

## Моделирование воздействия акустической волны на мозг морского млекопитающего с учетом геометрии черепа

Л. Н. Меркулов

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

✉ [merkulov.ln@dvfu.ru](mailto:merkulov.ln@dvfu.ru)

**Аннотация.** Разрабатывается физико-математическая модель воздействия акустической волны на мозговое вещество на примере морского млекопитающего с учетом геометрических особенностей черепа. В качестве математического аппарата используются направленные функции Грина. Череп дельфина условно разделен на теменную, затылочную и две височные плоскости. Рассматривается проникновение волны с учетом разной толщины черепных костей. Такая модель позволяет рассмотреть поведение акустической волны в разных зонах головного мозга. Построены характеристики направленности звукового давления излучателя на кость и мозговое вещество в соответствующих зонах головы морского млекопитающего. В заключении проведен анализ результатов, а также определены планы по дальнейшей разработке и развитию темы.

**Ключевые слова:** акустическая волна, нелинейные процессы, суперпозиции, диаграмма направленности, направленная функция Грина

**Для цитирования:** Меркулов Л. Н. Моделирование воздействия акустической волны на мозг морского млекопитающего с учетом геометрии черепа // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 1. С. 42–47. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-42-47.

Original article

## Simulation of the Acoustic Wave Impact on the Marine Mammal Brain, Taking the Skull Geometry into Account

L. N. Merkulov

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

✉ [merkulov.ln@dvfu.ru](mailto:merkulov.ln@dvfu.ru)

**Abstract.** This work is aimed at developing a physico-mathematical model to describe the impact of acoustic waves on the marine mammal medulla, taking the skull geometry into account. Directed Green's functions are used as a mathematical apparatus. The skull of a dolphin is conventionally divided into a parietal, occipital, and two temporal planes. Wave penetration is considered taking into account different thicknesses of the cranial bones. The developed model can be used to analyze the behavior of acoustic waves in different areas of the brain. Directional patterns are constructed for the sound pressure of the emitter on the bone and medulla in the corresponding areas of a marine mammal head. In conclusion, an analysis of the results is carried out, and directions for further investigations are outlined.

**Keywords:** acoustic wave, nonlinear processes, superpositions, directional pattern, directed Green's function

**For citation:** Merkulov L. N. Simulation of the Acoustic Wave Impact on the Marine Mammal Brain, Taking the Skull Geometry into Account // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 1. P. 42–47. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-1-42-47.

**Введение.** Морские млекопитающие используют гидроакустическую эхолокацию как средство общения [1]. Для лучшего понимания физи-

ки процесса воздействия акустической волны на мозг морского млекопитающего составим физико-математическую модель проникновения волны

в его голову, учитывая геометрию черепа. В качестве физической модели возьмем костную ткань и мозговое вещество. Считаем, что волна проникает через плоские границы раздела. Для того чтобы скомпенсировать неточность расчета, рассмотрим разные плоскости (теменную, затылочную, две височные). Толщины костей различаются: теменная – 4 мм, затылочная – 6 мм и височные – 3 мм [2], [3]. Поведение акустических волн, проходящих соответствующие границы раздела, будет различаться. Сложение диаграмм направленности излучателей даст нам наиболее полную картину. Воздействуя на центральную нервную систему биологического объекта акустическими волнами и фиксируя реакцию, можно понять, какие именно процессы в организме изменяются под их воздействием. В [4], [5] рассмотрены задачи распространения акустических волн в замкнутых объемах, ограниченных слоем льда и дном мелкого моря, между которыми находится морская вода. В настоящей статье рассматривается поведение акустической волны в замкнутом объеме головы дельфина. Акустические свойства мозгового вещества примерно совпадают с таковыми у морской воды, а акустические свойства кости – с таковыми у льда [6].

**Постановка задачи.** Основная математическая модель – волновое уравнение для гармонической волны:

$$\Delta u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2},$$

где  $u = u(x, y, z, t)$  – неизвестная функция координат и времени;  $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  – оператор

Лапласа [7]. Поскольку учитывается геометрия черепа, то углы падения и толщины костей будут разными. Скорость звука в кости примем равной  $c_k = 4000$  м/с, в мозговом веществе  $c_m = 1500$  м/с. Рабочую частоту излучателя примем равной  $f = 500$  кГц. При такой частоте длина волны в кости будет в два раза больше толщины теменной кости. Для решения волнового уравнения используем направленные функции Грина [8], [9]. Они будут записаны как суммы для падающей и отраженной волн:

$$G_m(MM_0) = G^-(MM_0) + VG^+(MM_0),$$

где  $M, M_0$  – точки приема и излучения сигнала с координатами  $x_0$  и  $y_0$ ;  $V$  – коэффициент отражения от границы раздела.

Окончательное выражение направленной функции Грина можно представить в виде

$$G(M, M_0) = \frac{i}{2\pi} \left\{ \int_{U_1}^{U_2} \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \times e^{i[(x-x_0)\sqrt{k^2 - U^2} + (y-y_0)U]} dU + \int_{U_1}^{U_2} V \frac{F(U)}{\sqrt{k^2 - U^2}} \times e^{i[(x-x_0)\sqrt{k^2 - U^2} + (y-y_0)U]} dU \right\}.$$

$$\text{Здесь } V = \frac{(Z_1 + Z_2)e^{i dk \sin \theta} - (Z_1 - Z_2)e^{i dk \sin \theta}}{(Z_1 + Z_2)e^{i dk \sin \theta} + (Z_1 - Z_2)e^{i dk \sin \theta}},$$

$Z_1$  и  $Z_2$  – волновые сопротивления кости и мозгового вещества соответственно;  $d$  – толщина слоя;  $k$  – волновое число;  $U$  – компонента волнового вектора;

$$Z_1 = \frac{\rho_k c_k}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}}, \quad Z_2 = \frac{\rho_m c_m}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}};$$

$$F(U) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_1 \leq U \leq U_2 \\ 0, & \text{при всех остальных значениях } U, \end{cases}$$

где  $U_1 = k_{1,2} \cos \theta_{\min}$ ,  $U_2 = k_{1,2} \cos \theta_{\max}$  – интервалы углов;  $\theta_{\min}$ ,  $\theta_{\max}$  – минимальный и максимальный углы падения волны соответственно,  $k_{1,2} = \frac{2\pi}{\lambda_{1,2}}$  – волновые числа в кости и мозговом веществе соответственно.

На рис. 1 представлена примерная геометрическая конфигурация падения волны на одну из рассматриваемых плоскостей:  $\theta_{0-2}$  – угловые интервалы падающей волны;  $U_{0-2}$  – пределы интегрирования по компонентам волнового вектора.

**Физическая модель.** Как было сказано ранее, мы учитываем геометрию черепа. Акустическая волна проходит черепные кости разной толщины под разными углами. Более того, коэффициент отражения зависит от толщины кости, поэтому в разных областях черепа проникновение волны в мозговое вещество будет различным.

На рис. 2 представлена плоскость теменной области, угловой интервал  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ; на рис. 3 – плоскость затылочной области, угловой интервал  $45 \leq \theta \leq 90^\circ$ ; на рис. 4 представлена плоскость височной области, угловой интервал  $-45 \leq \theta \leq 90^\circ$ .

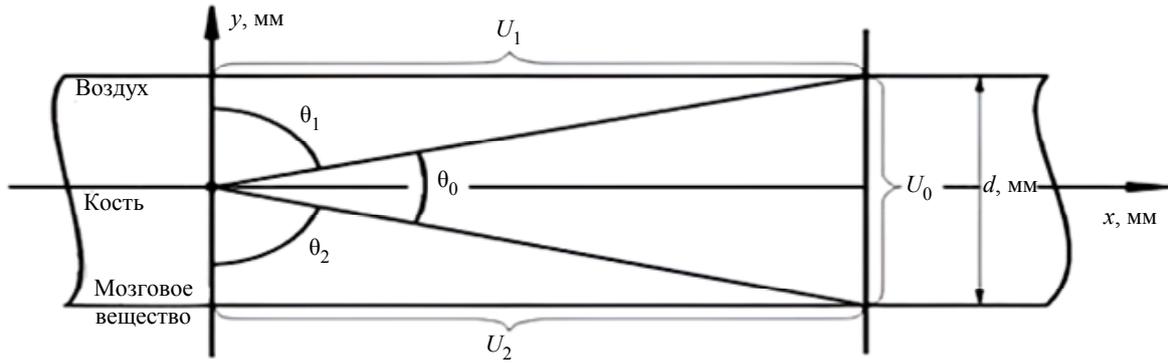


Рис. 1. Одна из рассматриваемых плоскостей; излучатель устанавливается на поверхности головы  
Fig. 1. One of the planes under consideration; the emitter is installed on the surface of the head

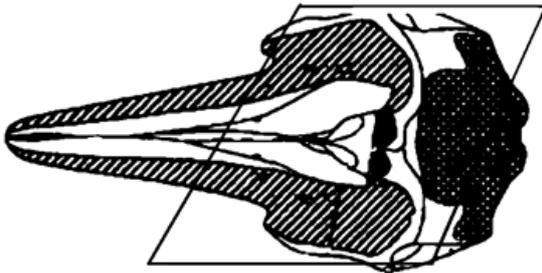


Рис. 2. Теменная область, толщина кости  $d = 4$  мм  
Fig. 2. Parietal area, bone thickness  $d = 4$  mm

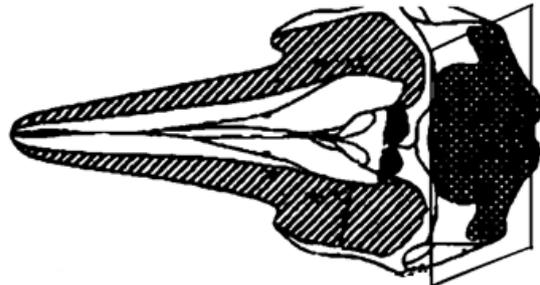


Рис. 3. Затылочная область, толщина кости  $d = 6$  мм  
Fig. 3. Occipital area, bone thickness  $d = 6$  mm

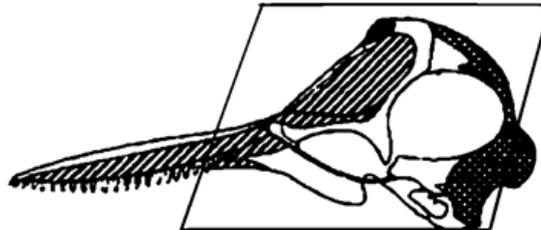


Рис. 4. Височная область, толщина кости  $d = 3$  мм  
Fig. 4. Temporal area, bone thickness  $d = 3$  mm

**Результаты расчетов.** С помощью программного комплекса математического моделирования Mathcad построены диаграммы направленности акустического давления излучателя от угла падения волны. На рис. 5, 7 и 9 представлены диаграммы направленности давления звуковой волны на кость в теменной, затылочной и височных областях соответственно. На рис. 6, 8 и 10 – давления в соответствующих областях на мозговое вещество. Диаграммы построены в полярной системе координат,  $\theta(x)$  – угол падения волны как функция линейной координаты, в градусах;  $pp_b(x)$ ,  $pp_m(x)$  – давление на кость (bone) и мозговое вещество (medulla), Па.

Выражения для направленных функций Грина в данном случае:

$$1. G^-(M, M_0) = \frac{i}{2\pi} \int_{U_1}^{U_2} \frac{F(U)}{\sqrt{k_1^2 - U^2}} \times e^{i[(x-x_0)\sqrt{k_1^2 - U^2} + (y-y_0)U]} dU,$$

где  $y_0 = 4$  мм,  $x_0 = y_0 \operatorname{ctg} \theta$  – излученная волна;  $k_1 = 785.4 \text{ м}^{-1}$ ,  $k_2 = 2094 \text{ м}^{-1}$  – волновые числа в кости и мозговом веществе соответственно;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 785.4 \text{ м}^{-1}$  – пределы интегрирования ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ).

$$2. G^+(M, M_0) = \frac{i}{2\pi} \int_{U_1}^{U_2} V \frac{F(U)}{\sqrt{k_2^2 - U^2}} \times e^{i[(x-x_0)\sqrt{k_2^2 - U^2} + (y-y_0)U]} dU,$$

где  $y_0 = 8$  мм,  $x_0 = y_0 \operatorname{ctg} \theta$  – отраженная волна;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 2094 \text{ м}^{-1}$  пределы интегрирования ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ );  $y_0 = 6$  мм,  $x_0 = y_0 \operatorname{ctg} \theta$  – излученная волна;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 55.4 \text{ м}^{-1}$  пределы интегрирования ( $45 \leq \theta \leq 90^\circ$ );  $y_0 = 12$  мм,  $x_0 = y_0 \operatorname{ctg} \theta$  – отраженная волна;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 1481 \text{ м}^{-1}$  пределы интегрирования ( $45 \leq \theta \leq 90^\circ$ );  $y_0 = 3$  мм,  $x_0 = y_0 \operatorname{ctg} \theta$  –

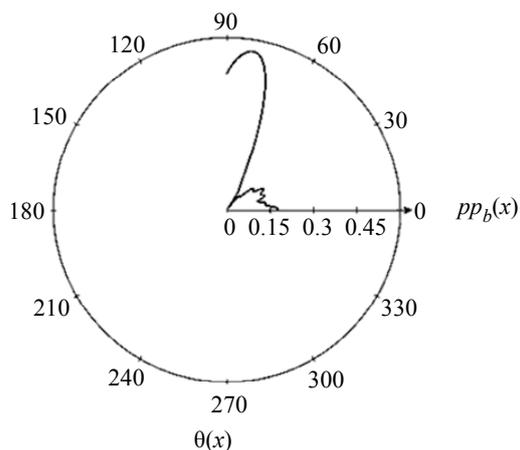


Рис. 5. Диаграмма направленности акустического излучателя при излучении на кость, теменная область  
 Fig. 5. Directional pattern of an acoustic emitter, radiating on the bone, parietal area

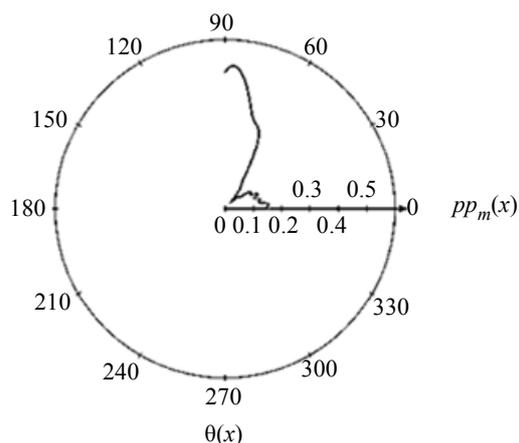


Рис. 6. Диаграмма направленности для волны, прошедшей через кость в мозговое вещество, теменная область  
 Fig. 6. Directional pattern for a wave that passed through the bone into the medulla, parietal area

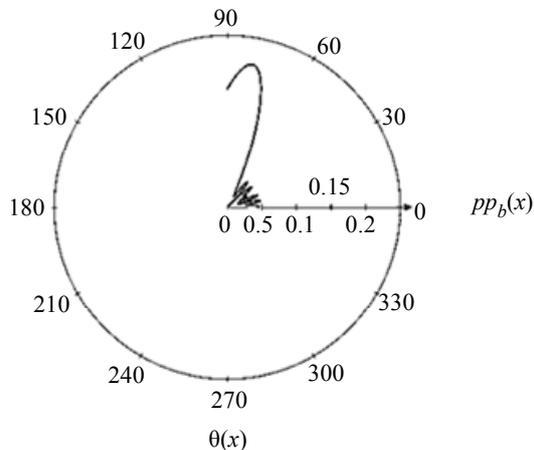


Рис. 7. Диаграмма направленности акустического излучателя при излучении на кость, затылочная область  
 Fig. 7. Directional pattern of an acoustic emitter, radiating on the bone, occipital area

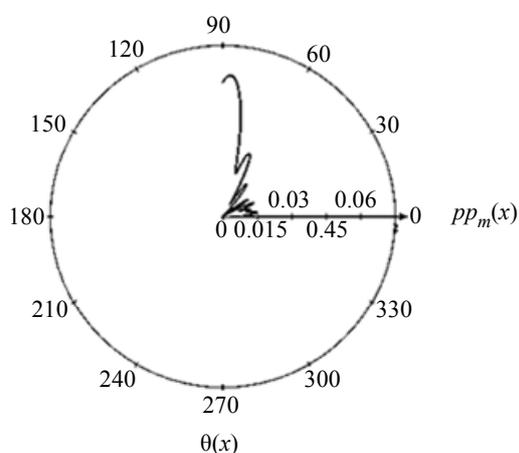


Рис. 8. Диаграмма направленности для волны, прошедшей через кость в мозговое вещество, затылочная область  
 Fig. 8. Directional pattern for a wave that passed through the bone into the medulla, occipital area

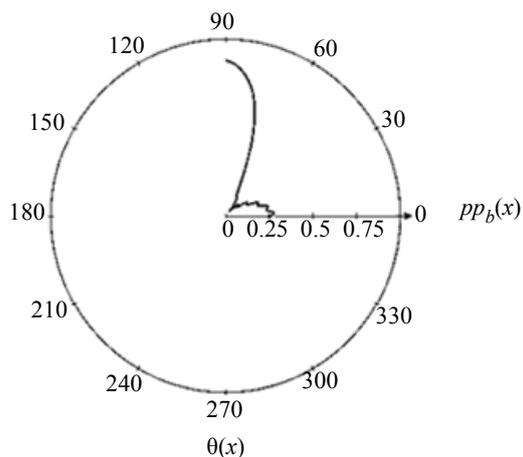


Рис. 9. Диаграмма направленности акустического излучателя при излучении на кость, височная область  
 Fig. 9. Directional pattern of an acoustic emitter, radiating on the bone, temporal area

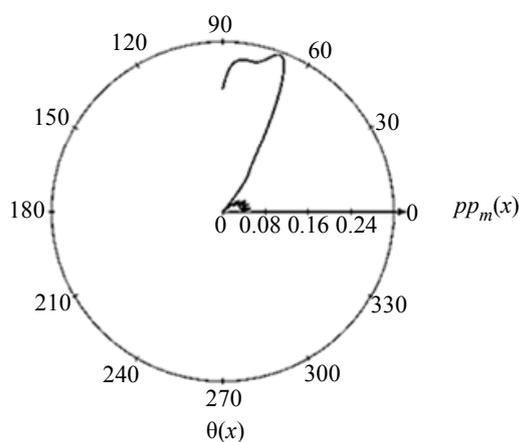


Рис. 10. Диаграмма направленности для волны, прошедшей через кость в мозговое вещество, височная область  
 Fig. 10. Directional pattern for a wave that passed through the bone into the medulla, temporal area

излученная волна;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 55.4 \text{ м}^{-1}$  пределы интегрирования ( $-45 \leq \theta \leq 90^\circ$ );  $y_0 = 6 \text{ мм}$ ,  $x_0 = y_0 \text{ ctg } \theta$  – отраженная волна;  $U_1 = 0$ ,  $U_2 = 1481 \text{ м}^{-1}$  пределы интегрирования ( $-45 \leq \theta \leq 90^\circ$ ).

**Обсуждение результатов.** Построенные диаграммы направленности отражают поведение акустической волны в замкнутом объеме черепа дельфина. Различная форма диаграмм направленности связана с тем, что коэффициент отражения различен для теменной, затылочной и височной областей из-за разной толщины костей в них. В теменной области (в соответствии с которой и подбирались параметры приемно-излучающей системы) толщина кости равна половине длины волны, волна проходит в мозговое вещество на пике. В затылочной области кость в полтора раза толще, вследствие чего волна проходит в мозг с большими потерями. В височной области кость примерно на 25 % тоньше теменной, что позволяет волне пройти с меньшими потерями на отражение и рассеяние. Недостаток данного алгоритма расчета заключается в том, что приходится интегрировать тригонометрические волновые функции для больших волновых чисел. Это при-

водит к накоплению ошибки по затуханию и рассеиванию, что, в свою очередь, повышает погрешность расчета. Также могут быть сложности при технической реализации моделируемой системы. Необходимо выстроить подходящую для получения общей картины конфигурацию излучателей и приемников.

**Заключение и планы по дальнейшему развитию.** Полученные в ходе настоящих исследований данные могут быть использованы при проектировании излучателей и приемников гидроакустических волн в небольших ограниченных объемах сложной формы. Построенные диаграммы направленности помогут в конфигурировании электроакустической системы, используемой для взаимодействия с морскими млекопитающими. В дальнейшей разработке планируется модифицировать алгоритм расчета для волновых функций с большими волновыми числами, но в небольших ограниченных объемах. Это предотвратит накопление ошибки и минимизирует погрешность алгоритма. При проектировании приемно-излучающей системы предполагается использовать параметры медицинских ультразвуковых датчиков.

#### Список литературы

1. Супин А. Я. Электрофизиологическое исследование мозга дельфинов. М.: Наука, 2008. 213 с.
2. Солнцева Г. Н. Орган слуха морских млекопитающих. М.: Наука, 2006. 202 с.
3. Белькович В. М., Щекотов М. Н. Белуха. Поведение и биоакустика в природе. М.: Изд-во Ин-та океанологии РАН, 2010. 180 с.
4. Математическая модель распространения сферических электромагнитных волн в слое льда / А. В. Корчака, А. А. Эм, Т. Ж. Лобова, В. И. Короченцев // Universum: технические науки: эл. науч. журн. 2019. № 12 (69). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/8563> (дата обращения: 26.11.2023).
5. Корчака А. В., Эм А. А. Математическая модель излучателя сферических волн в слоистой среде // Вестн. инженерной шк. ДВФУ. 2019. № 1(38). С. 128–133.
6. Пейн Г. Физика колебаний и волн. М.: Мир, 2009. 394 с.
7. Баренблатт Г. И. Нелинейная теория распространения волн. М.: Мир, 2007. 230 с.
8. Короченцев В. И. Направленные и фокусирующие антенны в объемах, ограниченных поверхностью произвольной формы. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2008. 301 с.
9. Малашенко А. Е., Мироненко М. В., Потапенко А. А. Анализ и синтез акустических антенн в морском клине // Морские интеллектуальные технологии. 2016. Т. 1, № 3(33). С. 274–279.

#### Информация об авторе

**Меркулов Леонид Николаевич** – аспирант Дальневосточного федерального университета, о. Русский, п. Аякс, 10, Владивосток, 690090, Россия.  
E-mail: [merkulov.ln@dvfu.ru](mailto:merkulov.ln@dvfu.ru)

#### References

1. Supin A. Ja. Jelektrofiziologicheskoe issledovanie mozga del'finov. M.: Nauka, 2008. 213 s. (In Russ.).
2. Solnceva G. N. Organ sluha morskih mlekopitajushhih. M.: Nauka, 2006. 202 s. (In Russ.).
3. Bel'kovich V. M., Shhekotov M. N. Beluha. Povedenie i bioakustika v prirode. M.: Izd-vo In-ta okeanologii RAN, 2010. 180 s. (In Russ.).
4. Matematicheskaja model' rasprostraneniya sfericheskikh jelektromagnitnyh voln v sloe l'da / A. V. Korchaka, A. A. Jem, T. Zh. Lobova, V. I. Korochencev // Universum: tehnicheckie nauki: jel. nauch. zhurn. 2019. № 12 (69). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/8563> (data obrashhenija: 26.11.2023). (In Russ.).

5. Korchaka A. V., Jem A. A. Matematicheskaja model' izluchatelja sfericheskikh voln v sloistoj srede // Vestn. inzhenernoj shk. DVFU. 2019. № 1(38). S. 128–133. (In Russ.).

6. Pejn G. Fizika kolebanij i voln. M.: Mir, 2009. 394 s. (In Russ.).

7. Barenblatt G. I. Nelinejnaja teorija rasprostraneni-ja voln. M.: Mir, 2007. 230 s. (In Russ.).

8. Korochencev V. I. Napravlennye i fokusirujushhie antenny v ob#emah, ogranichennyh poverhnost'ju proizvol'noj formy. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2008. 301 s. (In Russ.).

9. Malashenko A. E., Mironenko M. V., Potapenko A. A. Analiz i sintez akusticheskikh antenn v morskome klinie // Morskie intellektual'nye tehnologii. 2016. T. 1, № 3(33). S. 274–279. (In Russ.).

#### Information about the author

**Leonid N. Merkulov** – postgraduate student, Far Eastern Federal University, Russian Island, Ajax, 10, Vladivostok, 690090, Russia.

E-mail: merkulov.ln@dvfu.ru

Статья поступила в редакцию 04.08.2023; принята к публикации после рецензирования 24.11.2023; опубликована онлайн 30.01.2024.

Submitted 04.08.2023; accepted 24.11.2023; published online 30.01.2024.

---