

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ  
В ЛИНЗОВОМ АКУСТИЧЕСКОМ МИКРОСКОПЕ  
С ДВУМЕРНОЙ РЕШЕТКОЙ**

**С.А. Титов<sup>1,@</sup>,  
А.Н. Богаченков<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (ИБХФ РАН), Москва 119334, Россия*

<sup>2</sup>*МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия*

<sup>@</sup>*Автор для переписки, e-mail: sergetitov@mail.ru*

В статье обсуждается применение линзового многоэлементного акустического микроскопа для визуализации и количественной характеристики неоднородностей, размеры которых сравнимы с пространственной разрешающей способностью. В параксиальном приближении найдено, что регистрируемый пространственно-временной сигнал ультразвуковой решетки микроскопа может рассматриваться как оценка функции рассеяния визуализируемых объектов. Теоретически установлено, что функции рассеяния наблюдаемых неоднородностей могут быть использованы для интерпретации особенностей, наблюдаемых в формируемых акустических изображениях. Показано, что конечный размер элементов решетки ограничивает угловую разрешающую способность метода, приводя к сглаживанию результатов измерения функции рассеяния. Экспериментальная апробация предложенного метода выполнена с помощью разработанного прототипа микроскопа с двумерной решеткой квадратных элементов и полистироловой сферической акустической линзой. Подтверждено в эксперименте, что пространственная разрешающая способность прибора соответствует теоретической оценке, получаемой по классическому критерию. Приведены результаты формирования изображений малых плоских отражателей с разными углами наклона, полученные путем электронного сканирования. Показано, что сигнал решетки, являющийся оценкой функции рассеяния, является более информативным для количественной характеристики малых неоднородностей по сравнению с их акустическими изображениями.

**Ключевые слова:** акустическая микроскопия, ультразвуковая решетка, количественная характеристика.

---

---

## VISUALIZATION AND QUANTITATIVE CHARACTERIZATION OF SMALL OBJECTS IN A LENS ACOUSTIC MICROSCOPE WITH A TWO-DIMENSIONAL ARRAY

S.A. Titov<sup>1,@</sup>,  
A.N. Bogachenkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences (IBCP RAS), Moscow 119334, Russia*

<sup>2</sup>*MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia*

@Corresponding author e-mail: sergetitov@mail.ru

Application of a lens multi-element acoustic microscope for the visualization and quantitative characterization of small discontinuities with dimensions of the spatial resolution level is considered. On the basis of the paraxial approximation it was found that the recorded spatio-temporal signal of the microscope ultrasonic array can be treated as an estimation of the scattering function of visualized objects. It was theoretically established that the scattering functions of the observed inhomogeneities can be used for the interpretation of the generated acoustic images. It is shown that the finite size of the array elements constrains the angular resolution of the method due to smoothing of the measured scattering function. Experimental testing of the proposed method was carried out using the developed prototype microscope with a two-dimensional array of square elements and a polystyrene spherical acoustic lens. It was experimentally confirmed that the spatial resolution of the device corresponds to a theoretical estimate obtained by a classical criterion. The generated images of small flat reflectors with different angles of inclination obtained by means of electronic scanning are presented. It is shown that the output array data set is more informative for the quantitative characterization of the discontinuities than their acoustical images. In particular, on the basis of the obtained estimation of the scattering function it was possible to estimate the angle of inclination of the reflectors.

**Keywords:** acoustic microscopy, ultrasonic array, quantitative characterization.

В настоящее время разработаны различные методы ультразвуковой визуализации, позволяющие производить отображение пространственного распределения упруго-вязкостных параметров исследуемого объекта [1–3]. Информацию о структурно-механических свойствах, получаемых с помощью данных методов, очень часто оказывается затруднительно или невозможно получить другими способами. Наиболее острые проблемы возникают при характеристике неоднородностей, размеры которых сравнимы с пространственным разрешением используемого устройства ультразвуковой визуализации [4, 5].

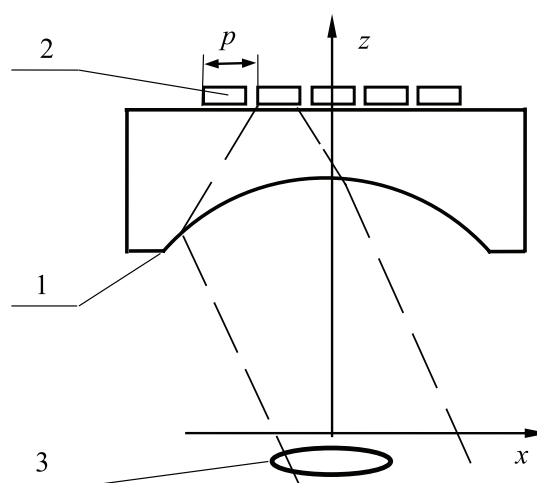
Высокие разрешение и чувствительность имеет линзовый акустический микроскоп с одиночным ультразвуковым преобразователем, построенный по конфокальной схеме [6–8]. Размер обнаруженной малой неоднородности или дефекта можно оценить по амплитуде отраженного сигнала, сравнивая ее с амплитудой отклика от тестового объекта с заданными размерами. Однако многие объекты, размеры которых сравнимы с разрешаю-

щей способностью, нередко дают одинаковые амплитуды отраженного отклика и неразличимы, несмотря на различия в форме и ориентации.

Более подробную характеристику малых объектов позволяют проводить устройства с фазированными решетками. Раздельная регистрация сигналов, которые дают различные пары приемопередающих элементов решетки, делает возможным оценку функции рассеяния объекта, которая показывает зависимости отраженного сигнала от углов распространения падающих и отраженных квазиплоских волн. Целесообразность использования функции рассеяния заключается в том, что изображение объекта представляется по существу суперпозицией всех составляющих функции рассеяния. И в этом случае разные объекты с разными функциями рассеяния могут давать одинаковые изображения и быть неразличимы.

В устройствах с ультразвуковыми решетками функцию рассеяния непосредственно получают путем раздельной регистрации сигналов ее элементов. Однако в силу ряда причин такие устройства являются сравнительно низкочастотными, и в них используются одномерные решетки. Недавно было разработано устройство акустической визуализации, в котором двумерная решетка сопрягалась с акустической линзой [9]. В таком устройстве волны, излучаемые элементами решетки, сводятся линзой в ее околофокальной области, что позволяет использовать высокочастотные решетки с крупными элементами и достигать высокого разрешения при электронном сканировании. Кроме того, волны, излучаемые и принимаемые элементами решетками, являются приблизительно плоскими за счет преломления на поверхности линзы, поэтому выходной сигнал оказывается пропорциональным функции рассеяния. Данная работа посвящена разработке и исследованию метода характеристики объектов в линзовом микроскопе с двумерной решеткой путем измерения их функций рассеяния.

Схема микроскопа представлена на рис. 1. Акустическая линза микроскопа (1) выполнена в виде сферического углубления на одной стороне звукопровода, а на его противоположной стороне располагается двумерная ультразвуковая решетка (2). Пространство между объектом исследования (3) и линзой заполнено иммерсионной жидкостью.



**Рис. 1.** Схема многоэлементного линзового акустического микроскопа:  
1 – акустическая линза; 2 – ультразвуковая решетка; 3 – объект.

Пусть излучающий элемент решетки создает пространственное распределение поля  $u_0(\mathbf{r}_1)$ , где  $\mathbf{r}_1 = (x, y)$ , а  $U_0(\mathbf{k}_1)$ , где  $\mathbf{k}_1 = (k_x, k_y)$ , которое представляет собой двумерное преобразование Фурье этого распределения. Тогда в фокальной плоскости линзы в параксиальном приближении распределение поля может быть представлено в виде [10]:

$$u_f(\mathbf{r}_1) = \frac{1}{iF\lambda} U_0\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}\right), \quad (1)$$

где  $F$  – фокусное расстояние линзы;

$k_0$  – волновое число в иммерсионной жидкости.

Данная формула является выражением известного свойства линзы выполнять преобразование Фурье. Спектр волны в фокальной плоскости соответственно равен:

$$U_F(\mathbf{k}_1) = i\lambda F u_0\left(-\frac{F}{k_0} \mathbf{k}_1\right), \quad (2)$$

а спектр рассеянной объектом волны представим в виде суперпозиции по спектральным составляющим падающей волны:

$$U_S(\mathbf{k}_2) = \int_{-\infty}^{\infty} U_F(\mathbf{k}_1) S(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) d\mathbf{k}_1, \quad (3)$$

где функция рассеяния  $S(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$  выражает спектральную плотность рассеянной волны с проекцией волнового вектора  $\mathbf{k}_2$ , которая вызвана падающей плоской волной с проекцией  $\mathbf{k}_1$ .

Пусть положения передающего и приемного элементов задаются в плоскости решетки векторами  $\mathbf{r}_t$  и  $\mathbf{r}_r$ , соответственно. Тогда выходной пространственный сигнал решетки может быть представлен в виде свертки функции рассеяния объекта с импульсными откликами элементов решетки на излучение  $h_t(\mathbf{r})$  и прием  $h_r(\mathbf{r})$ :

$$\nu(-\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) = \left(\frac{k_0}{F}\right)^2 \iint_{\infty} h_t(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_t) h_r(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_r) S\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}, k_0 \frac{\mathbf{r}_2}{F}\right) d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2, \quad (4)$$

Если считать размеры элементов решетки достаточно малыми по сравнению с характерным пространственным периодом падающей на решетку волны, то справедливо приближенное выражение:

$$\nu(-\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_r) \approx \left(\frac{k_0}{F}\right)^2 S\left(k_0 \frac{\mathbf{r}_1}{F}, k_0 \frac{\mathbf{r}_2}{F}\right), \quad (5)$$

показывающее, что функция рассеяния объекта пропорциональна измеряемому пространственному сигналу решетки. Учет конечного размера элементов решетки и ширины их пространственного импульсного отклика приводит к погрешности измерения функции рассеяния по сигналам решетки. Такие искажения проявляются в виде сглаживания результата измерения согласно выражению (4). Считая, что ширина импульсного отклика примерно равна периоду решетки  $p$ , угловая разрешающая способность может быть оценена следующим образом:

$$\Delta\theta = \frac{p}{2F}. \quad (6)$$

Для экспериментальной апробации предложенного метода разработан прототип микроскопа с двумерной решеткой квадратных элементов. Период расположения равен  $p = 1.25$  мм с числом элементов вдоль каждой стороны, равным 8. Решетку использовали в импульсном режиме, при этом центральная частота излучаемых и принимаемых сигналов была примерно равна 15 МГц при относительной полосе 60–70%. Материалом акустической линзы служил полистирол, а ее фокусное расстояние и апертурный угол линзы были равны  $F = 29$  мм и  $\theta_m \approx 10^\circ$ , соответственно. Пространственное разрешение экспериментального прототипа микроскопа для центральной рабочей частоты может быть оценено в соответствии с классическим критерием [11]:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{2 \sin \theta_m} = 0.29 \text{ мм} \quad (7)$$

Формирование изображений в многоэлементном микроскопе проводили путем электронного сканирования точки фокуса в околофокальной области линзы. Для этого сигналы элементов решетки подвергались временным смещениям, которые компенсировали задержки откликов падающих и отраженных волн при распространении до точки фокусировки, и осуществлялось суммирование этих смещенных сигналов по всей апертуре решетки.

В качестве примера на рис. 2, 3 приведены результаты визуализации плоского отражателя, которым служил плоский полированный торец стального стержня. Торец имел диаметр 0.3 мм и был ориентирован перпендикулярно оси стержня. Стержень наклонен по отношению к вертикальной оси на различные углы  $\theta_x$ :  $-4^\circ$ ,  $0^\circ$  и  $4^\circ$ . На рис. 2 результат визуализации приведен в виде двумерного распределения в фокальной плоскости амплитуды синтезируемого отклика  $|s(x, y)|$ . Поскольку размер отражателя примерно равен разрешающей способности прибора (7), получаемые изображения являются практически неразличимыми и оценить по ним угол наклона отражателя не представляется возможным. Рис. 3 показывает результат визуализации в виде зависимостей отклика от пространственной координаты  $x$  и времени  $t$ :  $s(x, t)$ , взятых при постоянной второй координате сканирования  $y = 0$  мм. Отклик в этом формате представлен в виде оттенков серого в соответствии со шкалой, приведенной справа от диаграмм. Обычно такой формат используется для ультразвуковой визуализации в плоскостях, параллельных продольной акустической оси  $z$ . Как видно из сравнения этих изображений, оценить угол наклона отражателя также не представляется возможным.

Приведенный пример показывает, что обработка пространственно-временного сигнала, проводимая для построения изображения, позволяет произвести фокусировку в ту или иную точку. Однако при суммировании исходных сигналов по апертуре решетки теряются их детали, которые могут быть использованы для характеристики свойств объекта. Данное положение подтверждается данными, представленными на рис. 4. Здесь в виде матрицы условно показано расположение элементов ультразвуковой решетки, а амплитуды принятых сигналов отображены цветом в соответствии со шкалами справа от диаграмм. Следует отметить, что подобное распределение записывается для каждого передающего элемента решетки. В данном конкретном

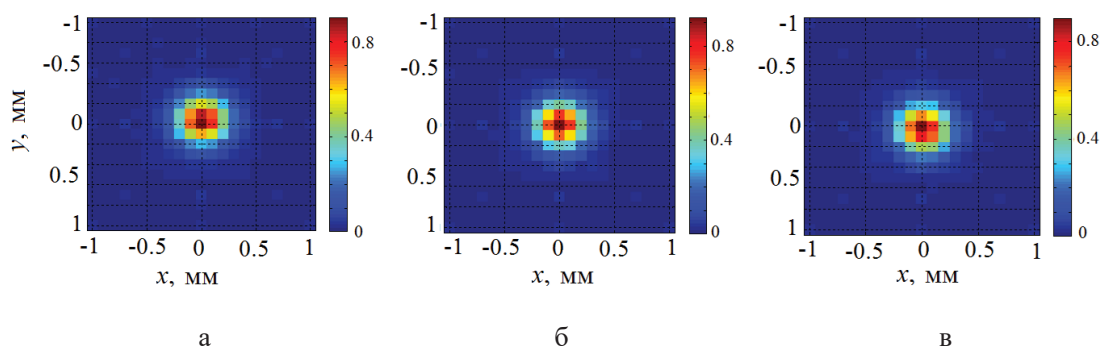


Рис. 2. Изображения плоского отражателя  $|s(x, y)|$  при углах наклона  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

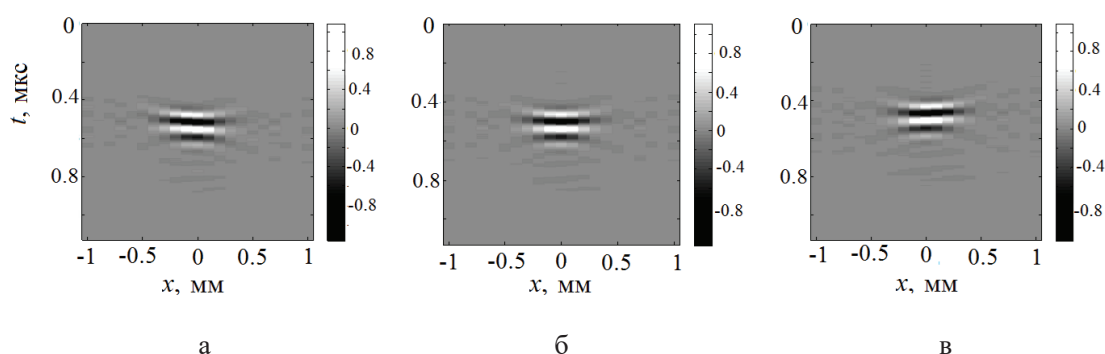


Рис. 3. Отклики  $|s(x, y)|$  при  $y = 0$  мм и углах наклона  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

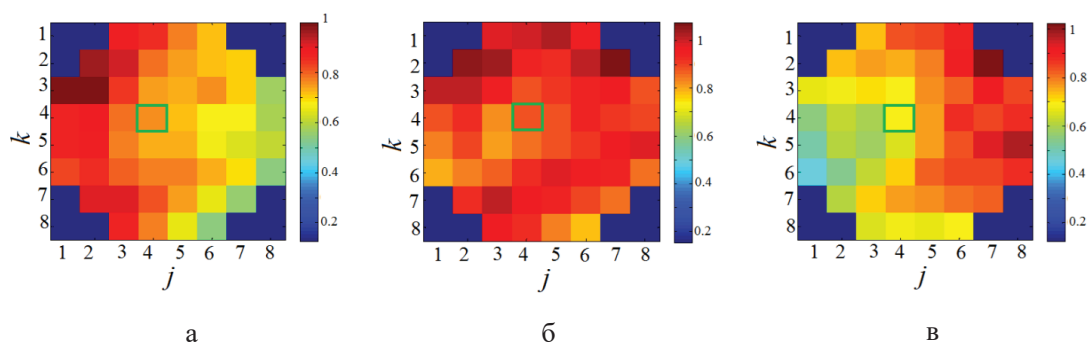


Рис. 4. Амплитуды сигналов элементов решетки при углах наклона отражателя  $\theta_x = -4^\circ$  (а),  $0^\circ$  (б) и  $4^\circ$  (в).

случае в качестве передающего использовался элемент с номерами  $(j, k) = (4, 4)$ , положение которого помечено зеленым квадратом.

Размер рассеивающего объекта сравним с длиной волны ультразвука (0.1 мм), поэтому рассеивание волн происходит в широком угловом диапазоне, и все элементы решетки принимают заметный сигнал. При горизонтальной ориентации отражателя  $\theta_x = 0^\circ$  рассеивание волн носит симметричный характер, функция рассеяния также является симметричной. Поэтому распределение амплитуды сигналов по апертуре решетки, которое может рассматриваться как оценка функции рассеяния, является приблизительно равномерным (рис. 4б). Однако при наклоне отражателя распределение меняется (рис. 4а, в).



Для оценки угла наклона по наблюдаемым распределениям производили усреднение вдоль вертикальной оси (по индексу  $k$ ). Нормированные значения усредненных амплитуд  $A$  показаны на рис. 5 сплошными линиями.

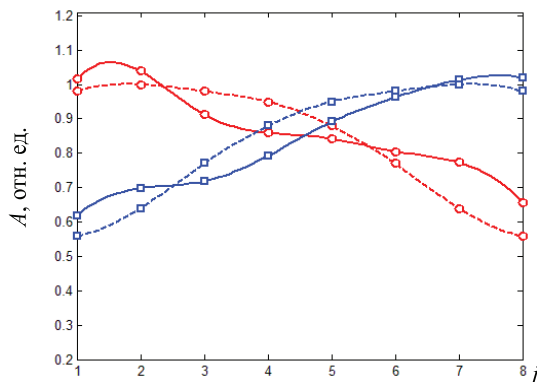


Рис. 5. Нормированные амплитуды  $A$  и диаграммы направленности отражателя (пунктир) при  $\theta_x = -4^\circ$  (—○—) и  $4^\circ$  (—□—).

Для сравнения приведены также рассчитанные диаграммы направленности наклоненного на соответствующие углы отражателя, которые могут в данном случае рассматриваться как теоретические оценки функции рассеяния.

Согласие, наблюдаемое между экспериментальными и расчетными данными, подтверждает справедливость предложенного метода оценки параметров акустических неоднородностей по распределению амплитуд пространственно-временного сигнала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-01236.*

#### Литература:

1. Azhari H. Basic of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010. 173 p.
2. Гаврилов Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине. М.: Фазис, 2013. 656 с.
3. Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2004. 864 с.
4. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont. 2008. V. 55. № 10. P. 2254–2265.
5. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J. Defect detection using ultrasonic arrays: the multimode total focusing method // NDTE Int. 2010. V. 43. № 2. P. 123–133.
6. Maev R. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: From principles to applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2013. 400 p.
7. Левин В.М., Петронюк Ю.С., Титов С.А. Обработка пространственно-временного сигнала акустического микроскопа для определения скоростей объемных ультразвуковых волн и толщины слоистых объектов // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 4 (21). С. 86–95.
8. Титов С.А., Маев Р.Г., Богаченков А.Н. Линзовый акустический микроскоп с линейной решеткой в режиме измерения параметров слоистых объектов // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 2. С. 25–30.

9. Титов С.А., Маев Р.Г. Линзовый акустический микроскоп с двумерной ультразвуковой решеткой // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 9. С. 8–15.
10. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. С. 13–83.
11. Кайно Г. Акустические волны: Устройства, визуализация и аналоговая обработка сигналов. М.: Мир, 1990. С. 199–232.

### References:

1. Azhari H. Basic of biomedical ultrasound for engineers. Hoboken, New Jersey, USA: John Willey & Sons, 2010. 173 p.
2. Gavrilov L.R. High intensity focused ultrasound in medicine. Moscow: Fazis Publ., 2013. 656 p. (in Russ.).
3. Ermolov I.N., Lange U.V. Ultrasound control. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (in Russ.).
4. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D. Defect characterization using an ultrasonic array to measure the scattering coefficient matrix. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Cont.* 2008; 55(10): 2254-2265.
5. Zhang J., Drinkwater B.W., Wilcox P.D., Hunter A.J. Defect detection using ultrasonic arrays: The multimode total focusing method. *NDTE Int.* 2010; 43(2): 123-133.
6. Maev R. Advances in acoustic microscopy and high resolution imaging: From principles to applications. Weinheim, Germany: Wiley-VCH. 2013. 400 p.
7. Levin V.M., Petronyuk Y.S., Titov S.A. Processing of acoustic microscope spatio-temporal signal for measurement of bulk ultrasonic wave velocities and thickness of a layered sample. *Phizicheskyye osnovy priborostroeniya* (Physical Bases of Instrumentation). 2016; 5(4): 86-95. (in Russ.)
8. Titov S.A., Maev R.G., Bogachenkov A.N. Lens acoustic microscope with a linear array for quantitative characterization of layered objects. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(2): 25-30. (in Russ.).
9. Titov S.A., Maev R.G. A lens acoustic microscope with a two-dimensional ultrasonic array. *Technical Physics Letters*. 2016; 42(5): 447-450.
10. Goodman J.W. Introduction to Fourier optics. Second edition. New York: McGraw-Hill. 1996. P. 1-62.
11. Kino G.S. Acoustic waves: Devices, imaging, and analog signal processing. Englewood Cliff, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 1987. P. 182-210.

#### Об авторах:

**Титов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (119334, Россия, Москва, ул. Косыгина, 4).

**Богаченков Алексей Николаевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиосистем передачи информации Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

#### About the authors:

**Sergey A. Titov**, Ph.D. (Engineering), Senior Researcher of Emanuel Institute of Biochemical Physics of Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow 119334, Russia).

**Alexey N. Bogachenkov**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the Chair of Radio Systems of Information Transfer, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow 119454, Russia).

**Для цитирования:** Титов С.А., Богаченков А.Н. Визуализация и характеристика малых объектов в линзовом акустическом микроскопе с двумерной решеткой // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 6. С. 66–73. DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73

**For citation:** Titov S.A., Bogachenkov A.N. Visualization and quantitative characterization of small objects in lens acoustic microscope with a two-dimensional array. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2018; 6(6): 66-73. (in Russ.) DOI: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-66-73