

УДК 534.87

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ПРИЕМНЫХ АНТЕНН ДЛЯ ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ В НЕОДНОРОДНОМ ВОЛНОВОДЕ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ

© 2021 г. М. В. Волков<sup>1</sup>, А. А. Луньков<sup>1,\*</sup>, М. М. Макаров<sup>2,\*\*</sup>,  
В. Г. Петников<sup>1,\*\*\*</sup>, А. В. Шатравин<sup>3,\*\*\*\*</sup>

Представлено академиком РАН И.А. Шербаковым 28.10.2020 г.

Поступило 29.10.2020 г.

После доработки 29.10.2020 г.

Принято к публикации 30.10.2020 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований звукоподводной связи на частотах 500–1000 Гц с применением вертикальных цепочек гидрофонов (линейных антенн). Эксперименты проведены в прибрежной, покрытой сплошным льдом области озера Байкал. Продемонстрировано, что использование вертикальных антенн в мелководной акватории с ледовым покровом позволяет эффективно подавлять естественные фоновые шумы, когда такие приемные модули перекрывают весь водный слой по глубине. Это дает возможность на порядок снизить уровень ошибок при передаче информации по сравнению с приемом на одиночный гидрофон.

*Ключевые слова:* звукоподводная связь, ледовый покров, вертикальная приемная антенна

**DOI:** 10.31857/S2686740021010120

В настоящее время активное развитие техники натурального физического эксперимента в мелководных акваториях связано с применением различного вида автономных необитаемых устройств (аппаратов) или даже нескольких таких устройств, работающих в рамках единой сети [1]. Наиболее ярким примером здесь является развитие подобной техники для изучения и практического освоения арктического шельфа, но востребована она и для исследований крупных пресноводных водоемов. Особые требования предъявляются к подводным автономным аппаратам, работающим удаленно, и при наличии сплошного ледового покрова. В этом случае обмен информацией с подобными устройствами и между ними возможен только с помощью звукоподводной связи (ЗПС) [2]. Однако существенные фундаментальные особенности и возможности ЗПС подо льдом нельзя считать

установленными и проверенными в натуральных экспериментах даже в том в случае, когда расстояние  $r$  между корреспондирующими точками невелико и определяется соотношением  $r \approx H - 40H$ , где  $H$  – глубина акватории. Вместе с тем, ввиду ограниченности мощности источников звука на автономных аппаратах, именно для этих расстояний целесообразно использовать ЗПС. Недостаток знаний о ЗПС подо льдом в основном связан с особенностями ледового покрова, для которого характерны многочисленные трещины и шероховатости. Его нельзя рассматривать как цельную твердую пластину с известными акустическими характеристиками. Кроме того, возникновение трещин на льду приводит к генерации импульсных акустических шумов. Все это затрудняет оценку качества ЗПС при численном моделировании, а о натуральных экспериментах известно очень немного [3, 4]. В частности, в этих экспериментах применялся точечный приемник звука, тогда как уже известно о преимуществах использования для ЗПС вертикальных линейных антенн [5, 6]. Такие антенны позволяют подавить помеху, обусловленную межсимвольной интерференцией, а также повысить отношение сигнал/шум при акустических шумах, связанных с ветровым волнением [6].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований возможностей звукоподводной связи с использованием верти-

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> Лимнологический институт Сибирского отделения  
Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П.П. Шишова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: lunkov@kapella.gpi.ru

\*\*E-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru

\*\*\*E-mail: petniko@kapella.gpi.ru

\*\*\*\*E-mail: ashatravin@ocean.ru

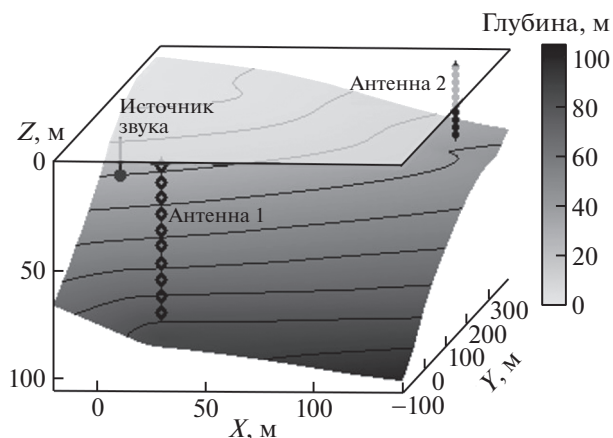


Рис. 1. Схема области проведения эксперимента с указанием профиля дна и мест расположения излучателя звука и приемных цепочек гидрофонов.

кальных приемных антенн в акватории с ледовым покровом, а также приведены оценки повышения эффективности ЗПС за счет их применения. Эксперименты были проведены на озере Байкал в марте 2019 г. В это время года на озере присутствует сплошной ледовый покров. Толщина льда в месте проведения экспериментов составляла около 66 см. Температура и скорость звука в воде слабо менялись с глубиной и составляли  $1^{\circ}\text{C}$  и  $1409\text{ м/с}$  соответственно. Излучатель звука и две вертикальные цепочки гидрофонов были установлены в прибрежной зоне ( $H \leq 86\text{ м}$ ), а уклон дна от берега к центру озера достигал  $45^{\circ}$  (рис. 1).

Источник звука — пьезокерамическая сфера диаметра  $80\text{ мм}$  — находился на глубине  $18\text{ м}$  при глубине места  $55\text{ м}$ . Первая приемная цепочка длиной  $72\text{ м}$ , состоящая из  $J = 9$  гидрофонов, бы-

ла расположена в  $66\text{ м}$  от излучателя в направлении от берега. Глубина в месте расположения первой цепочки составляла  $86\text{ м}$ . Вторая цепочка состояла из  $J = 10$  гидрофонов и была установлена на расстоянии  $353\text{ м}$  в направлении примерно вдоль берега в месте, где толщина водного слоя составляет  $41\text{ м}$ . Глубины расположения гидрофонов показаны в табл. 1. Как показали модельные расчеты [6], именно на близких расстояниях может складываться наиболее неблагоприятная для передачи информации ситуация, связанная с межсимвольной интерференцией.

Для тестирования ЗПС передавался сигнал  $s_0(t)$  с двоичной фазовой манипуляцией. Его зависимость от времени может быть записана в следующем виде:

$$S(t) = \sin(2\pi f_c t + \pi m(t)),$$

где  $f_c$  — несущая частота,  $m(t)$  — временная зависимость, отвечающая набору нулей и единиц, включающему преамбулу из двух одинаковых M-последовательностей, случайный ряд из  $N = 2000$  символов (пробная передаваемая информация  $s_0(n)$ ,  $n$  — номер символа) и постамбулу также в виде M-последовательности. Использовались M-последовательности с разным числом символов от 127 до 1023. Несущая частота  $f_c$  равнялась  $735\text{ Гц}$  (отметим, что частотный диапазон от  $500$  до  $1000\text{ Гц}$  является оптимальным для передачи информации на Арктическом шельфе [6]). При выбранной частоте  $f_c$  мощность излучения составляла  $\approx 0.01\text{ Вт}$ . Одному биту информации отвечало 4 или 6 периодов несущей, что соответствует скорости передачи информации  $183.75$  или  $122.5\text{ бит/с}$ . Результаты, полученные на этих двух режимах, усреднялись. Перед излучением, а также после приема сигнал пропусклся через фильтр ти-

Таблица 1.

Антенна 1 (длинная)			Антенна 2 (короткая)		
Глубина приема, м	BER	SINR, дБ	Глубина приема, м	BER	SINR, дБ
6.7	0.06	-0.9	1.3	0.26	-6.8
14.2	0.03	2.0	4.8	0.27	-7.9
21.7	0.01	2.0	8.2	0.18	-3.4
28.9	0.05	1.2	11.7	0.34	-11.5
36.3	0.07	-0.0	15.1	0.35	-11.4
43.5	0.04	1.3	18.6	0.34	-10.7
			22.1	0.24	-6.5
58.9	0.04	0.6	25.5	0.21	-5.4
66.5	0.10	-0.2	29.0	0.34	-11.1
74.0	0.09	-0.3	32.4	0.36	-11.8
На выходе антенны	<b>0</b>	<b>8.9</b>	На выходе антенны	<b>0.049</b>	<b>0.3</b>

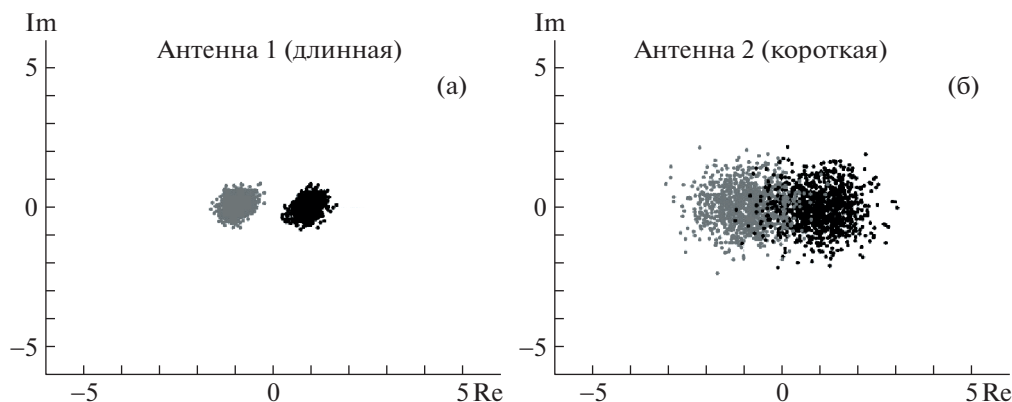


Рис. 2. Мягкие решения на выходе длинной (а) и короткой (б) антенны.

па “корень из приподнятого косинуса”, что позволило избавиться от побочных максимумов в частотной области и сконцентрировать мощность сигнала в заданной полосе частот.

Формировать выходной сигнал приемной антенны можно различными способами. В настоящем исследовании применяется обработка, заключающаяся в когерентном суммировании сигналов с каждого гидрофона с предварительным подбором фазы несущей и выравниванием времени первого прихода (по прямому лучу). Подбор фазы и выравнивание времени выполняется по сигналам преамбулы и постамбулы.

Для количественной оценки качества передачи информации использовался коэффициент битовых ошибок BER и отношение сигнал/(интерференция + шум) SINR. BER равен доле ошибочных бит в посылке. SINR вычислялся следующим образом:

$$\text{SINR} = -10 \lg \left( \frac{\sum_{n=1}^N |s(n) - s_0(n)|^2}{N} \right). \quad (1)$$

Здесь  $s(n)$  – мягкое решение [7] на выходе демодулятора. Мягкое решение нормируется таким образом, чтобы

$$\max_k \left| \sum_n s(n-k) \cdot s_0(n) \right| = N,$$

и в общем случае является комплексным. Примеры мягких решений, полученных для сигналов на выходе первой и второй антенны, показаны на рис. 2.

Результаты оценки качества передачи информации при приеме на отдельные гидрофоны и с использованием антенны приведены в табл. 1. Данные получены при когерентном суммировании мягких решений четырех последовательных

информационных сигналов. Это позволило увеличить SINR примерно на  $10 \lg 4 = 6$  дБ. Отсюда следует, что влияние межсимвольной интерференции на уровень битовых ошибок мало по сравнению с воздействием фонового шума и подледный канал распространения звука не менялся в течение нескольких минут. Несмотря на суммирование, отношение SINR оказалось достаточно низким, что объясняется малой мощностью источника звука. Большее значение SINR на элементах длинной антенны обусловлено их более близким расположением к излучателю. Соответственно на этой антенне удалось добиться безошибочной передачи информации (BER = 0).

Несмотря на общее снижение уровня шума в акваториях со сплошным ледовым покровом по сравнению с акваториями, свободными от льда, эпизодические моменты треска льда могут полностью перекрыть несколько бит информации, принимаемой на одиночный гидрофон, без возможности ее восстановления. В данном случае использование антенны позволяет избежать полной потери информации, так как время прихода импульсной помехи от возникающей вблизи приемной системы трещины будет неодинаковым для различных гидрофонов: помеха сначала приходит на верхний приемник, потом регистрируется на более нижних (рис. 3). Следовательно, на различных гидрофонах будут перекрыты разные информационные биты. (Здесь предполагается, что расстояние от излучателя информационного сигнала до приемной антенны много больше  $H$ , так, что время первого прихода полезного сигнала примерно одинаково на каждом гидрофоне.)

В заключение отметим, что применение вертикальных приемных антенн для ЗПС в мелководных волноводах с ледовым покровом оказывается особенно эффективным как вследствие стабильности канала передачи информации, так и ввиду особенностей поля фоновых помех. Использование таких антенн не исключает применения при необ-

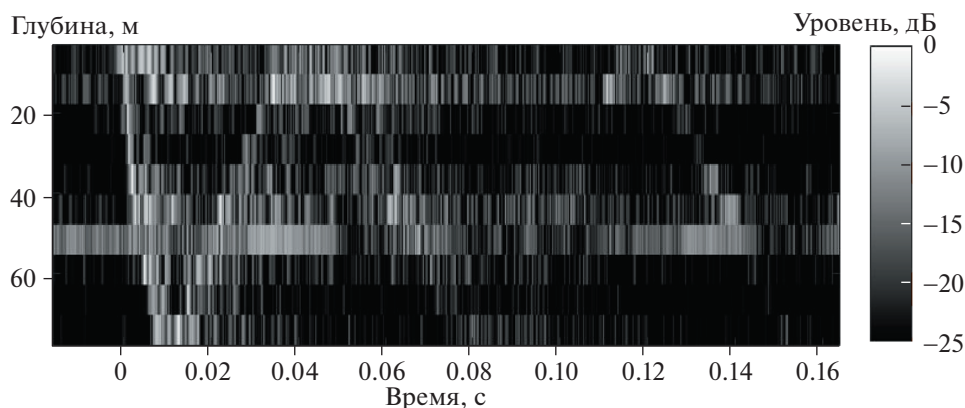


Рис. 3. Пространственно-временная зависимость импульсной помехи, обусловленной треском льда, на вертикальной антенне 1.

ходимости других известных методов адаптивной эквалазации, но существенным образом уменьшает требования к этим методам.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект 19–02–00127) и государственного задания ИО РАН (тема 0149-2019-0011).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pelekanakis K. et al. A simulation study for long-range underwater acoustic networks in the high north // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 2019. V. 44. №. 4. P. 850–864. <https://doi.org/10.1109/JOE.2019.2931853>
2. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // ДАН. 2009. Т. 426. №. 6. С. 821–823.
3. Freitag L., Koski P., Singh S., Maksym T., Singh H. Acoustic Communications under Shallow Shore-Fast Arctic Ice // IEEE Oceans 2017. Anchorage. P. 1–5.
4. Freitag L. et al. Experimental Results in Acoustic Communications under Shore-Fast Greenland Ice // OCEANS 2019-Marseille. IEEE. 2019. P. 1–6.
5. Rouseff D. Intersymbol interference in underwater acoustic communications using time-reversal signal processing // J. Acoust. Soc. Am. 2005. V. 117. № 2. P. 780–787. <https://doi.org/10.1121/1.1841692>
6. Волков М.В., Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. О возможности применения вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи на арктическом шельфе // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 3. С. 332–342. <https://doi.org/10.1134/S0320791919030109>
7. Скляр Б. Цифровая связь: Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом Вильямс, 2003. 1100 с.

## APPLICATION OF VERTICAL RECEIVING ARRAYS FOR UNDERWATER ACOUSTIC COMMUNICATION IN AN INHOMOGENEOUS WAVEGUIDE WITH AN ICE COVER

M. V. Volkov<sup>a</sup>, A. A. Lunkov<sup>a</sup>, M. M. Makarov<sup>b</sup>, and A. V. Shatravin<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

<sup>c</sup> Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS I.A. Scherbakov

The paper presents the results of experimental studies of underwater acoustic communication at frequencies of 500–1000 Hz using vertical chains of hydrophones (linear arrays). The experiments were carried out in the coastal area of Lake Baikal covered with continuous ice. It has been demonstrated that the use of vertical arrays in shallow water areas with ice cover can effectively suppress natural background noise when such receiving modules cover the entire water layer in depth. This makes it possible to reduce by an order of magnitude the level of transmission errors in comparison with reception by a single hydrophone.

**Keywords:** underwater acoustic communication, ice cover, vertical receiving arrays