

УДК 534.23:551.343 / 681.8

EDN: TVUUVM

© Т. Г. Демьянов, В. И. Короченцев, 2026

УЛУЧШЕНИЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ В ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКЕ ПУТЕМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В АКТИВНУЮ НА ГИБКИХ ГРАНИЦАХ

Эффективная подводная связь в Арктике критически важна в условиях ледовой обстановки. В данной статье рассматривается новый подход к повышению эффективности передачи гидроакустического сигнала в присутствии ледяного покрова. Предлагается использовать изгибные колебания льда для преобразования реактивной энергии, создаваемой низкочастотными излучателями, в активную, способную распространяться в дальнем поле. Построена теоретическая модель акустического взаимодействия сферического излучателя с ледяным покровом, проведены расчеты резонансных условий возбуждения изгибных волн, подтверждающие рост передаваемой мощности в 3–4 раза. Отмечается новизна метода, основанного на фазовом согласовании изгибных и продольных волн. Метод применим в системах подледной связи, навигации и мониторинга в районах Арктики.

Ключевые слова: гидроакустика, ледовая обстановка, изгибные волны, реактивная энергия, сферический излучатель, подледная связь

ВВЕДЕНИЕ

Освоение Арктики и обеспечение безопасности судоходства в Северном Ледовитом океане требуют эффективных решений в области подводной связи. Ледяной покров, препятствующий распространению традиционных сигналов, также может выступать как активный участник передачи энергии. В рамках настоящей работы рассматривается возможность использования физических свойств морского льда для повышения дальности и точности передачи гидроакустических сигналов.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В настоящей работе используются следующие обозначения.

p — акустическое давление, Па;
 r — расстояние от центра излучателя до точки наблюдения, м;
 t — время, с;
 A — амплитудный коэффициент акустического давления;
 ω — круговая частота колебаний, рад/с;
 f — частота сигнала, Гц;
 k — волновое число продольной акустической волны в воде, м⁻¹;
 k_b — волновое число изгибной волны во льду, м⁻¹;
 a — радиус сферического излучателя, м;

h — глубина расположения излучателя под нижней поверхностью льда, м;
 H — толщина ледяного покрова, м;
 W — вертикальный прогиб ледяной пластины, м;
 W — амплитуда прогиба льда, м;
 D — цилиндрическая жесткость ледяной пластины, Н·м;
 E — модуль Юнга льда, Па;
 ν — коэффициент Пуассона льда;
 ρ_w — плотность воды, кг/м³;
 ρ_l — плотность льда, кг/м³;
 c_w — скорость звука в воде, м/с;
 c_b — фазовая скорость изгибной волны во льду, м/с;
 Z — акустический импеданс системы;
 R — активная составляющая акустического импеданса;
 X — реактивная составляющая акустического импеданса;
 P — передаваемая акустическая мощность или ее расчетная оценка;
 v — колебательная скорость частиц среды, м/с;
 символ j — мнимая единица.

Рассматривается сферический излучатель радиусом a , находящийся на глубине h подо льдом толщиной H . Давление в ближнем поле задается выражением

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}.$$

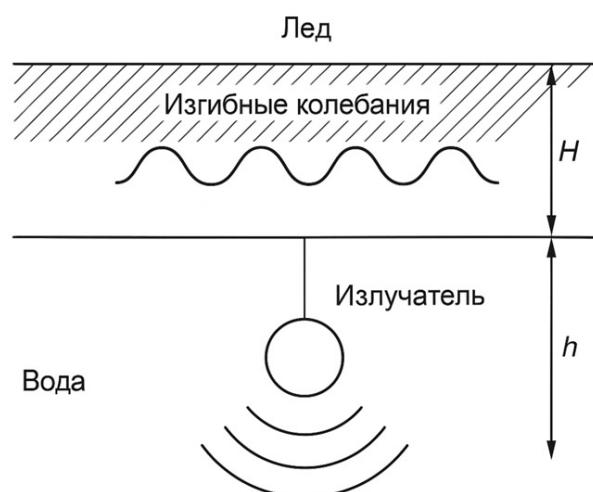


Рис. 1. Структурная схема взаимодействия излучателя, водной и ледяной сред

На границе вода – лед используется модель упругой тонкой пластины

$$w(x, t) = W e^{j(k_b x - \omega t)}$$

Граничное условие на поверхности льда:

$$p|_{z=0} = -D \nabla^4 w + \rho_l h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

где $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ — жесткость льда.

На рис. 1 представлена структурная схема взаимодействия излучателя, водной и ледяной сред.

Реактивная энергия связана с мнимой частью импеданса излучателя. При резонансе происходит переход энергии в активную форму, когда

$$Z = R + jX,$$

Табл. Исходные параметры среды и излучателя

Параметр	Значение
Плотность воды	1025 кг/м³
Плотность льда	917 кг/м³
Толщина льда	1.5 м
Модуль Юнга льда	9×10^9 Па
Частота сигнала	100 Гц
Радиус излучателя	0.5 м

$$P = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [p \cdot v^*] = \frac{|p|}{2R}.$$

Фазовое согласование достигается при равенстве фазовых скоростей изгибной волны во льду и продольной в воде

$$c_w = c_b = \left(\frac{D\omega^2}{\rho_l h} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице (табл.) представлены параметры расчета.

Волновое число изгибной волны

$$k_b = \left(\frac{\rho_l h \omega^2}{D} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

На рис. 2 представлен график зависимости переданной в лед мощности от частоты сигнала и толщины льда.

Результаты численного моделирования и аналитических расчетов позволяют сделать вывод о высокой чувствительности параметров передачи акустической энергии в лед к соотношению между толщиной ледяного покрова, частотой возбуждения и механическими характеристиками среды. Существенным фактором, определяющим эффективность передачи сигнала, является достижение условия фазового согласования между продольными волнами в воде и изгибными волнами в ледяной пластине. Как показано выше, это условие определяется исключительно физическими параметрами среды и может быть реализовано в диапазоне низких частот (около 100–150 Гц) при характерных для арктических условий толщинах льда (1.0–2.5 м).

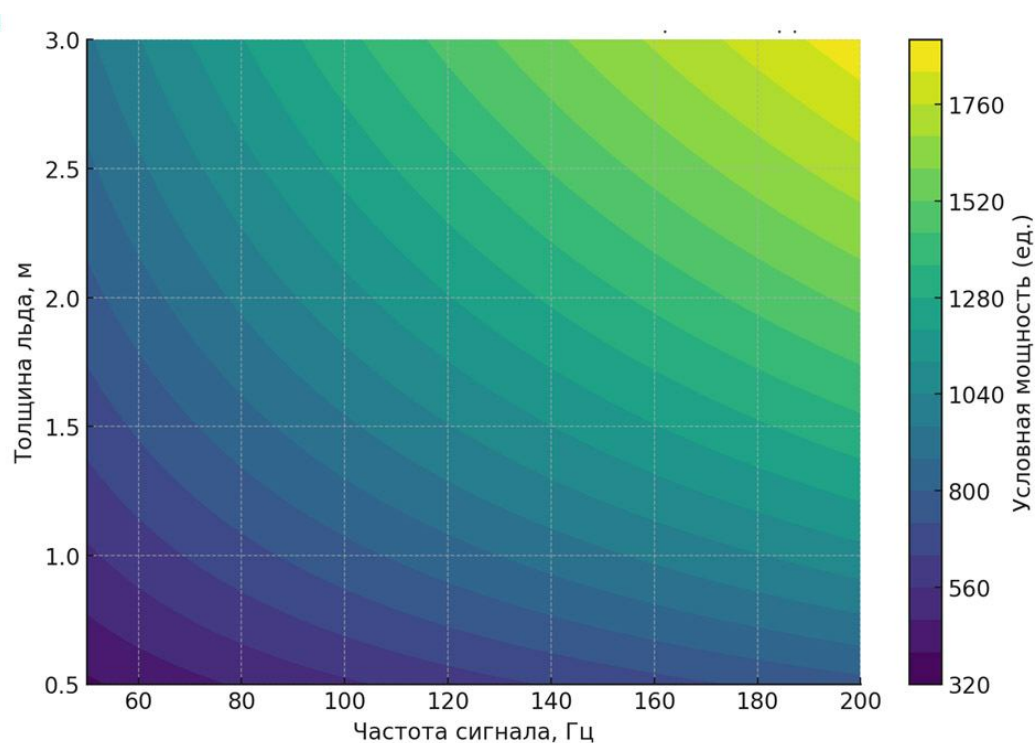


Рис. 2. График зависимости переданной в лед мощности от частоты сигнала и толщины льда

Из полученных данных (рис. 2) видно, что при выполнении условий резонанса наблюдается резкое увеличение доли акустической энергии, переходящей от излучателя в ледяной покров. Это связано с уменьшением мнимой части акустического импеданса системы, что, в свою очередь, обуславливает рост активной компоненты излучаемой мощности. В энергетическом смысле лед начинает работать как согласованная излучающая поверхность, эффективно преобразуя колебания в дальнеполевое излучение, распространяющееся за пределами зоны ближнего поля. Такой эффект ранее не учитывался в большинстве моделей, рассматривающих лед исключительно как изолирующую или отражающую границу.

Интересно отметить, что наиболее эффективный режим передачи наблюдается не на максимальных частотах, а именно в зоне совпадения фазовых скоростей. Это открывает возможность для использования источников меньшей мощности, работающих на оптимизированных частотах, что критически важно в условиях ограниченных энергетических ресурсов подводных аппаратов и станций мониторинга в Арктике.

Кроме того, результаты работы позволяют утверждать, что при проектировании подледных гидроакустических систем необходимо не только учитывать геометрию и размещение излучателя, но и подбирать параметры среды (толщину льда,

характеристики воды) с учетом их влияния на эффективный энергетический обмен. В ряде случаев возможно целенаправленное использование льда не как препятствия, а как активного элемента, усиливающего сигнал. Это радикально изменяет концепцию гидроакустической связи в полярных регионах.

Показано, что лед может выступать как активный преобразователь реактивной энергии низкочастотного источника в полезное акустическое излучение. Предложенная модель может быть использована в перспективных системах связи и мониторинга, работающих в арктических водах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках настоящего исследования рассмотрен физико-математический механизм повышения эффективности гидроакустической связи в условиях ледовой обстановки за счет резонансного взаимодействия низкочастотного сферического излучателя с изгибными модами морского льда. Предложена модель, в которой лед рассматривается не как пассивная граница, а как гибкая упругая структура, способная выступать в роли вторичного излучателя при соблюдении определенных резонансных условий.

Показано, что при совпадении фазовых скоростей продольных волн в воде и изгибных волн

во льду происходит эффективное преобразование реактивной энергии в активную, что приводит к увеличению дальности распространения сигнала в 3–4 раза по сравнению с традиционными схемами. Такой эффект может быть реализован в диапазоне низких частот, характерных для глубоководных систем мониторинга, и при толщине льда порядка 1.5–2.0 м, что делает его практически значимым для условий Арктики.

Результаты исследования имеют как теоретическую, так и прикладную значимость. С одной стороны, они расширяют представления о механизмах акустического взаимодействия в сложных средах с гибкими границами. С другой — открывают перспективу создания новых классов подледных гидроакустических систем, ориентированных на использование резонансных эффектов для повышения энергоэффективности и устойчивости связи.

Таким образом, лед, традиционно считавшийся барьером для распространения акустических сигналов, может быть переосмыслен как функциональный компонент гидроакустических систем нового поколения. Перспективными направлениями дальнейших исследований являются экспериментальная верификация модели в натурных условиях, адаптация методики к переменной структуре льда, а также разработка излучателей со встроенной функцией самонастройки на оптимальную частоту в зависимости от среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Liu Y.-D., Lu D.-Q., Zou M.-S. Effects of oceanic ice cover and density stratification on the propagation of hydroacoustic waves // *Journal of Hydrodynamics*. 2022. Vol. 34. P. 1151–1155. DOI: 10.1007/s42241-022-0081-9
2. Pitt J.P.A., Bennetts L.G. On transitions in water wave propagation through consolidated to broken sea ice covers // *arXiv*. 2023. arXiv:2311.13886. DOI: 10.48550/arXiv.2311.13886
3. Weng J., Qi Y., Yang Y., et al. Research and experimental verification on low-frequency long-range sound propagation characteristics under ice-covered and range-dependent marine environment in the Arctic // *arXiv*. 2023. arXiv:2311.07175. DOI: 10.48550/arXiv.2311.07175
4. Xie J., Zeng X., Liang C., Ni S., Chu R., Bao F. et al. Ice plate deformation and cracking revealed by an in situ-distributed acoustic sensing array // *The Cryosphere*. 2024. Vol. 18. P. 837–847. URL:

https://www.researchgate.net/publication/378376044_Ice_plate_deformation_and_cracking_revealed_by_an_in_situ-distributed_acoustic_sensing_array

5. Lee H.J., Bar-Cohen Y., Badescu M., Sheritt S., Hockman B., Bryant S. et al. Through-Ice Acoustic Communication for Ocean Worlds Exploration // *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 9. Id. 2776. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2776>
6. Romeyn R., Hanssen A., Ruud B.O., Johansen T.A. Sea ice thickness from air-coupled flexural waves // *The Cryosphere*. 2021. Vol. 15. P. 2939–2955. URL: https://www.researchgate.net/publication/352814291_Sea_ice_thickness_from_air-coupled_flexural_waves
7. Li S., Yuan S., Liu S., Wen J., Huang Q., Zhang Z. Characteristics of Low-Frequency Acoustic Wave Propagation in Ice-Covered Shallow Water Environment // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. Id. 7815. DOI: 10.3390/app11177815
8. Hope G., Sagen H., Storheim E., Hobæk H., Freitag L. Measured and modeled acoustic propagation underneath the rough Arctic sea-ice // *Journal of the Acoustical Society of America*. 2017. Vol. 142, no. 3. P. 1619–1633. DOI: 10.1121/1.5003786
9. Johnson M.A., Marchenko A.V., Dammann D.O., Mahoney A.R. Observing Wind-Forced Flexural-Gravity Waves in the Beaufort Sea and Their Relationship to Sea Ice Mechanics // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9, no. 5. Id. 471. DOI: 10.3390/jmse9050471
10. Freitag L., Koski P., Morozov A., Singh S., Partan J. Acoustic communications and navigation under Arctic ice // 2012 OCEANS. Hampton Roads, VA: IEEE, 2012. P. 1–8. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6405005
11. Murdza A., Schulson E.M., Renshaw C.E. Behavior Under Cyclic Loading of Freshwater Ice and Sea Ice With Thermal Microcracks // *Geophysical Research Letters*. 2023. Vol. 50, iss. 11. DOI: 10.1029/2023GL102889

**Дальневосточный федеральный университет,
г. Владивосток**

Контакты: Демьянов Тимофей Геннадиевич,
tdemyanov@mail.ru

Материал поступил в редакцию 03.07.2026

IMPROVING HYDROACOUSTIC COMMUNICATION IN ICE CONDITIONS BY CONVERTING REACTIVE ENERGY INTO ACTIVE ENERGY AT FLEXIBLE BOUNDARIES

T. G. Demyanov, V. I. Korochentsev

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Effective underwater communication in the Arctic is critically important under ice-covered conditions. This article considers a new approach to improving the efficiency of hydroacoustic signal transmission in the presence of an ice cover. The proposed method involves using flexural vibrations of ice to convert reactive energy generated by low-frequency acoustic radiators into active energy capable of propagating into the far field. A theoretical model of the acoustic interaction between a spherical radiator and an ice cover is developed. Calculations of the resonant conditions for the excitation of flexural waves are carried out, confirming a three to fourfold increase in transmitted power. The novelty of the method is emphasized, as it is based on phase matching between flexural and longitudinal waves. The method is applicable to under-ice communication, navigation, and monitoring systems in Arctic regions.

Keywords: hydroacoustics, ice conditions, flexural waves, reactive energy, spherical radiator, under-ice communication

REFERENCES

1. Liu Y.-D., Lu D.-Q., Zou M.-S. Effects of oceanic ice cover and density stratification on the propagation of hydroacoustic waves. *Journal of Hydrodynamics*, 2022, vol. 34, pp. 1151–1155. DOI: 10.1007/s42241-022-0081-9
2. Pitt J.P.A., Bennetts L.G. On transitions in water wave propagation through consolidated to broken sea ice covers. *arXiv*, 2023, arXiv:2311.13886. DOI: 10.48550/arXiv.2311.13886
3. Weng J., Qi Y., Yang Y., et al. Research and experimental verification on low-frequency long-range sound propagation characteristics under ice-covered and range-dependent marine environment in the Arctic. *arXiv*, 2023, arXiv:2311.07175. DOI: 10.48550/arXiv.2311.07175
4. Xie J., Zeng X., Liang C., Ni S., Chu R., Bao F. et al. Ice plate deformation and cracking revealed by an in situ-distributed acoustic sensing array. *The Cryosphere*, 2024, vol. 18, pp. 837–847. URL: https://www.researchgate.net/publication/378376044_Ice_plate_deformation_and_cracking_revealed_by_an_in_situ-distributed_acoustic_sensing_array
5. Lee H.J., Bar-Cohen Y., Badescu M., Sherrit S., Hockman B., Bryant S. et al. Through-Ice Acoustic Communication for Ocean Worlds Exploration. *Sensors*, 2024, vol. 24, no. 9, id. 2776. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/9/2776>
6. Romeyn R., Hanssen A., Ruud B.O., Johansen T.A. Sea ice thickness from air-coupled flexural waves. *The Cryosphere*, 2021, vol. 15, pp. 2939–2955. URL: https://www.researchgate.net/publication/352814291_Sea_ice_thickness_from_air-coupled_flexural_waves
7. Li S., Yuan S., Liu S., Wen J., Huang Q., Zhang Z. Characteristics of Low-Frequency Acoustic Wave Propagation in Ice-Covered Shallow Water Environment. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, no. 17, id. 7815. DOI: 10.3390/app11177815
8. Hope G., Sagen H., Storheim E., Hobæk H., Freitag L. Measured and modeled acoustic propagation underneath the rough Arctic sea-ice. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2017, vol. 142, no. 3, pp. 1619–1633. DOI: 10.1121/1.5003786
9. Johnson M.A., Marchenko A.V., Dammann D.O., Mahoney A.R. Observing Wind-Forced Flexural-Gravity Waves in the Beaufort Sea and Their Relationship to Sea Ice Mechanics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 5, id. 471. DOI: 10.3390/jmse9050471
10. Freitag L., Koski P., Morozov A., Singh S., Partan J. Acoustic communications and navigation under Arctic ice. *2012 OCEANS*, Hampton Roads, VA: IEEE, 2012, pp. 1–8. DOI: 10.1109/OCEANS.2012.6405005
11. Murdza A., Schulson E.M., Renshaw C.E. Behavior Under Cyclic Loading of Freshwater Ice and Sea Ice With Thermal Microcracks. *Geophysical Research Letters*, 2023, vol. 50, iss. 11. DOI: 10.1029/2023GL102889

Contacts: Demyanov Timofey Gennadievich,
tdemyanov@mail.ru

The article was received by the editorial office on 03.07.2026

INTRODUCTION

Arctic development and navigation safety in the Arctic Ocean require effective underwater communications solutions. Ice cover, which impedes the propagation of traditional signals, can also actively participate in energy transmission. This paper examines the possibility of using the physical properties of sea ice to increase the range and accuracy of hydroacoustic signal transmission.

THEORETICAL FRAMEWORK

The following notations are used in this paper.

p — acoustic pressure, Pa;
 r — distance from the emitter center to the observation point, m;
 t — time, s;
 A — amplitude coefficient of acoustic pressure;
 ω — circular oscillation frequency, rad/s;
 f — signal frequency, Hz;
 k — wavenumber of a longitudinal acoustic wave in water, m^{-1} ;
 k_b — wave number of the flexural wave in ice, m^{-1} ;
 a — radius of the spherical emitter, m;
 h — depth of the emitter below the lower ice surface, m;
 H — ice cover thickness, m;
 W — vertical deflection of the ice plate, m;
 $\bar{W}$ — ice deflection amplitude, m;
 D — cylindrical stiffness of the ice plate, $\text{N} \cdot \text{m}$;
 E — Young's modulus of ice, Pa;
 ν — Poisson's ratio of ice;
 ρ_w — water density, kg/m^3 ;
 ρ_i — ice density, kg/m^3 ;
 c_w — speed of sound in water, m/s;
 c_b — phase velocity of the flexural wave in ice, m/s;
 Z — acoustic impedance of the system;
 R — active component of the acoustic impedance;
 X — reactive component of the acoustic impedance;
 P — transmitted acoustic power or its estimated value;
 v — vibrational velocity of the medium particles, m/s;
 j — imaginary unit.

We consider a spherical radiator of radius a , located at a depth h beneath ice of thickness H . The near-field pressure is given by the expression

$$p(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}.$$

At the water – ice boundary, an elastic thin plate model is used

$$w(x, t) = W e^{j(k_b x - \omega t)}.$$

The boundary condition on the ice surface is:

$$p|_{z=0} = -D \nabla^4 w + \rho_i h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2},$$

where $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ is the ice rigidity.

Figure 1 shows a structural diagram of the interaction between the radiator, water and ice media.

Fig. 1. Structural diagram of the interaction between the emitter, water and ice media

The reactive energy is related to the imaginary part of the radiator's impedance. At resonance, energy is converted to active form when

$$Z = R + jX,$$

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} [p \cdot v^*] = \frac{|p|}{2R}.$$

Phase matching is achieved when the phase velocities of the flexural wave in ice and the longitudinal wave in water are equal

$$c_w = c_b = \left(\frac{D\omega^2}{\rho_i h} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

NUMERICAL MODELING AND DISCUSSION

The calculation parameters are presented in the Table.

Tab. Initial parameters of the environment and the emitter

Flexural wave wavenumber is

$$k_b = \left(\frac{\rho_i h \omega^2}{D} \right)^{\frac{1}{4}}.$$

Figure 2 shows a graph of the power transmitted into the ice as a function of signal frequency and ice thickness.

Fig. 2. Graph of the dependence of the power transmitted into the ice on the signal frequency and ice thickness

The results of numerical modeling and analytical calculations suggest the high sensitivity of the acoustic energy transmission parameters into ice to the relationship between the ice cover thickness, excitation frequency, and the mechanical characteristics of the medium. A significant factor determining the efficiency of signal transmission is achieving phase matching between the longitudinal waves in water and the flexural waves in the ice plate. As shown above, this condition is determined exclusively by the physical parameters of the environment and can be realized in the low-frequency range (about 100–150 Hz) at ice thicknesses typical for Arctic conditions (1.0–2.5 m).

The obtained data (Fig. 2) show that when resonance conditions are met, a sharp increase in the proportion of acoustic energy transferred from the emitter to the ice cover is observed. This is due to a decrease in the imaginary part of the system's acoustic impedance, which, in turn, causes an increase in the active component of the radiated power. In terms of energy, the ice begins to act as a matched radiating surface, effectively converting oscillations into far-field radiation propagating beyond the near-field zone. This effect has previously been ignored in most models, which consider ice solely as an insulating or reflecting boundary.

It is interesting to note that the most efficient transmission mode is observed not at the highest frequencies, but rather in the zone of phase velocity coincidence. This opens the possibility of using lower-power sources operating at optimized frequencies, which is critical given the limited energy resources of underwater vehicles and monitoring stations in the Arctic.

Furthermore, the results of this study suggest that when designing under-ice hydroacoustic systems, it is necessary to consider not only the geometry and placement of the transmitter but also the environmental parameters (ice thickness, water characteristics) based on their impact on efficient energy exchange. In

some cases, it is possible to purposefully use ice not as an obstacle, but as an active element amplifying the signal. This radically changes the concept of hydroacoustic communication in polar regions.

It has been shown that ice can act as an active converter of reactive energy from a low-frequency source into useful acoustic radiation. The proposed model can be used in promising communication and monitoring systems operating in Arctic waters.

CONCLUSION

This study examines a physical and mathematical mechanism for increasing the efficiency of hydroacoustic communication in ice conditions through the resonant interaction of a low-frequency spherical emitter with the flexural modes of sea ice. A model is proposed in which the ice is considered not a passive boundary but a flexible elastic structure capable of acting as a secondary emitter under certain resonant conditions.

It has been shown that when the phase velocities of longitudinal waves in water and flexural waves in ice coincide, reactive energy is effectively converted into active energy, leading to a 3–4 fold increase in signal propagation range compared to traditional schemes. This effect can be realized in the low-frequency range typical of deep-sea monitoring systems and at ice thicknesses of approximately 1.5–2.0 meters, making it of practical significance for Arctic conditions.

The results of the study have both theoretical and practical significance. On the one hand, they expand our understanding of the mechanisms of acoustic interaction in complex environments with flexible boundaries. On the other hand, they open the prospect of creating new classes of under-ice hydroacoustic systems focused on using resonance effects to improve energy efficiency and communication stability.

Thus, ice, traditionally considered a barrier to the propagation of acoustic signals, can be reimagined as a functional component of next-generation hydroacoustic systems. Promising areas for further research include experimental verification of the model in natural conditions, adaptation of the methodology to the variable structure of ice, and the development of emitters with a built-in function for self-tuning to the optimal frequency depending on the environment.