УДК 534.23(282.256.341)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОНАЛЬНО-ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ВОДЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ

[1]Макаров М.М., [1]Кучер К.М., [2]Попов О.Е., [1]Асламов И.А., [1]Гранин Н.Г.

[1]ФГБУН Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru;

[2]Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

Представлены результаты эксперимента по распространению акустических тонально-импульсных сигналов с частотой заполнения 16,7 кГц и 21 кГц в зимних условиях в южной котловине оз. Байкал со средней глубиной места 1400 м. Излучающий и приемный пьезоэлектрические преобразователи опускались со льда озера на глубины 195 м и 212 м соответственно. Приём сигналов производился при последовательном удалении излучателя от приёмника на расстояние от 500 м до 25 км. Анализировались сигналы, распространяющиеся вдоль рефрагировавшего в водном слое луча, без отражения от дна или ледовой поверхности озера. Измеренные амплитуды зарегистрированных сигналов корректировались на рассчитанный фактор фокусировки. Оценивались значения коэффициента затухания на исследуемых частотах, которые сравнивались с прогнозируемыми значениями коэффициента поглощения звука в пресной, слабо минерализованной воде оз. Байкал. Обсуждаются результаты проведенного эксперимента. Измеренные экспериментально величины затухания для уникальных условий распространения звука в пресной воде озера Байкал важны для проверки области применимости полуэмпирических формул расчёта поглощения звука. Полученные результаты пополняют банк результатов измерений затухания звука в воде.

Ключевые слова: гидроакустика, затухание звука в воде, распространение звука, сейшевые колебания, оз. Байкал

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PROPAGATION OF TONE-PULSE SIGNALS IN THE WATER OF THE LAKE BAIKAL

[1]Makarov M.M., [1]Kucher K.M., [2]Popov O.E., [1]Aslamov I.A., [1]Granin N.G.

[1]Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, e-mail: mmmsoft@hlserver.lin.irk.ru;

[2]Oboukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow

The results of the experiment on the propagation of acoustic tone-pulse signals with 16.7 kHz and 21 kHz frequencies in winter conditions in the Southern basin of Lake Baikal are presented. The transmitter and receiver were deployed from the ice surface to the 195 m and 212 m depths respectively, while average depth of place was 1400 m. During the experiment, the transmitter was consecutively moved away from the receiver at a distances from 500 m to 25 km. Signals propagated along the beam refracted in the water layer without reflection from the bottom or ice surface were analyzed. The measured amplitudes of the recorded signals were corrected in accordance with the calculated focusing factor. The values of the attenuation coefficient at the investigated frequencies were estimated and compared with the predicted values of the sound attenuation coefficient in the fresh, slightly mineralized water of Lake Baikal. The results of the experiment are discussed. Experimentally measured attenuation values for unique sound propagation conditions in fresh water of Lake Baikal are important for checking the applicability of semi-empirical formulas for calculating sound attenuation. The obtained results supplement the bank of experimental measurements of sound attenuation in water.

Keywords: hydroacoustics, attenuation of sound in water, sound propagation, seiche oscillations, Lake Baikal

В 1963 г. К. Лерой провел уникальный эксперимент по измерению затухания звука на севере Алжиро-Праванского бассейна [1]. В этом эксперименте из всех регистрируемых акустических импульсов, распространяющихся от источника к приемнику по разным траекториям, анализировались только те, которые проходили вдоль рефрагирующих лучей без отражения от поверхности или дна моря. Это позволило избежать учёта не известных с достаточной точностью коэффициентов отражения от морского дна и взволнованной поверхности.

Во второй половине XX века на частотах выше 10–20 кГц проводились измерения затухания звука как в морской воде, так и в пресной воде. В целом прямые натурные измерения затухания звука на этих частотах в морской среде не противоречили результатам лабораторных исследований в мегагерцовом диапазоне частот. Однако твердой уверенности в справедливости экстраполяций, полученных в мегагерцовом диапазоне частот закономерностей в поведении коэффициентов затухания для пресной воды на более низкие частоты (<100 кГц) не было [2]. Некоторые натурные измерения в мелководных пресных озерах, проведенные американскими исследователями на частотах 1–10 кГц, а также лабораторные измерения с водой, соответствующей

пресным водам оз. Танганьика на частотах 10–100 кГц, дали завышенные (по сравнению с экстраполированными с высоких частот) значения коэффициента затухания [3]. В связи с этим измерения затухания звука в самом глубоком пресноводном озере Байкал, с его уникальными условиями для проведения экспериментов по распространению акустических сигналов, представляют несомненный интерес.

Благодаря большим глубинам (максимальная 1637 м, средняя 733 м), оз. Байкал позволяет проводить исследования, подобные морскому эксперименту К. Лероя 1963 г. Характерной особенностью байкальских вод, является их низкая минерализация S примерно 0,096 г/кг с возможными изменениями ±8 % [4]. Как и на большинстве озер умеренных широт, в течение лета вертикальный градиент температуры воды оз. Байкал положителен в водной толще, что ведет к устойчивой плотностной стратификации с поверхностной температурой около 14 °С. Зимой, поверхностный слой обратно стратифицирован по температуре, и в то же время устойчиво стратифицирован по плотности. Таким образом, по стратификации воды пелагиали оз. Байкал характеризуются верхним слоем выше 250 м глубины и постоянно стратифицированной глубинной водной массой ниже [5]. В летние месяцы формируется устойчивый подводный звуковой канал, ось которого залегает на глубинах 150–200 м, а зимой формируется устойчивый подледный звуковой канал, ось которого лежит на границе лед – вода [6]. Большая дальность распространения акустических импульсов без отражений от дна или поверхности озера позволяет проводить измерения затухания звука в килогерцовом диапазоне, который в пресной воде, может быть, очень мал. Цель исследования: проведение экспериментальных работ по измерению коэффициентов затухания звука на частотах от 10 до 30 кГц в ультрапресной воде озера Байкал.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные работы проводились в период ледостава 2011 г. в 5 км от мыса Березовый (открытая часть южной котловины оз. Байкал). Средняя глубина в районе проведения работ составляет 1390 м. Для эксперимента по оценке величины затухания акустических тональных сигналов килогерцового диапазона был разработан и изготовлен программно-аппаратный комплекс «Луч», состоящий из двух основных частей: излучающей и приемной (рис. 1) [7]. Они не зависимы друг от друга, но имеют средства управления и мониторинга, позволяющие настраивать параметры излучаемых тональных сигналов, и контролировать состояние излучающей части комплекса.

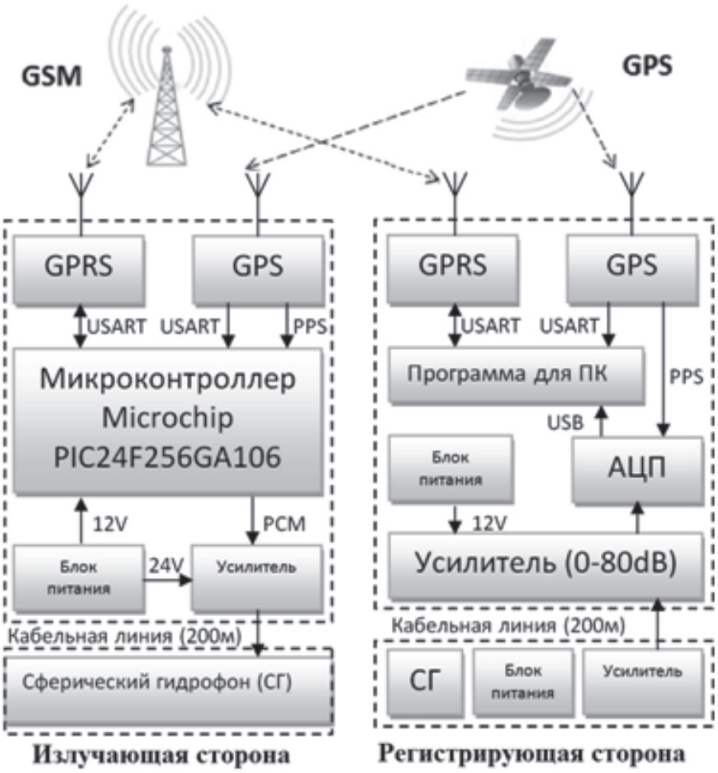

Рис. 1. Принципиальная блок-схема комплекса и взаимодействие частей программно-аппаратного комплекса «Луч». СГ – сферический гидрофон, АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Излучающая часть выполнена на основе микроконтроллера, который измеряет температуру и заряд аккумуляторной батареи, управляет периферийными модулями (GPS приемником, GPRS модемом) и формирует выходной сигнал для гидроакустического излучателя. В качестве электроакустического преобразователя использована пьезокерамическая сфера из материала ЦТС19 (титанат бария $BaTiO_3$) диаметром 80 мм, защищенная полиуретановой оболочкой.

Приемная часть выполнена на базе персонального компьютера и состоит из внешнего модуля USB АЦП фирмы LCard, GPS приемника, GPRS модема, усилителя с переключаемым коэффициентом усиления (от 0 до 80 дБ, с декадным шагом), приемного пьезокерамического преобразователя и специально разработанного программного обеспечения. В качестве электроакустического преобразователя использована сфера из материала ЦТС19, диаметром 50 мм, в полиуретановой оболочке. Сфера закреплена на корпусе из титанового сплава, в котором размещен предварительный малошумящий усилитель с собственным батарейным питанием, обеспечивающий первичное усиление электрического сигнала с пьезокерамического преобразователя и согласование с длинной дифференциальной линией связи (200 м).

В эксперименте излучающая и приемная сферы погружались на глубину около 200 м и фиксировались в горизонтальной плоскости при помощи металлической конструкции Т-образной формы с шарниром в верхней части. От концов горизонтальной перекладины к поверхности уходили две оттяжки. К нижней части металлической конструкции крепился гидроакустический преобразователь – сфера. Данная схема подвеса позволила сориентировать приемную и излучающую сферы в пространстве относительно друг друга, исключив вращение гидрофонов, и обеспечить, таким образом, постоянную взаимную ориентацию. Для снижения парусности оттяжки были выполнены из полипропиленового шнура толщиной 1,5 мм.

Гидрологическое обеспечение эксперимента велось с использованием CTD зонда SBE25 Sea Bird Electronics. Абсолютная точность измерения: электропроводности – 40 μS/m, температуры – $3*10^{-4}$ °C, давления – $2*10^{-3\%}$. Однократно в течение короткого промежутка времени были выполнены CTD профилирования до дна в точках 5, 10 и 15 км от точки излучения, и в течение всего эксперимента было выполнено четыре CTD профилирования в точке приема. Для непрерывного фиксирования гидрологических параметров, вместе с излучающим гидрофоном на глубину опускался CTD зонд SBE37, который обладает схожими техническими характеристиками с CTD SBE25. По данным зондирования, выполнялся расчет профиля скорости звука в программном пакете TEOS [8].

Постоянство измеряемых параметров определялось квазистационарными условиями эксперимента и параметрами аппаратуры: контролировалось напряжение излучения, температура аппаратуры и батарей. На всех дистанциях зондирующие импульсы (ЗИ) излучались с одинаковыми характеристиками, следовательно, изменения амплитуды принимаемых ЗИ на различных дистанциях могли быть вызваны только условиями распространения ЗИ вдоль экспериментальной трассы. Синхронизация времени излучения и приема производилась комплексом «Луч» в автоматическом режиме с использованием синхронизирующих сигналов от GPS приемников, что позволило оценить точное время распространения ЗИ по трассе и его вариации. В качестве зондирующих импульсов использованы тональные посылки с частотой заполнения 16,7 и 21 кГц. Длительность ЗИ составляла 100 периодов несущей частоты, 5,9 мс и 4,7 мс соответственно для 16,7 и 21 кГц. Выбранная длительность импульса, с одной стороны, позволяла достигать большого отношения сигнал/шум за счёт узкополосной фильтрации при приёме (полоса 660 Гц и 830 Гц соответственно), а с другой стороны, не происходило наложения на глубоководный импульс приходящих за ним переотраженных сигналов. Следует отметить, что на максимальном расстоянии (25 км) следующий за водным импульс, отражённый от дна, приходит с задержкой в 5 мс, что на частоте 16,7 кГц приводит к его наложению на окончание водного импульса. Однако это не приводило к искажению амплитуды водного импульса и соответственно не являлось помехой измерениям.

Программа излучающей части комплекса работала по замкнутому циклу. Однократно излучался один зондирующий импульс на фиксированной несущей частоте, через время, заведомо большее времени распространения ЗИ на данной дистанции, комплекс перенастраивался и излучался следующий зондирующий импульс на второй фиксированной частоте. Таким образом, частоты тональных посылок перебирались, и набиралось необходимое количество акустических записей для статистической достоверности регистрируемых данных. Эксперимент на каждой дистанции проводился не менее 1,5 суток для регистрации возможных суточных вариаций амплитуды принимаемых ЗИ.

Результаты исследования и их обсуждение

Перед проведением натурного эксперимента было выполнено численное моделирование распространения звука, подобно [9]. Результаты расчёта: времена распространения ЗИ, факторов фокусировки и лучевая картина, наглядным образом демонстрирует распространение ЗИ (рис. 2).

В условиях зимней стратификации ЗИ распространяются, рефрагируя, по лучевым траекториям, описывающим дуги разной длины, в зависимости от угла выхода луча. Лучи, выходящие под малыми углами скольжения, распространяясь от источника к приёмнику, отражаются от льда. Чем больше угол скольжения луча в источнике, тем глубже будет находиться точка заворота луча и тем большую интегральную скорость он будет иметь. ЗИ, распространяющийся по лучевой траектории, с самой глубокой точкой заворота, несмотря на самую большую длину преодолеваемого пути, будет распространяться от точки излучения до точки приема за самое короткое время, вследствие самой большой интегральной скорости. Следовательно, всегда между точками излучения и приема ЗИ будет существовать такая траектория, по которой звуковой импульс будет распространяться за наименьшее время без отражений от льда.

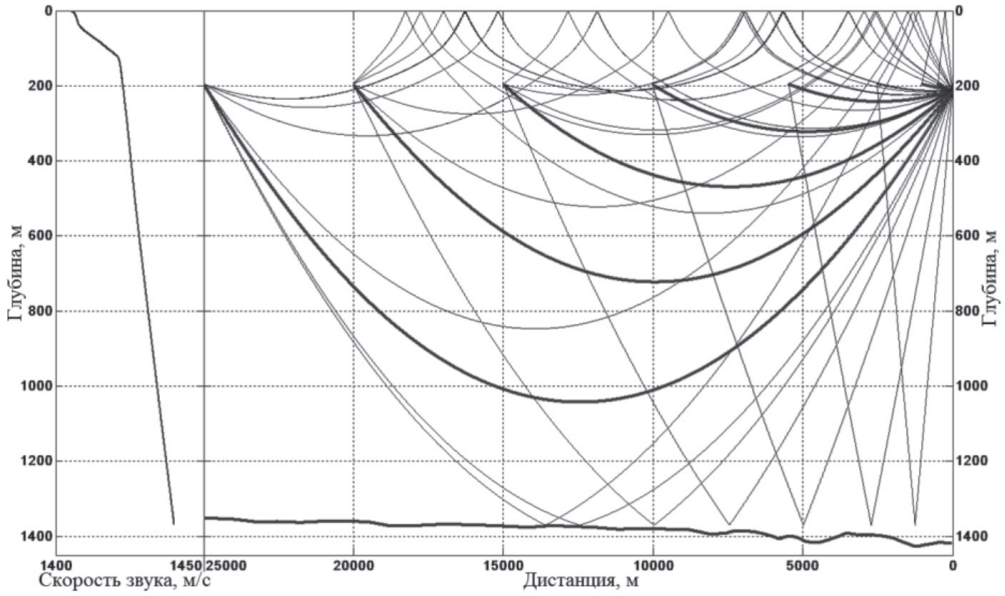

Рис. 2. Вертикальный профиль скорости звука в точке приема и рассчитанная лучевая картина. Проанализированные лучи – жирные, рельеф дна – коричневый

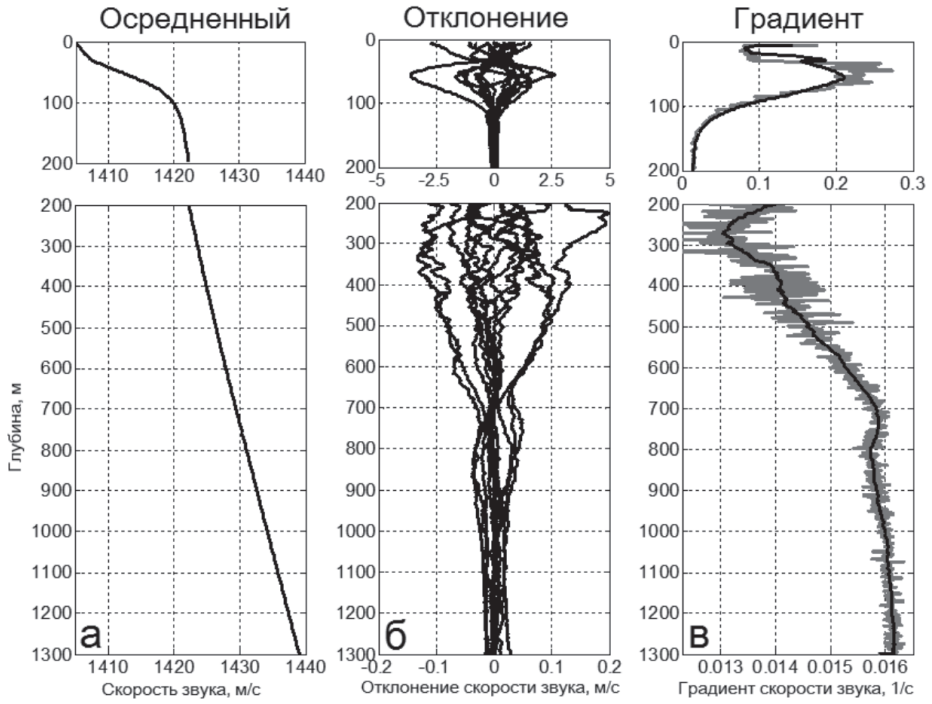

Рис. 3. Гидрологические особенности района проведения эксперимента: а) средний профиль скорости звука по данным эксперимента; б) флуктуации скорости звука; в) зависимость градиента скорости звука от глубины

Эксперимент был проведен на 8 дистанциях от 500 м до 25 км. На каждой дистанции в среднем было выполнено по 800 измерений характеристик импульсов. Количество измерений на всех дистанциях составило 5492. В каждой точке излучения выполнялось CTD зондирование (conductivity, temperature, depth – электрическая проводимость, температура, давление), по данным которого рассчитывался вертикальный профиль скорости звука. Данные измерения показали изменчивость вертикального

профиля скорости звука как вдоль экспериментальной трассы, так и во времени. Максимальные различия в скорости звука, до ±3 м/с, наблюдаются на глубинах от 50 до 150 м, глубже этого горизонта отклонения не превышают ±0,2, а чаще ±0,1 м/с (рис. 3).

В диапазоне глубин 200–1300 м градиент скорости звука (по усреднённому в интервале 50 м профилю скорости звука) меняется в пределах от 0,0133 $с^{-1}$ на глубине 400 м до 0,0162 $с^{-1}$ на глубине 1300 м, т.е. с глубиной градиент несколько возрастает. Положительный знак градиента скорости звука свидетельствует о том, что ЗИ, распространяющиеся по более глубоким траекториям, будут подвержены влиянию большего фактора фокусировки. Рассчитанные факторы фокусировок лучей для расстояний 0,5; 1; 2,5; 5; 10; 15; 20 и 25 км составляли соответственно, 1,00; 1,00; 1,00; 0,99; 0,84; 1,03; 1,20 и 1,14. Рассчитанные факторы фокусировки используются для коррекции измеренных амплитуд ЗИ.

Моделирование распространения звука позволило рассчитать характерные особенности распространения ЗИ: длину луча, глубину заворота, интегральную скорость и др. (таблица). Полученные результаты позволяют сделать вывод о высокой точности соответствия рассчитанных и измеренных времён распространения ЗИ вдоль акустической трассы. Максимальная разница времени распространения ЗИ не превышала 4 мс (дистанция 5,5 км), а в среднем по дистанциям составляла около 2 мс.

На рис. 4 представлено изменение амплитуды ЗИ на дистанции 15 км для двух рабочих частот. Анализ первого ЗИ показывает стабильность времени его распространения и амплитуды на протяжении всего цикла измерений на каждом расстоянии. Флуктуации амплитуды ЗИ не превышают 2 дБ, а его времени прихода не более 0,5 мс. При этом отмечается плавное изменение времени распространения первого ЗИ, что, вероятно связано с изменениями характеристик водной среды.

Характерные условия распространения ЗИ

Дистанция, м	Длина луча, м	Глубина заворота, м	Время расчетное, с	Время измеренное, с	Разница времен, мс	Интегральная скорость, м/с	Скорость измеренная, м/с
490	490	212	0,345	0,347	2	1422,72	1412,47
1025	1025	212	0,721	0,721	0	1422,78	1422,78
2522	2522	214	1,772	1,774	2	1422,89	1421,43
5474	5475	243	3,847	3,851	4	1423,19	1421,59
10028	10031	323	7,045	7,048	3	1423,96	1423,40
14993	15005	470	10,528	10,530	2	1425,25	1424,94
20009	20043	723	14,040	14,042	2	1427,60	1427,35
24992	25063	1043	17,518	17,520	3	1430,77	1430,56

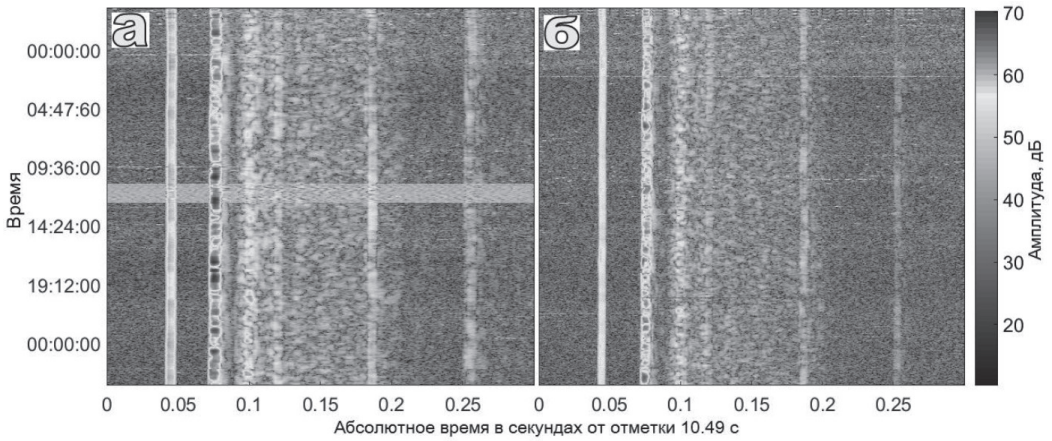

Рис. 4. Изменение амплитуды ЗИ во времени на дистанции 15 км для частот: а) 16701, б) 21052 Гц. Экспериментальный импульс регистрируется в 0,04 с

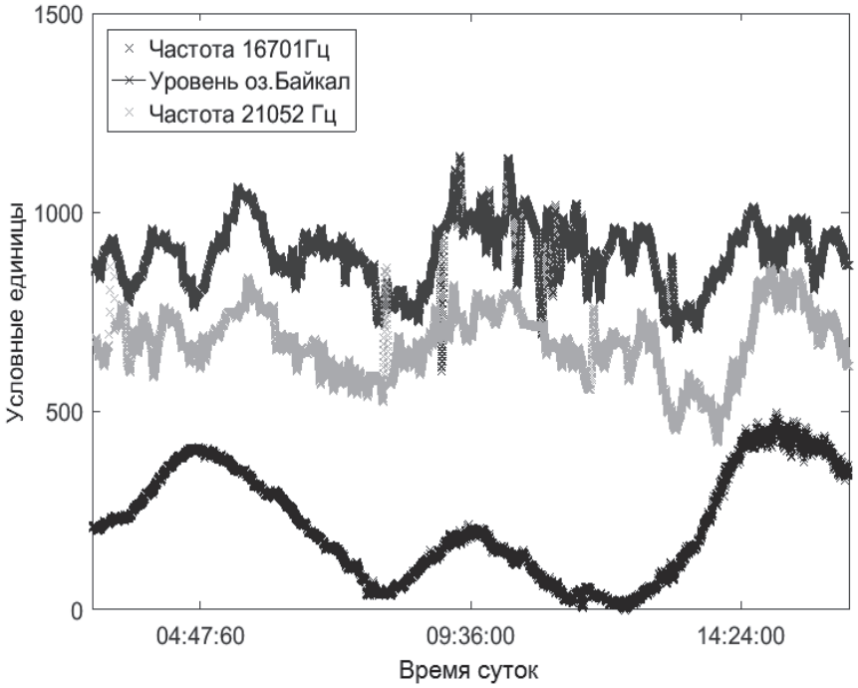

Рис. 5. Изменение амплитуды принимаемых ЗИ на двух рабочих частотах

При сравнении изменений во времени амплитуд ЗИ на двух частотах, было отмечено, что амплитуды изменяются синхронно, что, вероятно, обусловлено изменениями условий распространения ЗИ. На рис. 5 представлена серия измерений амплитуды ЗИ на обеих частотах, полученная в течение 12 часов. За это время уровень Байкала три раза достиг локального максимума. Время между максимумами соответствует периоду сейши первой моды. Аналогичным образом ведут себя амплитуды зарегистрированных ЗИ. Мы делаем предположение, что, возможно, сейшевые колебания уровня озера приводят к заглублению или, напротив, к подъему изотерм, что влияет на величину фактора фокусировки и в конечном итоге на амплитуду ЗИ.

Экспериментальная оценка коэффициента затухания для частоты 21 кГц составила 0,216 дБ/км, что оказалось немного выше теоретической 0,19 дБ/км (около 0,2 %) [10]. На частоте 16,7 кГц экспериментальная оценка затухания 0,075 дБ/км оказалась немного меньше теоретической 0,12 дБ/км (около 0,5 %) [10]. Одним из объяснений наблюдаемых несовпадений может быть тот факт, что затухание на исследуемых частотах весьма мало и на точность оценки сильно влияют ошибки измерений.

Заключение

Разработанный комплекс, благодаря синхронизации излучающей и приемной стороны, позволил получить высокоточные данные о времени распространения экспериментальных ЗИ. Контроль параметров излучаемых ЗИ, а также специальная конструкция подвеса гидрофона позволили исключить некоторые факторы неопределенности и провести точное измерение амплитуды зарегистрированных ЗИ. Измеренные экспериментально коэффициенты затухания звука в уникальных условиях пресноводного озера Байкал важны для проверки области применимости полуэмпирических формул расчёта поглощения звука. Полученные результаты пополняют банк экспериментальных данных измерений затухания звука. Разработанный комплекс аппаратуры может быть использован для контроля условий распространения звука на больших расстояниях, что позволит следить за состоянием водной толщи озера Байкал.

Работа выполнена в рамках темы 0345–2016–0008 (АААА-А16-116122110065-4) «Оценка и прогноз экологического состояния озера Байкал и сопряженных территорий в условиях антропогенного воздействия и изменения климата».

Список литературы

1. Житковский Ю.Ю. Подводная акустика / Ю.Ю. Житковский, Ю.П. Лысанов; пер. с англ., ред. Л.М. Бреховских. – М.: Мир, 1970. – 495 с.

2. Экспериментальные измерения частотной зависимости затухания звука в ультрапресной воде озера Байкал / М.М. Макаров [и др.] // Акустика океана: докл. XIV шк.-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. – М., 2013. – С. 73–77.

3. Mellen R.H., Browning D.G., Simmons V.P. Acoustic attenuation in Lake Tanganyika. Nature, 1979, vol. 277, pp. 374–375.

4. Сезонные изменения вертикальной структуры водной толщи пелагиали Южного Байкала / В.В. Блинов [и др.] // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 3. – С. 285–295. DOI: 10.1134/S0097807817030058.

5. Шерстянкин П.П. Вертикальная устойчивость и частота Вяйсяля-Брента глубоких природных вод на примере озер Байкал, Танганьика и Мирового океана / П.П. Шерстянкин, Л. Н.Куимова // ДАН. – 2009. – Т. 429, № 5. – С. 673–678.

6. Шерстянкин П.П. Основные черты поля скорости звука и подводный звуковой канал в открытом Байкале / П.П. Шерстянкин, Л.Н. Куимова // Докл. РАН. – 1992. – Т. 324, № 1. – С. 187–190.

7. Макаров М.М. Изучение дальнего распространения звука на озере Байкал: оборудование, экспериментальные данные / М.М. Макаров, А.Г. Ченский // Акустика океана: докл. XII шк.-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. – М., 2009. – С. 119–122.

8. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties.// Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides UNESCO (English), 2010, No. 56, pp. 196.

9. Гостев В.С. Компьютерное моделирование натурного эксперимента по рассеянию звука тонкоструктурными неоднородностями / В.С. Гостев, Р.Ф. Швачко // Акустический журнал. – 2008. – Т. 2, № 54. – С. 262–266.

10. Вадов Р.А. Поглощение и затухание низкочастотного звука в морской среде / Р.А. Вадов // Акустический журнал. – 2000. – Т. 46, № 5. – С. 624–631.