

## Распространение звука в мелководном арктическом волноводе с ледовым покровом

А. А. Луньков,<sup>1,2\*</sup> В. Г. Петников<sup>1†</sup>

<sup>1</sup>Институт общей физики имени А. М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, д. 38

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, ул. 2-ая Бауманская, д. 5  
(Статья поступила 13.07.2017; Подписана в печать 18.09.2017)

Разработана модель звукового канала, типичного для мелководных морей Арктического бассейна, которая может учитывать как наличие неровного ледового покрова, так и слой газонасыщенных осадков. Звуковое поле представляется в виде суммы взаимодействующих мод в рамках метода поперечных сечений. В суммировании участвуют как распространяющиеся, так и «вытекающие» моды, т.е. модель работает и для расчёта звукового поля на близких расстояниях (порядка глубины волновода), и в случае малых скоростей звука в дне (меньше скорости звука в воде). С использованием построенной модели проведены численные эксперименты по распространению звука в мелководной акватории, покрытой льдом. Реализации ледового покрова взяты из общедоступной базы (<http://nsidc.org/data/G01360>), в которой собран большой архив данных эхолоцирования нижней кромки льда в Северном Ледовитом океане. Результаты моделирования показали, что наличие ледового покрова может приводить к увеличению потерь при распространении, которое необходимо учитывать при проектировании гидроакустических систем, работающих в Арктическом бассейне.

PACS: 43.30.+m

УДК: 691.463.21

Ключевые слова: мелководный волновод, ледовый покров, потери при распространении.

### ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение российского сегмента Арктики способствует постановке ряда новых научных задач. Одной из таких задач является акустических мониторинг мелководных акваторий на шельфе Северного Ледовитого океана, что важно, в частности, для обеспечения экологической безопасности этого региона. Особенностью арктических морей является то, что в зимний период они покрыты льдом, что может существенно повлиять на характеристики звукового поля под водой. Задача оценки влияния ледового покрова на распространение звука не является новой, однако большинство предыдущих исследований было в основном сосредоточено на глубоководной части Северного Ледовитого океана, где влиянием дна можно было пренебречь [1].

В настоящей работе указанная задача численно решается для модели мелководного акустического волновода, которая учитывает неровности ледового покрова, а также возможное присутствие верхнего газонасыщенного слоя осадочных пород, имеющего скорость звука меньше, чем скорость звука в воде. В отличие от опубликованных ранее трудов [1, 2] звуковое поле рассчитывается в рамках модового подхода и метода поперечных сечений в приближении плавных возмущений, что не вносит ограничений на амплитуду шероховатостей, которая может достигать 15 м (подводные кили). Расчёт потерь при распространении ведётся для экспериментальных профилей нижней поверхности льда,

взятых из базы <http://nsidc.org/data/G01360>, с дальнейшим усреднением потерь для разных профилей.

### 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В МЕЛКОВОДНОМ ВОЛНОВОДЕ ПОД ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

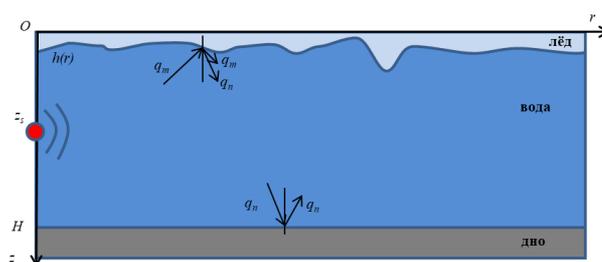


Рис. 1: Схема модельного волновода с ледовым покровом. Стрелками показаны бриллюэновские лучи, отвечающие волноводным модам

Рассмотрим мелководный акустический волновод арктического типа, изображённый на рис. 1, где  $H$  — глубина водного слоя в отсутствие льда,  $h(r)$  — положение нижней границы льда (верхняя граница предполагается ровной),  $z_s$  — глубина источника звука. В рамках метода поперечных сечений в приближении ВКБ для отдельных волноводных мод, амплитуда звукового поля в точке с координатами  $(r, z)$  может быть

\*E-mail: [lunkov@kapella.gpi.ru](mailto:lunkov@kapella.gpi.ru)

†E-mail: [petniko@kapella.gpi.ru](mailto:petniko@kapella.gpi.ru)

записана как [3]

$$P(r, z) = \sum_m^M C_m(r) \frac{\psi_m(r, z)}{\sqrt{q_m(r)r}} \exp \left( i \int_0^r q_m(r') dr' \right). \quad (1)$$

Здесь  $\psi_m(r, z)$  и  $\xi_m(r) = q_m(r) + i\gamma_m(r)/2$  — локальные волноводные моды и постоянные распространения, которые находятся решением задачи Штурма-Лиувилля для каждого сечения волновода с последующей нормировкой:

$$\frac{\partial^2 \psi_m(r, z)}{\partial z^2} + (k(r, z)^2 - \xi_m^2(r)) \psi_m(r, z) = 0.$$

Здесь  $k(r, z) = \omega/c(r, z)$  — волновое число в воде,  $\omega = 2\pi f$  — частота звука,  $c(r, z)$  — профиль скорости звука в воде. На границе вода-лёд и вода-осадочный слой задаются импедансные граничные условия для каждой моды:

$$\left[ \psi_m(r, z) - \frac{i\omega\rho}{Z_{ice,m}(r)} \frac{\partial \psi_m(r, z)}{\partial z} \right]_{z=h} = 0,$$

$$\left[ \psi_m(r, z) + \frac{i\omega\rho}{Z_{bot,m}(r)} \frac{\partial \psi_m(r, z)}{\partial z} \right]_{z=H} = 0.$$

Входные импедансы  $Z_{ice}$  и  $Z_{bot}$  вычисляются согласно [4].

Для нахождения модовых амплитуд  $C_m(r)$  решается система дифференциальных уравнений вида

$$\frac{dC_m(r')}{dr'} = -\frac{\gamma_m}{2} C_m(r') + \sum_n^M b_{mn}(r') \sqrt{\frac{q_m}{q_n}} \times \exp \left( i \int_0^r [q_n(r', f) - q_m(r', f)] dr' \right) C_n(r')$$

с начальными условиями:  $C_m(0) = \psi_m(0, z_s)$ .

Здесь  $b_{nm}$  — коэффициенты взаимодействия между модами, которые при наличии неровной границы со льдом могут быть вычислены как:

$$b_{mn} = \frac{q_n}{2q_m} B_{nm} - \frac{1}{2} B_{mn} \quad \text{при } m \neq n,$$

$$B_{mn} = \int_0^\infty \frac{\rho}{\rho(z)} \psi_m \frac{\partial \psi_n}{\partial r} dz \approx \int_h^H \psi_m \frac{\partial \psi_n}{\partial r} dz.$$

Основная расчётная величина при численном моделировании — потери при распространении звука на интервале дистанций, начиная с расстояния  $r_{in}$ , равного глубине волновода  $H$ , без учёта цилиндрического расширения фронта звуковой волны:

$$PL(r) = 10 \lg \frac{I(r)}{I(r_{in})} + 10 \lg \frac{r}{r_{in}},$$

где

$$I(r) = \frac{1}{H-h} \int_h^H \frac{1}{\rho(r, z)c(r, z)} \times \sum_m^M \left| C_m(r) \frac{\psi_m(r, z)}{\sqrt{q_m(r)r}} \exp \left( i \int_0^r q_m(r') dr' \right) \right|^2 dz$$

— усреднённая по глубине интенсивность звукового поля в водном слое на расстоянии  $r$ , где  $\rho(r, z)$  — плотность воды.

## 2. ПАРАМЕТРЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В табл. 1 приведены параметры арктического волновода, для которого проводились численные эксперименты. Отметим, что дно рассматривалось двух типов: мягкое ( $c_1 < c$ ) и жёсткое ( $c_1 > c$ ). Предполагается, что точечный источник звука, расположенный в центре волновода на глубине  $z_s = 50$  м, излучает тональный сигнал на частоте  $f = 100$  Гц. Расчёты проводились для 10 реализаций неровностей нижней границы ледового покрова. На рис. 2 представлена одна из таких реализаций.

Таблица I: Параметры акустического волновода

Таблица I: Параметры акустического волновода	
Глубина волновода $H$ , м	100
Водный слой	
Скорость звука $c$ , м/с ( $c(r, z) = \text{const}$ )	1440
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> ( $\rho(r, z) = \text{const}$ )	1000
Ледовый покров	
Скорость продольных волн $c_0$ , м/с	3500
Скорость сдвиговых волн $c_{0,s}$ , м/с	1800
Плотность $\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	917
Коэффициент поглощения для продольных волн $\beta_0$ , дБ/λ	0.3
Коэффициент поглощения для сдвиговых волн $\beta_{0,s}$ , дБ/λ	1.0
Дно	
Скорость продольных волн $c_1$ , м/с	800, 1800
Плотность $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	1600
Коэффициент поглощения $\beta_0$ , дБ/λ	0.5

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты численного моделирования приводятся на рис. 3,а и 3,б для жёсткого и мягкого дна, соответственно. Синяя сплошная линия на обоих рисунках отвечает потерям при распространении при фиксированной толщине ледового покрова (2 м). Красные

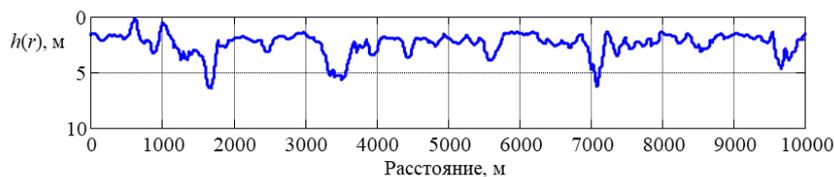


Рис. 2: Неровности нижней границы ледового покрова

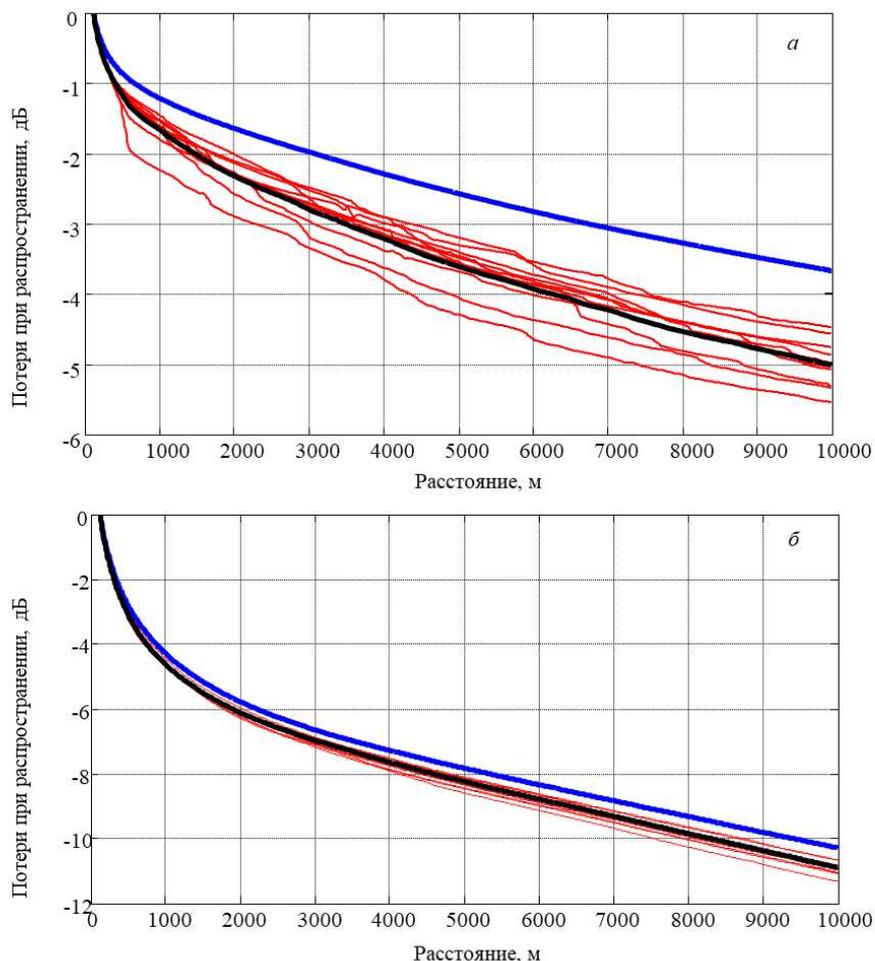


Рис. 3: Потери при распространении для фиксированной толщины льда 2 м — синяя линия, при различных реализациях неровностей ледового покрова — красные кривые, усреднённые потери — чёрная линия. *a* — дно со скоростью звука 1800 м/с, *б* — 800 м/с.

кривые соответствуют различным реализациям неровностей льда, чёрная линия — усреднённые для разных реализаций потери. Анализ полученных данных показывает, что наличие ледового покрова с шероховатостями приводит к увеличению потерь при распространении на величину около  $\leq 1.5$  дБ на расстоянии 10 км. В то же время для жёсткого дна (рис. 3, *a*) этот эффект проявляется наиболее сильно так же, как это имеет место в случае взволнованной морской поверхности [5]. Причина этому сильно нелинейная зависи-

мость коэффициента отражения звука от морского дна от угла скольжения при  $c_1 > c$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе построена модель мелководного арктического волновода с неровной верхней границей вод-лёд. На основе модовой теории и метода поперечных сечений получены оценки средних потерь при распростра-

нении для реалистичных профилей ледового покрова. Показано, что дополнительные потери, связанные с наличием неровного льда могут быть заметны уже на частотах порядка 100 Гц и расстояниях около 10 км. Это следует учитывать при проектировании гидроакусти-

ческих систем для Арктического шельфа России.

Работа выполнена при поддержке комплексной Программы ОФН РАН и РФФИ (проекты 16-29-02036 и 16-32-60194 мол\_а\_дк).

- 
- [1] *Кудряшов В. М.* Акуст. журн. 1996. **42**, № 3. С. 438.  
[2] *Collis J. M., Frank S. D., Metzler A. M., Preston K. S. J.* Acoust. Soc. Am. 2016. **139**, N 5. P. 2672.  
[3] *Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J.* Fundamentals of shallow water acoustics. Springer, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 2012.  
[4] *Бреховских Л. М.* Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.  
[5] *Луньков А. А., Петников В. Г., Черноусов А. Д.* Акуст. журн. 2017. **63**, № 2. С. 180.

---

## Sound propagation in a shallow water arctic waveguide with an ice cover

A. A. Lunkov<sup>1,2,a</sup>, V. G. Petnikov<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>*Prokhorov General Physics Institute of RAS. Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Bauman Moscow State Technical University. Moscow 105005, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>lunkov@kapella.gpi.ru, <sup>b</sup>petniko@kapella.gpi.ru*

Model of the sound channel typical for shallow water seas of the Arctic Ocean is developed. This model includes ice cover roughness and gassy sedimentary layer. Sound field is represented as a sum of coupled modes in the framework of transection approach. Summing is performed over propagating and leaky modes. Thus the model is legitimate even for small ranges from a sound source ( $\sim$ one waveguide depth) and for low sound speed bottoms (sound speed is less than that in water). Using the developed model, numerical simulations are carried out for sound propagation under ice cover. Ice draft realizations are taken from the database (<http://nsidc.org/data/G01360>). Results of the numerical simulations demonstrate that the presence of ice cover may cause the increase in transmission loss, that should be taken into account when designing hydroacoustic systems in arctic seas.

PACS: 43.30.+m

*Keywords:* shallow water waveguide, ice cover, propagation loss.

*Received 13 July 2017.*

### Сведения об авторах

1. Луньков Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией; тел.: (499) 503-83-84, e-mail: lunkov@kapella.gpi.ru.
  2. Петников Валерий Георгиевич — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 503-83-84, e-mail: petniko@kapella.gpi.ru.
-