

**А.Ю. Вареникова, Н.Н. Чернов**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕМНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
НЕЛИНЕЙНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  
КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ СРЕДЫ\***

*Повышение информативности ультразвуковых методов визуализации является актуальной задачей, решение которой позволит выявлять патологии внутренних структур на ранней стадии их образования. Возможным решением данной задачи является построение изображения исследуемого объекта путем восстановления картины распределения акустического нелинейного параметра, чувствительность которого несколько выше, к изменениям структуры биологической среды чем других акустических характеристик. Важной является задача выбора параметра акустической волны, характеризующего распределение нелинейности в исследуемом объекте. В данной работе предлагается использовать в качестве такого параметра колебательную скорость частиц среды. За счет известной связи между колебательной скоростью частиц среды  $v$  и акустического давления  $p$  можно восстановить картину распределения значений колебательной скорости, получив на выходе распределение значений акустического давления в изучаемом объекте. Кроме обозначенной зависимости колебательной скорости от акустического давления, также предлагается использование в качестве дополнительных параметров зависимости колебательной скорости частиц среды от плотности среды  $\rho$  и скорости звука  $c$ . Учет данных показателей позволит получить дополнительную информацию о структуре исследуемого объекта. Для решения поставленных задач было проведено исследование зависимостей распределения колебательной скорости частиц среды от объемных параметров нелинейной биологической среды: акустического давления, изменения плотности, скорости звука с учетом нелинейных эффектов. В работе показаны математические выражения искомых зависимостей объемных параметров от колебательной скорости частиц среды. Приведены результаты моделирования влияния данных параметров на колебательную скорость частиц для трех нелинейных биологических сред, характеризующихся различным значением нелинейного параметра: воды, цельной крови, гомогенизированной печени. Описан характер искомых математических выражений. Полученные в ходе исследования зависимости параметров от колебательной скорости частиц среды с учетом влияния нелинейных процессов в дальнейшем позволят перейти к восстановлению картины распределения нелинейного параметра биологической среды, характеризующего структуру изучаемого объекта.*

*Нелинейный параметр; акустическое давление; плотность; скорость звука; нелинейная биологическая среда; колебательная скорость частиц среды.*

**A.Yu. Varenikova, N.N. Chernov**

**RESEARCH OF THE EFFECT OF NONLINEAR BIOLOGICAL  
ENVIRONMENT VOLUMETRIC PARAMETERS  
ON THE DISTRIBUTION OF THE MEDIUM PARTICLES OSCILLATORY  
VELOCITY**

*The increase of informativity of ultrasound imaging techniques is an urgent task, which will help to identify the pathology of internal structures at an early stage of their formation. A possible solution to this problem is to build image of the object through the rehabilitation of the distribution pattern of the acoustic nonlinearity parameter, whose sensitivity is slightly higher to changes in the structure of the biological environment than other acoustic characteristics. An important task is a selection of the acoustic wave parameter, which characterizes the distribution of nonlinearity in the*

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00374.

*examined object. In this paper we propose to use the medium particles oscillatory speed as such a parameter. Due to the known relationship between the the medium particles vibrational speed  $v$  and acoustic pressure  $p$  the value distribution of the vibrational velocity can be reconstructed, obtaining at the output the distribution of the acoustic pressure values in the studied object. Despite the noted dependence of vibrational velocity on acoustic pressure it is also proposed to use as an additional parameter the dependence of medium particles vibrational velocity on acoustic pressure  $\rho$  and the speed of sound  $c$ . Records of these indicators will provide additional information about the structure of the object. To solve the set tasks the dependency of the the volumetric parameters of medium particle velocity distribution on nonlinear biological environment, such as acoustic pressure, density, speed of sound taking into account nonlinear effects, has been studied. The paper shows the mathematical expression specifying dependencies of the volumetric parameters from the particle velocity of the medium. Given are the results of modeling the influence of these parameters on the vibrational particle velocity for the three non-linear biological environments, characterized by different value of the nonlinearity parameter of water, whole blood, homogenized liver. The nature of the required mathematical expressions is shown. The obtained dependences of the parameters on the the medium particle velocity taking into account the influence of nonlinear processes will allow restoring the distribution pattern of the nonlinearity parameter of biological environment and characterizing the structure of the studied object.*

*Non-linear parameter of acoustic pressure; density; speed of sound; nonlinear biological environment; oscillatory velocity; medium particles.*

**Введение.** Ультразвуковые методы визуализации, определяющие характеристики биообъектов за счет взаимодействия ультразвуковой волны с исследуемым образцом, достаточно распространены, вследствие своей доступности, безопасности ультразвука, а также относительно малого времени проведения исследования.

Несмотря на удобство технической реализации акустических диагностических приборов, качественные быстро сменяющиеся изображения, возможность длительного мониторинга, простоту и доступность данных методов, актуальной является задача повышения их информативности [1, 2].

Во многих научных исследованиях в качестве возможного решения данной задачи предлагается акустический нелинейный параметр, чувствительность которого несколько выше, к изменениям структуры биологической среды чем других акустических характеристик [2].

При распространении синусоидальных ультразвуковых волн с заданной частотой и амплитудой в нелинейной среде, волна основной частоты искажается, что приводит к генерации второй, третьей и высших гармоник основной частоты. Величина этих гармонических составляющих зависит от свойств биологической среды, также, как и амплитуда ультразвуковой волны и расстояние ее распространения [3].

Актуальным является вопрос выбора акустического параметра в волне, характеризующего распределение нелинейности в биологической среде. В работе предлагается использовать в качестве такого параметра колебательную скорость частиц среды.

**Постановка задачи.** Известно, что колебательная скорость частиц среды  $v$  напрямую зависит от акустического давления  $p$ : зная распределение акустического давления в среде, можно восстановить соответствующее распределения значений колебательной скорости.

Помимо известной зависимости колебательной скорости от акустического давления, также предлагается использование в качестве дополнительных параметров зависимости колебательной скорости частиц среды от плотности среды  $\rho$  и скорости звука  $c$ .

Для построения искомых зависимостей запишем уравнение состояния в следующем виде [4–5]:

$$P = P_0 + \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right) * \rho' + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial \rho^2}\right) * (\rho')^2 = P_0 + c^2(r)\rho' + \frac{\varepsilon_2(r)-1}{\rho_0} c^2(r)(\rho')^2. \quad (1)$$

Записанное в данном виде, это выражение учитывает пространственные распределения следующих параметров, важных для диагностики: квадрат скорости звука  $c^2(r)$ , плотность исследуемой ткани  $\rho$ , акустический нелинейный параметр второго порядка  $\varepsilon_2(r) = 1 + B/(2A)$ .

Далее запишем уравнение для акустического давления при постоянных  $\rho_0, c, \varepsilon_2$ :

$$p = c_0^2 \rho' + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0} c_0^2 (\rho')^2. \quad (2)$$

Выражение для  $\rho'$ :

$$\rho' = \frac{p}{c_0^2} - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0 c_0^4} p^2. \quad (3)$$

Для скорости звука:

$$c_{nonl} = \sqrt{\frac{\partial P}{\partial \rho}} = c_0 \left(1 + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0} \rho'\right). \quad (4)$$

Для того, чтобы выразить взаимосвязь между величинами  $p$  и  $v$ , запишем следующие выражения:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial p}{\partial x} - b \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + c_{nonl} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{b}{2\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (6)$$

Выражение (5) – одномерное уравнение движения в среде с учетом поглощения, формула (6) – уравнение Бюргерса в координатах расстояния и времени [6–7].

Далее разность выражений (5) и (6) домножим на  $\rho$ , тем самым получим уравнение, отображающее взаимозависимость между  $p$  и  $v$ :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = (\rho_0 + \rho') c_{nonl} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{b}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (7)$$

Для учета нелинейных эффектов первого и второго порядка малости, перепишем уравнение (7) в следующем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = (\rho_0 + \rho') \left(c_0 + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0} c_0 \rho'\right) \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{b}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (8)$$

Раскрыв скобки, получаем:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho_0 c_0 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\varepsilon_2 \rho_0}{2} \frac{\partial(v^2)}{\partial x} + \frac{b}{2} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}. \quad (9)$$

Затем проинтегрировав, получим необходимую связь между  $p$  и  $v$ :

$$p(v) = \rho_0 c_0 v + \frac{b}{2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\varepsilon_2 \rho_0}{2} v^2. \quad (10)$$

Взаимосвязь между параметрами  $\rho'$  и  $v$  получим подстановкой уравнения (10) в (2):

$$\begin{aligned} \rho' &= \frac{\rho_0 c_0 v + b * \frac{\partial v}{\partial x} + \varepsilon_0 \rho_0 v^2}{4c_0^2} - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0 c_0^4} * \left(\rho_0 c_0 v + \frac{b}{2} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\varepsilon_2 \rho_0 v^2}{2}\right)^2 = \\ &= \frac{\rho_0 c_0 v + b * \frac{\partial v}{\partial x} + \varepsilon_0 \rho_0 v^2}{4c_0^2} - \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0 c_0^4} * \left(\rho_0^2 c_0^2 v^2 + \frac{b^2}{4} \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \frac{\varepsilon_2^2 \rho_0^2 v^4}{4}\right) = \\ &= \frac{(\varepsilon_2 - 1) \rho_0^2 c_0^2 v^2}{\rho_0 c_0^4} + \frac{b^2}{4} \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0 c_0^4} + \frac{\varepsilon_2^2 \rho_0^2 v^2 \varepsilon_2 - 1}{4 \rho_0 c_0^4} \end{aligned}$$

Выполнив преобразования получаем:

$$\rho'(v) = \frac{\rho_0}{c_0} v + \frac{b}{2c_0^2} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{(\varepsilon_2 - 1) \rho_0}{2c_0^2} v^2. \quad (11)$$

Далее рассмотрим взаимосвязь между фазовой  $c_{nonl}$  колебательной  $v$  скоростями [8–10]. Искомую связь между данными параметрами акустической волны получим подстановкой (11) в (3):

$$c_{nonl} = c_0 \left( 1 + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0} * \frac{\rho_0}{c_0} v + \frac{b}{2c_0^2} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{(\varepsilon_2 - 1)\rho_0}{2c_0^2} v^2 \right) =$$

$$c_0 + \frac{\varepsilon_2 - 1}{\rho_0} \frac{\rho_0}{c_0} v c_0 + \frac{b}{2c_0^2} \frac{\partial v}{\partial x} c_0 - \frac{(\varepsilon_2 - 1)\rho_0}{2c_0^2} v^2 c_0.$$

Выполнив математические преобразования получим:

$$c_{nonl}(v) = c_0 + (\varepsilon_2 - 1)v + \frac{b}{2} \frac{(\varepsilon_2 - 1)}{\rho_0 c_0} \frac{\partial v}{\partial x}. \quad (12)$$

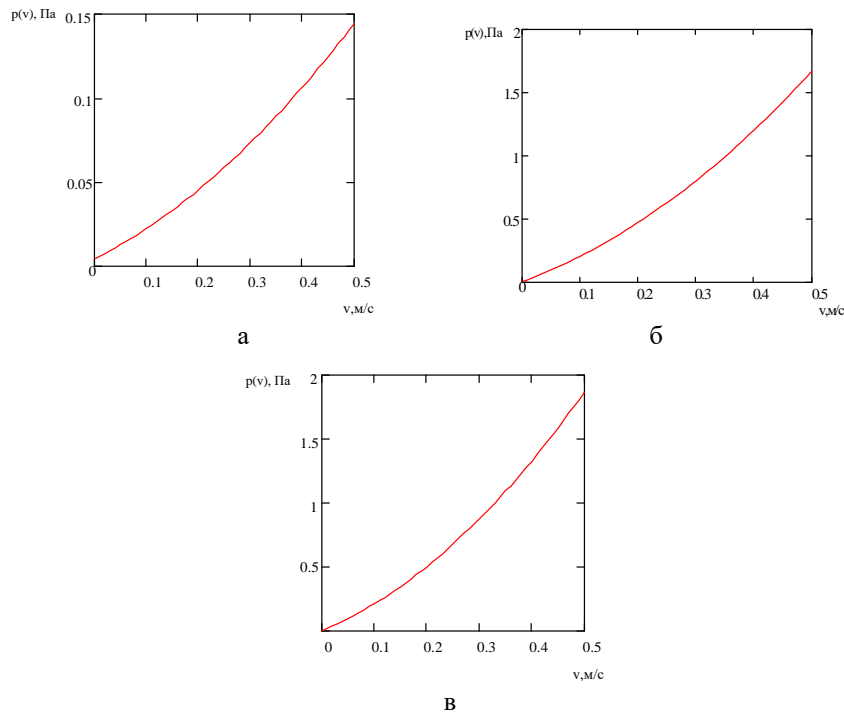


Рис. 1. Зависимость давления от колебательной скорости: а – для воды; б – для цельной крови; в – для гомогенизированной печени

На рис. 1 представлены графики зависимостей давления от колебательной скорости для нелинейных сред, обладающих различным значением нелинейного параметра. Так, на рис. 1,а представлен график для воды, значение нелинейного параметра равно 3,5. Рис. 1,б отображает зависимость давления от колебательной скорости для цельной крови, нелинейный параметр – 6,3, на рис. 1,в показана зависимость для гомогенизированной печени, нелинейный параметр – 7,8.

Искомая зависимость носит линейный характер: с увеличением значения колебательной скорости растут численные значения давления в среде.

Далее рассмотрим зависимость изменения плотности  $\rho'$  от колебательной скорости.

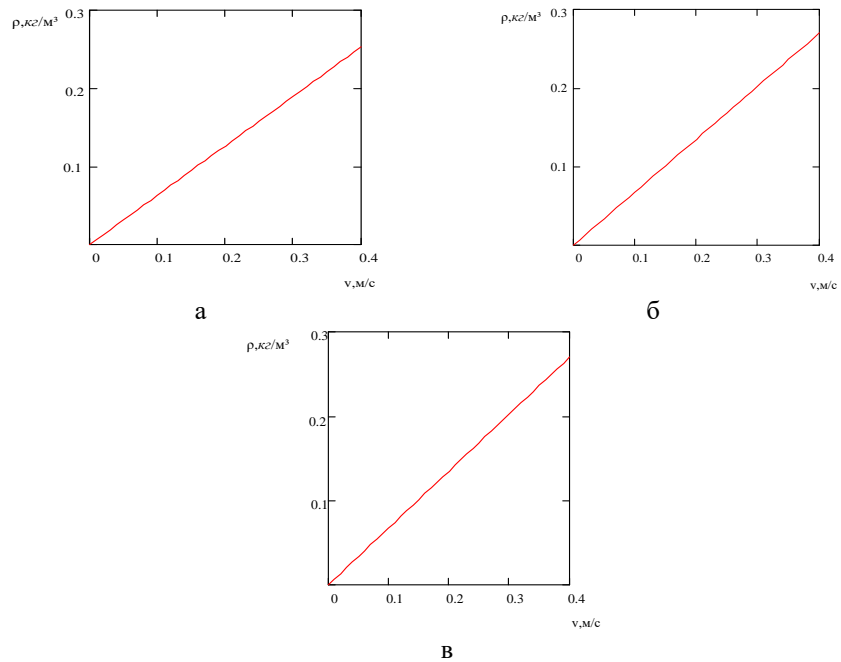


Рис. 2. Зависимость изменения плотности от колебательной скорости:  
а – для воды; б – для цельной крови; в – для гомогенизированной печени

Также, как и в предыдущем случае, зависимость изменения плотности от колебательной скорости носит линейный характер.

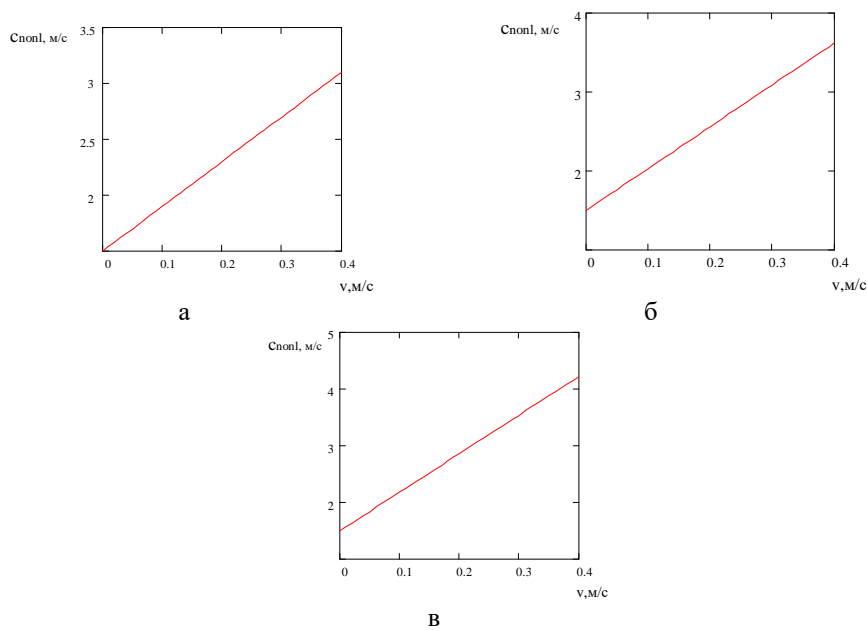


Рис. 3. Зависимость скорости звука с учетом нелинейных эффектов от колебательной скорости:  
а – для воды; б – для цельной крови; в – для гомогенизированной печени

На рис. 3 представлены зависимости скорости звука с учетом нелинейных эффектов от колебательной скорости частиц среды. Видим, что и в этом случае зависимость носит линейный характер.

**Заключение.** В работе было проведено моделирование зависимости параметров среды и колебательной скорости частиц среды. Полученные в ходе исследования зависимости параметров от колебательной скорости частиц среды с учетом влияния нелинейных процессов позволят получить дополнительную информацию о внутренней структуре исследуемого объекта, а также перейти к восстановлению распределения нелинейного параметра биологической среды, характеризующего структуру изучаемого объекта.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Визуализация внутренних структур биообъектов на основе нелинейного взаимодействия ультразвуковых волн со средой // Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50»: Сб. трудов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ университета, 2015. – 252 р.
2. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Визуализация внутренних структур биообъектов на основе 2-й гармоники ультразвуковых волн // Научно-практическая конференция «Нелинейная акустика-50»: Сб. трудов. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 166-170.
3. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Исследование деформации профиля акустической волны в биологических тканях методами графического анализа // XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Медицинские информационные системы МИС-2016», 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 174-186.
4. Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. Исследование прохождения акустической волны в биологических жидкостях с высокой нелинейностью // V Всероссийская молодежная школа-семинар «Инновации и перспективы медицинских информационных систем ИПМИС-2016», 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 69-72.
5. Вареникова А.Ю., Лагута М.В. Мониторинг состояния прибрежных зон океана методом нелинейной акустической томографии // Международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования»: Сб. трудов. 19-23 сентября 2016, г. Владивосток. – С. 743-746.
6. Лагута М.В., Вареникова А.Ю., Чернов Н.Н. К вопросу о построении схем визуализации томограмм на основе нелинейной акустики // XIV Всероссийская научно-техническая конференция «Медицинские информационные системы МИС-2016», 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 213-225.
7. Вареникова А.Ю., Лагута М.В., Чернов Н.Н. Измерение нелинейного параметра методом конечных амплитуд // V Всероссийская молодежная школа-семинар «Инновации и перспективы медицинских информационных систем ИПМИС-2016», 19-22 декабря 2016, г. Таганрог. – С. 80-84.
8. Буров В.А., Крюков Р.В., Румянцева О.Д., Шмелев А.А. Проблемы использования нелинейных коллинеарных процессов в акустической томографии третьего порядка // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 1. – С. 57-79.
9. Буров В.А., Зотов Д.И., Румянцева О.Д. Восстановление пространственных распределений скорости звука и поглощения в фантомах мягких биотканей по экспериментальным данным ультразвукового томографирования // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 2. – С. 254-273.
10. Буров В.А., Шмелев А.А. Численное и физическое моделирование процесса томографирования на основе акустических нелинейных эффектов третьего порядка // Акустический журнал. – 2009. – Т. 55, № 4-5. – С. 466-480.
11. Гусев В.А., Маков Ю.Н. Спектральное представление решения кубично-нелинейного уравнения простой волны Римана // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 5. – С. 591-596.
12. Gong X, Liu X., Zhang D. Study of third-order nonlinear parameter C/A for biological specimens // Nonlinear Acoustics – Fundamental and Applications (Proceedings of 18<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics). Ed. Enflo B.O., Hedberg C.M., and Kari L, Melville, New York: American Institute of Physics, 2008. – P. 444-447.

13. Буров В.А., Зотов Д.И., Румянцева О.Д. Восстановление пространственных распределений скорости звука и поглощения в мягких биотканях по модельным данным ультразвукового томографирования // Акустический журнал. – 2014. – Т. 60, № 4. – С. 443-456.
14. Ruiter N.V., Zarf M., Hopp T., Dapp R., Gobel G. 3D ultrasound computer tography (USCT) // European Radiology. – 2009. – Vol. 19. Suppl. 4. – P. S913-S918.
15. Gong, X., Zhang, D., Liu, J., Wang, H., Yan, Y. and Xu, X. Study of acoustic nonlinearity parameter imaging methods in reflection mode for biological tissues // Acoustical Society of America. – 2004. – P. 1819-1825.
16. Буров В.А., Шмелёв А.А., Крюклев Р.В., Румянцева О.Д. Роль нелинейных взаимодействий в акустической томографии третьего порядка // Акустический журнал. – 2015. – Т. 61, № 6. – С. 669-684.
17. Буров В.А., Евтухов С.Н., Ткачева А.М., Румянцева О.Д. Акустическая томография нелинейного параметра с помощью малого числа преобразователей // Акустический журнал. – 2006. – Т. 52, № 6. – С. 760-776.
18. Руденко О.В. Нелинейные волны: некоторые биомедицинские приложения // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 4. – С. 374-383.
19. Kim D.Y., Lee J.S., Kwon S.J., Song T.K. Ultrasound second harmonic imaging with a weighted chirp signal // IEEE Ultrasonics symposium. – 2001. – P. 1477-1480.
20. Duck F.A. Nonlinear acoustic in diagnostic ultrasound // Ultrasound in Med. & Biol. – 2002. – Vol. 28, No. 1. – P. 1-18.

## REFERENCES

1. Varenikova A.Yu., Chernov N.N. Vizualizatsiya vnutrennikh struktur bioob"ektov na osnove nelineynogo vzaimodeystviya ul'trazvukovykh voln so sredoy [Visualization of internal structures of biological objects based on nonlinear interaction of ultrasonic waves with the environment], Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nelineynaya akustika-50»: Sb. trudov [Scientific-practical conference "Nonlinear acoustics-50". The collection of works]. Taganrog: Izd-vo YuFU universiteta, 2015, 252 p.
2. Varenikova A.Yu., Chernov N.N. Vizualizatsiya vnutrennikh struktur bioob"ektov na osnove 2-y garmoniki ul'trazvukovykh voln [Visualization of internal structures of biological objects on the basis of 2nd-harmonic ultrasonic waves], Nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nelineynaya akustika-50»: Sb. trudov [Scientific-practical conference "Nonlinear acoustics-50". The collection of works]. Taganrog: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 166-170.
3. Varenikova A.Yu., Chernov N.N. Issledovanie deformatsii profilya akusticheskoy volny v biologicheskikh tkanyakh metodami graficheskogo analiza [study of the strain profile of the acoustic wave in the biological tissues by the methods of graphical analysis], XIV Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Meditsinskie informatsionnye sistemy MIS-2016», 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog [XIV all-Russian scientific-technical conference "Medical information systems MIS-2016", December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 174-186.
4. Varenikova A.Yu., Chernov N.N. Issledovanie prokhozheniya akusticheskoy volny v biologicheskikh zhidkostyakh s vysokoy nelineynost'yu [Study of passage of acoustic waves in biological fluids with high nonlinearity], V Vserossiyskaya molodezhnaya shkola-seminar «Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem IPMIS-2016», 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog [V all-Russian youth school-seminar "Innovations and prospects of medical information systems IPMI-2016", December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 69-72.
5. Varenikova A.Yu., Laguta M.V. Monitoring sostoyaniya pribrezhnykh zon okeana metodom nelineynoy akusticheskoy tomografii [Monitoring of the state of the coastal zones of the ocean by the method of nonlinear acoustic tomography], Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Sovremennye tekhnologii i razvitie politekhnicheskogo obrazovaniya»: Sb. trudov. 19-23 sentyabrya 2016, g. Vladivostok [International scientific conference "Modern technologies and development of Polytechnic education." The collection of works. 19-23 September 2016, Vladivostok], pp. 743-746.
6. Laguta M.V., Varenikova A.Yu., Chernov N.N. K voprosu o postroenii skhem vizualizatsii tomogramm na osnove nelineynoy akustiki [The question of constructing visualizations of the tomograms on the basis of nonlinear acoustics], XIV Vserossiyskaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Meditsinskie informatsionnye sistemy MIS-2016», 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog [XIV all-Russian scientific-technical conference "Medical information systems MIS-2016", December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 213-225.

7. Varenikova A.Yu., Laguta M.V., Chernov N.N. Izmerenie nelineynogo parametra metodom konechnykh amplitud [Measurement of the nonlinearity parameter with finite amplitudes], *V Vserossiyskaya molodezhnaya shkola-seminar «Innovatsii i perspektivy meditsinskikh informatsionnykh sistem IPMIS-2016»*, 19-22 dekabrya 2016, g. Taganrog [V all-Russian youth school-seminar "Innovations and prospects of medical information systems IPMI-2016", December 19-22, 2016, Taganrog], pp. 80-84.
8. Burov V.A., Kryukov R.V., Rumyantseva O.D., Shmelev A.A. Problemy ispol'zovaniya nelineynykh kollinearnykh protsessov v akusticheskoy tomografii tret'ego poryadka [Problems of nonlinear collinear processes in acoustic tomography of the third order], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy zhurnal], 2012, Vol. 58, No. 1, pp. 57-79.
9. Burov V.A., Zotov D.I., Rumyantseva O.D. Vosstanovlenie prostranstvennykh raspredeleniy skorosti zvuka i pogloshcheniya v fantomakh myagkikh biotkaney po eksperimental'nym dannym ul'trazvukovogo tomografirovaniya [the restoration of the spatial distributions of sound velocity and absorption in the phantom of the soft tissues according to the experimental data of ultrasonic tomographybased], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy zhurnal], 2015, Vol. 61, No. 2, pp. 254-273.
10. Burov V.A., Shmelev A.A. Chislennoe i fizicheskoe modelirovanie protsessa tomografirovaniya na osnove akusticheskikh nelineynykh effektov tret'ego poryadka [Numerical and physical modeling of the process of tomographybased based on acoustic nonlinear effects of the third order], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy zhurnal], 2009, Vol. 55, No. 4-5, pp. 466-480.
11. Gusev V.A., Makov Yu.N. Spektral'noe predstavlenie resheniya kubichno-nelineynogo uravneniya prostoy volny Rimana [Spectral representation of solution of the cubic-nonlinear equations simple Riemann waves], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy zhurnal], 2010, Vol. 56, No. 5, pp. 591-596.
12. Gong X, Liu X., Zhang D. Study of third-order nonlinear parameter C/A for biological specimens, *Nonlinear Acoustics – Fundamental and Applications (Proceedings of 18<sup>th</sup> International Symposium on Nonlinear Acoustics)*. Ed. Enflo B.O., Hedberg C.M., and Kari L, Melville, New York: American Institute of Physics, 2008, pp. 444-447.
13. Burov V.A., Zotov D.I., Rumyantseva O.D. Vosstanovlenie prostranstvennykh raspredeleniy skorosti zvuka i pogloshcheniya v myagkikh biotkanyakh po model'nym dannym ul'trazvukovogo tomografirovaniya [Reconstruction of spatial distributions of sound velocity and absorption in soft biological tissues according to the model data of ultrasonic tomographybased], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy Zhurnal], 2014, Vol. 60, No. 4, pp. 443-456.
14. Rüter N.V., Zarf M., Hopp T., Dapp R., Gobel G. 3D ultrasound computer tography (USCT), *European Radiolog.* 2009, Vol. 19, Suppl. 4, pp. S913-S918.
15. Gong, X., Zhang, D., Liu, J., Wang, H., Yan, Y. and Xu, X. Study of acoustic nonlinearity parameter imaging methods in reflection mode for biological tissues, *Acoustical Society of America*, 2004, pp. 1819-1825.
16. Burov V.A., Shmelev A.A., Kryukov R.V., Rumyantseva O.D. Rol' nelineynykh vzaimodeystviy v akusticheskoy tomografii tret'ego poryadka, *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy Zhurnal], 2015, Vol. 61, No. 6, pp. 669-684.
17. Burov V.A., Evtukhov S.N., Tkacheva A.M., Rumyantseva O.D. Akusticheskaya tomografiya nelineynogo parametra s pomoshch'yu malogo chisla preobrazovateley [Acoustic tomography of the nonlinear parameter by means of the small number of converters], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskiy Zhurnal], 2006, Vol. 52, No. 6, pp. 760-776.
18. Rudenko O.V. Nelineynye volny: nekotorye biomeditsinskie prilozheniya [Nonlinear waves: some biomedical applications], *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Uspekhi Fizicheskikh nauk], 2007, Vol. 177, No. 4, pp. 374-383.
19. Kim D.Y., Lee J.S., Kwon S.J., Song T.K. Ultrasound second harmonic imaging with a weighted chirp signal // IEEE Ultrasonics symposium. – 2001. – P. 1477-1480.
20. Duck F.A. Nonlinear acoustic in diagnostic ultrasound // *Ultrasound in Med. & Biol.* – 2002. – Vol. 28, No. 1. – P. 1-18.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.



**Вареникова Анастасия Юрьевна** – Южный федеральный университет; e-mail: avarenikova@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; аспирант.

**Чернов Николай Николаевич** – e-mail: nnchernov@sfedu.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

**Varenikova Anastasiya Yur'evna** – Southern Federal University; e-mail: avarenikova@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; postgraduate student.

**Chernov Nikolay Nikolaevich** – e-mail: nnchernov@sfedu.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr of eng. sc.; professor.

УДК 656.61.087: 623.82

DOI 10.23683/2311-3103-2017-8-106-117

**А.А. Илларионов, С.В. Козловский, В.А. Сергеев**

### **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БИСТАТИЧЕСКОЙ ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

*В статье описана имитационная модель функционирования бистатической гидролокационной системы, размещаемой на подвижных носителях. В качестве показателей эффективности в предлагаемой модели используются отношения сигнал/помеха в зависимости от курсового угла цели и глубин носителя гидролокатора и объекта поиска, площадь зоны обнаружения на заданной глубине цели при заданных мгновенной вероятности правильного обнаружения и вероятности ложной тревоги за цикл локации, поля мгновенных вероятностей правильного обнаружения и среднеквадратических ошибок определения координат подводных объектов в зависимости от курсового угла и глубины цели, а также накопленная вероятность обнаружения цели, маневрирующей с заданной скоростью и курсом и на заданной глубине в заданный момент времени. Особенности модели являются учет кинематических характеристик поиска - скорости и глубины носителя и объекта, зависимостей отражательной способности от курсового и бистатического углов цели, характеристик распространения звука в море в лучевом приближении и технических параметров гидролокаторов. Также учитываются характеристики помех, обусловленных шумами морской среды, шумами носителя, гидродинамической составляющей помех, излучениями локальных источников, моностатических и бистатических реверберационных помех. Предусмотрена оценка влияния организации наблюдения, определяемой режимами работы каждого гидроакустического средства - моностатический, бистатический или комбинированный, когда одно или оба одновременно ГАС функционируют как в моностатическом, так и в бистатическом режимах. Имитационное моделирование производится по временным шагам, связанным с циклами локации. Программная реализация методики для персонального компьютера разработана на языке C++ в среде Builder-6 на основе использования технологии объектно-ориентированного проектирования. Представлены примеры расчетов вероятностей обнаружения и ошибок определения координат объектов бистатической гидролокационной системой, состоящей из двух взаимодействующих гидролокаторов типа экспортного изделия МГК-335ЭМ-03 в типовых для мелководного района условиях наблюдения и отрицательной рефракции скорости звука при движении носителя и цели на встречных курсах.*

*Бистатическая и моностатическая гидролокация; бистатическая гидроакустическая система подвижных носителей; имитационная модель; вероятности обнаружения и точности определения координат подводных объектов.*