные характеристики определены на рис. 2, б при рассмотрении пространственных профилей интенсивности оптического поля в области внешнего фокуса кварцевой полусферы.

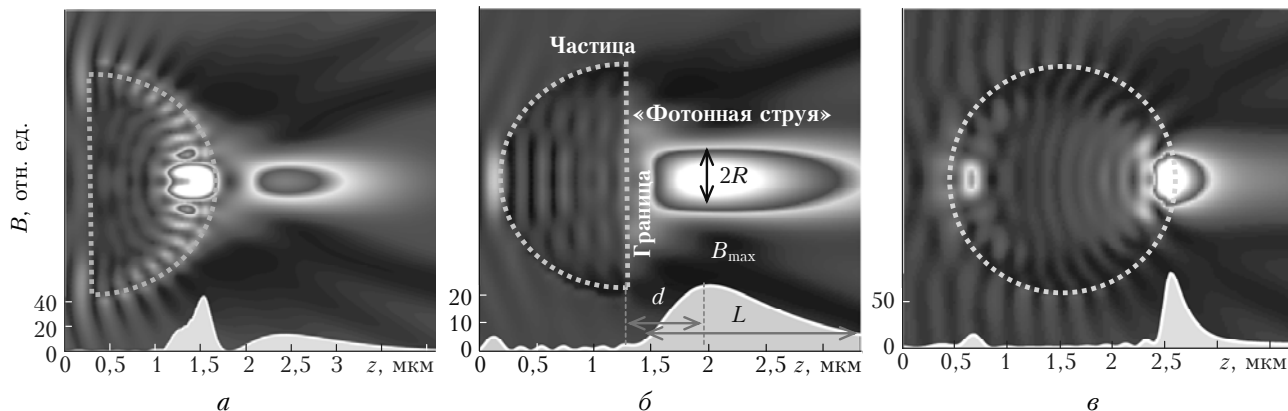


Рис. 2. Тоновые распределения относительной интенсивности оптического поля  $V(y, z)$  в окрестности кварцевых частиц радиусом  $a_0 = 1$  мкм, освещенных лазерным излучением с  $\lambda = 0,523$  мкм. Излучение падает слева. Интенсивность на каждом рисунке нормирована на свое максимальное значение

Продольный профиль интенсивности получен сечением двумерного распределения  $V(y, z)$  прямой  $y = 0$ , а поперечный профиль — прямой, параллельной оси  $y$  и проходящей через точку абсолютного максимума интенсивности  $V_{\max}$  в ФС. Ширину главного максимума вдоль оси  $z$ , определенную по уровню  $1/e^2$ , примем за длину фотонной струи  $L$ . Аналогично определим и характерную полуширину фотонного потока  $R$ .

Серия тоновых изображений на рис. 2 иллюстрирует эффект формирования ФС в окрестности полусфер, различно ориентированных относительно падающего излучения (рис. 2, *a, б*), а также однородной сферической частицы радиусом  $a_0 = 1$  мкм (рис. 2, *в*). Для удобства восприятия цветовая шкала на рисунках с двумерными профилями интенсивности  $V = I(y, z)/I_0$  ( $I_0$  — интенсивность падающей световой волны) выбрана одинаковая. Здесь и в дальнейшем рассматриваются кварцевые непоглощающие частицы с показателем преломления  $n = 1,5$ , находящиеся в воздухе и освещенные лазерным излучением с  $\lambda = 0,532$  мкм.

Сравнение рис. 2, *a, б, в* показывает, что в зависимости от типа частиц меняются не только размер и интенсивность ФС, но и ее удаленность от поверхности. «Правая» полусфера (см. рис. 2, *a*) формирует достаточно протяженную, но слабоинтенсивную ФС. Координата максимума интенсивности фотонного потока для «правой» полусферы удаляется от частицы, что визуально воспринимается как отрыв струи от ее поверхности. Согласно принятой нами ранее классификации [20], это фотонные струи «факельного» типа. Следует заметить, что частица подобной конфигурации фокусирует падающее излучение главным образом внутри своего объема.

Несомненным преимуществом ФС от «левой» полусферы (см. рис. 2, *б*) является ее аномально высокая протяженность ( $L \sim 4,5\lambda$ ), в шесть раз превышающая длину ФС от эталонной сферы ( $L = 0,4$  мкм  $\sim 0,75\lambda$ ). Положение полусфер относительно падающего излучения практически не влияет на поперечный размер струи ( $R \sim 0,56\lambda$ ).

Отличие в значениях  $R$ , измеренных в точке максимума интенсивности ФС, — не более 5%.

Использование сферы, обладающей, безусловно, лучшими фокусирующими свойствами (см. рис. 2, *в*) позволяет получать локализованные световые потоки без отрыва от поверхности (ФС «кинжального» типа). Несмотря на то что длина таких ФС невелика, выигрыш в интенсивности несомненный. Значение  $V_{\max}$  в четыре раза превышает аналогичные значения интенсивности для полусфер и составляет 81.

Далее рассмотрим, как модифицируется вид ФС при замене полусферы на микроаксикон равного поперечника. Результаты численных расчетов представлены на серии графических изображений (рис. 3). Ориентация микрочастицы относительно падающего излучения менялась (рис. 3, *б, в*), поскольку, как и в случае с полусферами, ожидалось, что это повлечет за собой изменение фокусирующих свойств микроконуса, связанное с различной деформацией волнового фронта излучения, падающего на частицу, и, как следствие, характеристик поля в области ФС.

Уже из качественного анализа рис. 3, *б, в* видно, как меняется характер распределения поля внутри и вне аксиконной частицы при изменении ее ориентации. В случае, когда аксикон освещается лазерным излучением со стороны основания (см. рис. 3, *б*), поле локализуется главным образом внутри него, а вытекающий световой поток, хотя и протяженный ( $\sim 5\lambda$ ), но малоинтенсивный ( $V_{\max} \sim 10,7$ ). При зеркальной конфигурации микроконуса («обратного» аксикона) (см. рис. 3, *в*) фотонная струя «отрывается» от задней поверхности частицы, формируя зону высокой пространственной локализации на достаточном удалении от нее ( $d \approx 2\lambda$ ). Численные оценки показали, что подобная ориентация частицы не дает значительного выигрыша в интенсивности, однако позволяет существенно увеличить длину ФС ( $L \sim 10\lambda$ ).

Следует заметить, что в данной статье не рассматривался вопрос об изменении параметров микроаксикона (высоты  $L_a$  и диаметра основания  $D_l$ ). При расчетах размер частицы был фиксированным и соответствовал  $L_a = 1/2D_l$ .

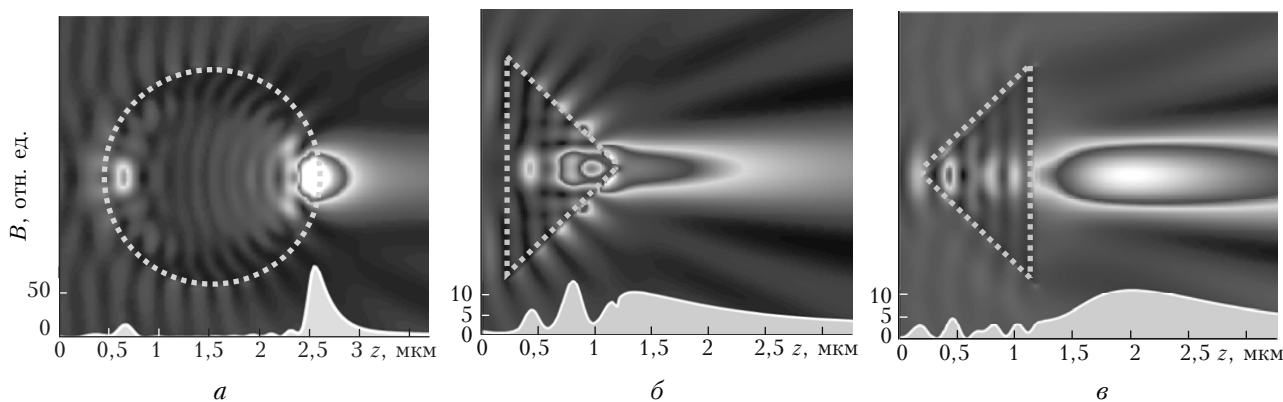


Рис. 3. Тоновые распределения относительной интенсивности оптического поля  $V(y, z)$  в окрестности кварцевых сферических частиц радиусом  $a_0 = 1$  мкм (*a*) и аксиконных частиц радиусом основания  $D_l = 1$  мкм (*б, в*), освещенных лазерным излучением с  $\lambda = 0,523$  мкм

В настоящее время активно ведутся разработки лазерных методов манипулирования атомами и молекулами вещества, в частности создание «лазерных ножниц» и «лазерного пинцета» [21, 22]. В [23, 24] показано, что перемещением фокуса линзы можно передвигать частицы, выстраивая из них самые разнообразные конструкции. Здесь важно максимально удлинить области фокусировки оптического поля, чтобы реализовать возможность манипулирования сразу группой целевых микрообъектов. Однако при решении задач, связанных с микрообработкой отверстий [25, 26], управлением микро- и наночастицами [4, 27], требуется получение субмикронных струй с поперечным размером, приближающимся к дифракционному пределу  $R \sim \lambda/2$ . Соответственно, возникает проблема уменьшения поперечного размера ФС при сохранении ее длины.

Возможным решением данной проблемы является создание комбинированной частицы, где в качестве «родительской» частицы используется микроаксикон с его способностью формировать длинные ФС. Добавление полусферы к аксикону позволяет осуществить дополнительную фокусировку падающего излучения за счет собирания и концентрирования оптических потоков, что предположительно повысит пиковую интенсивность  $V_{\max}$  и уменьшит ширину ФС.

Серия тоновых распределений относительной интенсивности лазерного излучения в окрестности комбинированных осесимметричных кварцевых микрочастиц с радиусом основания аксикона  $a_0 = 1$  мкм представлена на рис. 4. Как и ранее, интенсивность на каждом графике нормирована на свое максимальное значение. Размерные параметры аксиконов соответствуют случаям, показанным на рис. 3.

Как следует из рис. 4, длина ФС для комбинированных частиц существенно меньше по сравнению с соответствующим случаем рассеяния излучения на изолированном аксиконе. Интенсивность  $V_{\max}$  в фотонном потоке при этом увеличивается в несколько раз. Более того, не только меняется

пространственный размер ФС, но и исчезает ее удаленность от поверхности. Струя как бы прилипает к внешней оболочке сложной частицы, «вытекая» из нее в форме экспоненциально затухающего хвоста. Тип ФС меняется с «факельного» (см. рис. 3, в) на «кинжальный» (см. рис. 4) [20].

В отличие от частицы, приведенной на рис. 4, а, осесимметричная диэлектрическая частица, представляющая собой «обратный» аксикон, дополненный полусферой справа (см. рис. 4, б), является наиболее выигрышной конфигурацией с точки зрения формирования в области ближнего поля рассеяния локализованных световых потоков более высокой интенсивности.

## Заключение

Рассмотренные выше примеры дифракционных структур, образующихся в ближней зоне рассеяния светового излучения на диэлектрических однородных кварцевых микрочастицах различной пространственной формы, а также комбинированных частиц («обратный» аксикон + полусфера), указывают на различие пространственных форм ФС.

Фотонные струи от полусфер обладают высокой протяженностью, но при этом невысокой интенсивностью. Реализация конической фокусировки на аксиконах позволяет локализовать оптические поля в аномально протяженные области, однако при этом пиковая интенсивность ФС более низкая, а ширина фотонного потока большая по сравнению со сферой.

Более выигрышными с точки зрения улучшения мощностных характеристик ФС являются комбинированные частицы, представляющие собой «обратный» аксикон, дополненный справа полусферой. Сферическая поверхность осуществляет более резкую фокусировку оптического поля, что приводит к повышению интенсивности в области ФС в несколько раз, но всегда сопровождается сокращением протяженности струи. Поперечный размер таких световых потоков  $\sim \lambda/2$ .

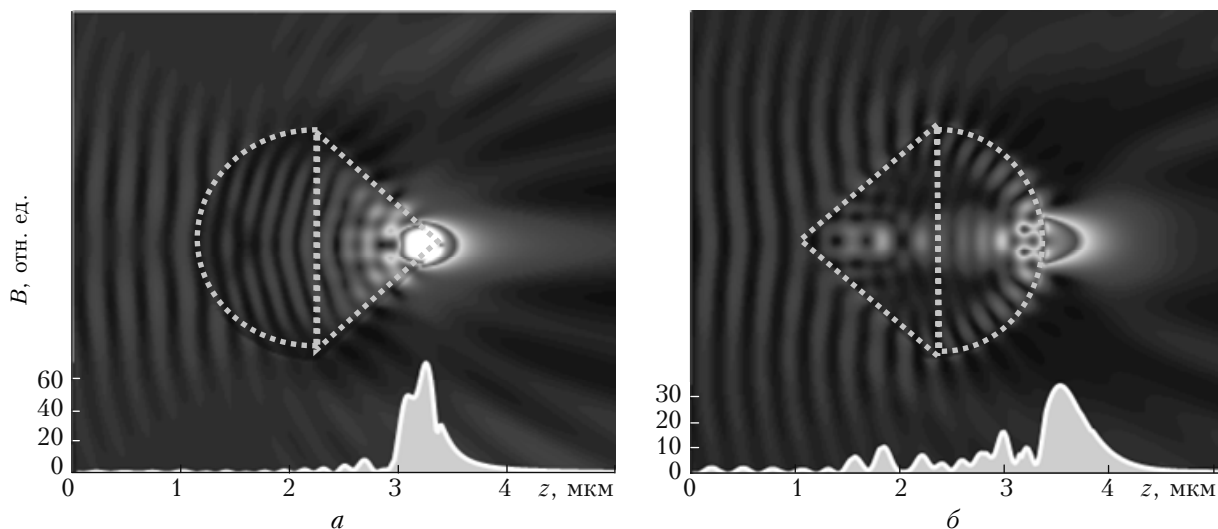


Рис. 4. Тоновые распределения относительной интенсивности оптического поля  $V(y, z)$  в окрестности комбинированных кварцевых частиц радиусом  $a_0 = 1$  мкм, освещенных лазерным излучением с  $\lambda = 0,523$  мкм

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов».

1. *Chen Z., Taflove A., Backman V.* Photonic nanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles: A potential novel visible-light ultramicroscopy technique // *Opt. Express*. 2004. V. 12, N 7. P. 1214–1220.
2. *Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A.* Control over parameters of photon nanojets of dielectric microspheres // *Opt. Commun.* 2010. V. 283, N 23. P. 4775–4781.
3. *Geints Yu.E., Panina E.K., Zemlyanov A.A.* A photonic nanojet calculations in layered radially-inhomogeneous micrometer-sized spherical particles // *J. Opt. Soc. Amer. B*. 2011. V. 28, N 8. P. 1825–1830.
4. *Heifetz A., Simpson J.J., Kong S.-C., Taflove A., Backman V.* Subdiffraction optical resolution of a gold nanoparticle located within the nanojet of a Mie-resonant dielectric microsphere // *Opt. Express*. 2007. V. 15, N 25. P. 17334–17342.
5. *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K.* Photonic jets from resonantly-excited transparent dielectric microspheres // *J. Opt. Soc. Amer. B*. 2012. V. 29, iss. 4. P. 758–762.
6. *Geints Yu.E., Zemlyanov A.A., Panina E.K.* Photonic jet shaping of mesoscale dielectric spherical particles: Resonant and non-resonant jet formation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013. V. 126. P. 44–49.
7. *Devilez A., Bonod N., Stout B., Gerard D., Wenger J., Rigneault H., Popov E.* Three-dimensional subwavelength confinement of light with dielectric microspheres // *Opt. Express*. 2009. V. 17, N 4. P. 2089–2094.
8. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К.* Особенности формирования фотонной струи вблизи поверхности сферических микрочастиц при облучении их сфокусированным световым пучком // *Оптика атмосф. и океана*. 2014. Т. 27, № 11. С. 989–994.
9. *Kong S.-C., Taflove A., Backman V.* Quasi one-dimensional light beam generated by a graded-index microsphere // *Opt. Express*. 2009. V. 17, N 5. P. 3722–3731.
10. *Kotlyar V.V., Stafeev S.S.* Modeling the sharp focus of a radially polarized laser mode using a conical and a binary microaxicon // *J. Opt. Soc. Amer. B*. 2010. V. 27, N 10. P. 1991–1997.
11. *Martin J., Proust J., Gérard D., Bijeon J.-L., Plain J.* Intense Bessel-like beams arising from pyramid-shaped microtips // *Opt. Lett.* 2012. V. 37, iss. 7. P. 1274–1276.
12. *McCloskey D., Wang J.J., Donegan J.F.* Low divergence photonic nanojets from Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microdisks // *Opt. Express*. 2012. V. 20, N 1. P. 128–140.
13. *Kotlyar V.V., Stafeev S.S., Feldman A.* Photonic nanojets generated using square-profile microsteps // *Appl. Opt.* 2014. V. 53, iss. 24. P. 5322–5329.
14. *Purcell E.M., Pennypacker C.R.* Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains // *Astrophys. J.* 1973. V. 186. P. 705–714.
15. *Draine B.T., Flatau P.J.* Discrete-dipole approximation for scattering calculations // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 1994. V. 11, N 4. P. 1491–1499.
16. *Draine B.T., Flatau P.J.* Discrete-dipole approximation for periodic targets: Theory and tests // *J. Opt. Soc. Amer. A*. 2008. V. 25, N 11. P. 2693–2703.
17. *Борен К., Хафмен Д.* Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
18. *Harrington R.* Origin and development of the method of moments for field computation // *IEEE Antennas Propag. Mag.* 1990. V. 32, N 3. P. 31.
19. *Goedecke G.H., O'Brien S.G.* Scattering by irregular inhomogeneous particles via the digitized Green's function algorithm // *Appl. Opt.* 1988. V. 27, N 12. P. 2431–2438.
20. *Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Панина Е.К.* Сравнительный анализ пространственных форм фотонных струй от сферических диэлектрических микрочастиц // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 5. С. 417–424.
21. *Astratov V.N., Darafsheh A., Kerr M.D., Allen K.W., Fried N.M., Antoszyk A.N., Ying H.S.* Photonic nanojets for laser surgery // *SPIE Newsroom*. 2010. DOI: 10.1117/2.1201002.002578.
22. *Garces-Chavez V., McGloin D., Melville H., Sibbett W., Dholakia K.* Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam // *Nature (Gr. Brit.)*. 2002. V. 419. P. 145–147.
23. *Kawata S., Sugiura T.* Movement of micrometer-sized particles in the evanescent field of a laser beam // *Opt. Lett.* 1992. V. 17, N 11. P. 772–774.
24. *Taguchi K., Ueno H., Hiramatsu T., Ikeda M.* Optical trapping of dielectric particle and biological cell using optical fibre // *Electron. Lett.* 1997. V. 33, N 5. P. 413–414.
25. *Zeng D., Latham W.P., Kar A.* Characteristic analysis of a refractive axicon system for optical trepanning // *Opt. Eng.* 2006. V. 45, N 9. 094302. DOI: 10.1117/1.2353119.
26. *Munzer H.J., Mosbacher M., Bertsch M., Zimmermann J., Leiderer P., Boneberg J.* Local field enhancement effects for nanostructuring of surfaces // *J. Microsc.* 2001. V. 202, N 1. P. 129–135.
27. *Li X., Chen Z., Taflove A., Backman V.* Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets // *Opt. Express*. 2005. V. 13, N 22. P. 526–533.

*Yu.E. Geints, A.A. Zemlyanov, E.K. Panina.* **Localized light jets from radially symmetric non-spherical dielectric microparticles.**

The results of numerical modeling of the light wave scattering near field (“photonic (nano)jet” – PNJ area) by radially symmetric nonabsorbing dielectric micron-sized particles are presented. It is shown that the homogeneous silica microparticles of different spatial shape and orientation form PNJ with different dimensions and amplitude parameters. Photonic nanojet from hemispheres possesses high extent but moderate intensity. Using of microaxicons provides for a record increase in the PNJ length of the order of twenty laser wavelength.