Известия НАН Армении, Физика, т.61, №4, с.676–684 (2026)

УДК 550.34; 34.8; 556.55
DOI: 10.54503/0002-3035-2026-61.4-676

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОЗЕРА ПАРЗ ЛИЧ, АРМЕНИЯ

Т.Г. ДОВЛАТЯН, С.А. МХИТАРЯН, Г.Р. ДРМЕЯН, А.Л. АВАКЯН, Х.В. КОТАНДЖЯН, В.В. НАЛБАНДЯН, С.В. БАРСЕГЯН, З.Г. МКРТЧЯН, В.С. АРУТЮНЯН, Д.Э. БАГДАСАРЯН, И.А. БАБАЯН, А.А. ПАПАЗЯН*, А.Г. МКРТЧЯН

Институт прикладных проблем физики НАН Армении, Ереван, Армения

*e-mail: papazyanartur@mail.ru

(Поступила в редакцию 16 сентября 2026 г.)

Работа посвящена экспериментальным исследованиям процесса распространения акустосейсмических и гидроакустических волн в многослойных средах, содержащих неоднородности с определёнными резонансными свойствами (например, пещерами, естественными и искусственными водоёмами и т. д.), а также явлений, возникающих вследствие взаимодействия акустосейсмических и гидроакустических волн с такими неоднородностями. В данной работе в качестве такой среды с неоднородностями рассматривается озеро Парз Лич, расположенное на территории Республики Армения. В рамках проведенных научно-технических исследований было разработано уникальное оборудование, на базе которого создана экспериментальная установка для проведения необходимых исследований. Экспериментально определены собственная частота озера, его акустические свойства и возможность использования озера в качестве чувствительной антенны для приёма и регистрации слабых акустосейсмических и гидроакустических волн.

1. Введение

Настоящая работа продолжает серию исследований распространения акустосейсмических и гидроакустических колебаний в многослойных средах с резонансными неоднородностями и возможности использования жидкостных «капсул» и пещер в качестве чувствительных антенн [1–3]. Полученные результаты могут способствовать развитию систем мониторинга и раннего предупреждения о землетрясениях и других явлениях, сопровождающихся акустосейсмическими и гидроакустическими колебаниями [4, 5].

В исследованиях [1–3] экспериментально и теоретически обоснована эффективность использования водоёмов в качестве чувствительных антенн для приёма и регистрации акустосейсмических и гидроакустических волн. На озере Севан наблюдалась реверберация сейсмоакустических волн, позволяющая рассматривать водоёмы определённой геометрии также как усилители-накопители этих колебаний. В Институте прикладных проблем физики (ИППФ) это направление развивается с применением методов акустофизики, в частности модулированной мёссбауэровской спектроскопии для высокочувствительной регистрации гидроакустических сигналов [1].

Резонансные явления в водоёмах исследовались также другими авторами.

Землетрясение на Аляске 1964 г. вызвало сейши, зарегистрированные более чем на 850 гидрометрических постах Северной Америки и Австралии [6]. Моделирование для озера Тахо показало возможность образования цунами подобных волн и длительных сейшевых колебаний при землетрясениях с Mw > 7 [7]. Общие закономерности таких колебаний рассмотрены в работе [8], где показано, что периоды поверхностных сейш определяются преимущественно геометрией бассейна и глубиной воды. Собственные частоты и формы колебаний исследованы для озера Чапала [9], а методы модального анализа позволяют оценивать энергетические и диссипативные характеристики водоёмов по натурным данным [10].

Для мониторинга слабых акустосейсмических и гидроакустических сигналов в морских и океанических акваториях применяются гидрофоны и донные сейсмографы. Автономные гидрофонные системы использовались для длительной регистрации слабых сейсмических и вулканических сигналов [11]. Их эффективность при обнаружении малоамплитудных землетрясений и T-фаз подтверждена исследованиями срединно-океанических хребтов [12]. Гидрофонная сеть в Северной Атлантике обеспечила снижение порога обнаружения событий и регистрацию региональных и телесейсмических P-фаз [13].

Аналогичные исследования проводятся и в замкнутых водоёмах. На озере Байкал зарегистрированы изменения уровня воды и температуры придонного слоя, связанные с удалёнными землетрясениями [14]. В озере Бива наблюдались сейши после землетрясения Тохоку 2011 г. [15], а для малых водоёмов предложен метод оценки амплитуды сейш, вызванных удалёнными землетрясениями [16]. Исследования модельного водохранилища подтвердили зависимость характеристик сейш от геометрии и стратификации бассейна [17]. Гидроакустический мониторинг применялся также для регистрации предэруптивного шума в озере Келут [18] и локализации источников геоакустической эмиссии в озере Микижа [19]. Таким образом, замкнутые водоёмы могут служить одновременно резонансными системами и естественными площадками для приема и регистрации слабых сигналов.

Работы [6–10] посвящены преимущественно низкочастотным колебаниям и собственным модам водных бассейнов, тогда как здесь рассматривается более широкий диапазон сейсмоакустических и гидроакустических колебаний. Поэтому они используются для интерпретации резонансных откликов водоёмов, но не для прямого количественного сравнения со спектрами сигналов, зарегистрированными на озере Парз Лич.

2. Экспериментальная установка

На основе результатов наших предыдущих экспериментальных и теоретических исследований [1], а также с учётом данных геологических исследований в окрестностях озера Парз Лич, была разработана, изготовлена и использована уникальная экспериментальная установка для приема и регистрации акустосейсмических и гидроакустических колебаний в диапазоне частот 10^{-1}–10^{3} Гц, схема которой представлена на рис.1.

Для одновременной регистрации горизонтальной и вертикальной составляющих сейсмических процессов на берегу озера в экспериментальной установке

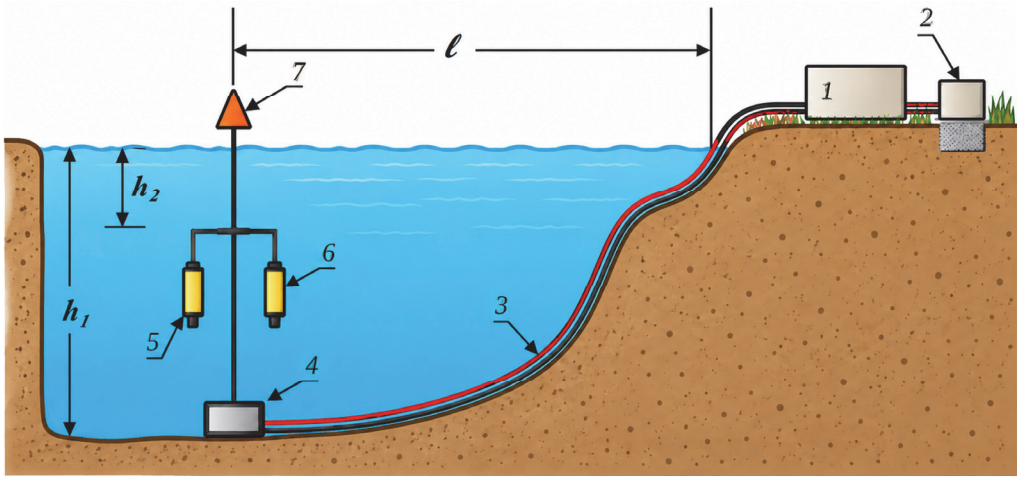


Рис.1. Схема экспериментальной установки для регистрации акустосейсмических и гидроакустических колебаний в водоемах: *1* – центр обработки и регистрации данных; *2* – стандартный сейсмический датчик; *3* – защищённый кабель питания и вывода данных; *4*, *5*, *6* – гидрофоны; *7* – буй; h_1, h_2 – глубина подвеса гидрофонов; *l* – расстояние от берега.

использовались стандартные трёхкомпонентные сейсмоприёмники СМ-3 (рис.1, поз.*2*), установленные на берегу озера. Защищённый кабель питания и вывода данных (рис.1, поз.*3*) соединял сейсмоприёмники и гидрофоны (рис.1, поз.*2, 4, 5, 6*) с системой обработки и регистрации данных, размещённой в мобильной станции (рис.1, поз.*1*).

Для подводной регистрации гидроакустических сигналов был спроектирован и изготовлен специальный гидрофон, показанный на рис.2. В ходе экспериментальных исследований было разработано и использовано несколько образцов пьезоэлектрических элементов для предложенного гидрофона на основе пьезокерамики из титаната бария в форме радиально поляризованных сфер различного диаметра с круглыми отверстиями. Такая конфигурация позволяет повысить чувствительность пьезоэлектрических элементов за счёт изменения коэффициента электромеханического преобразования. Проведённые экспериментальные

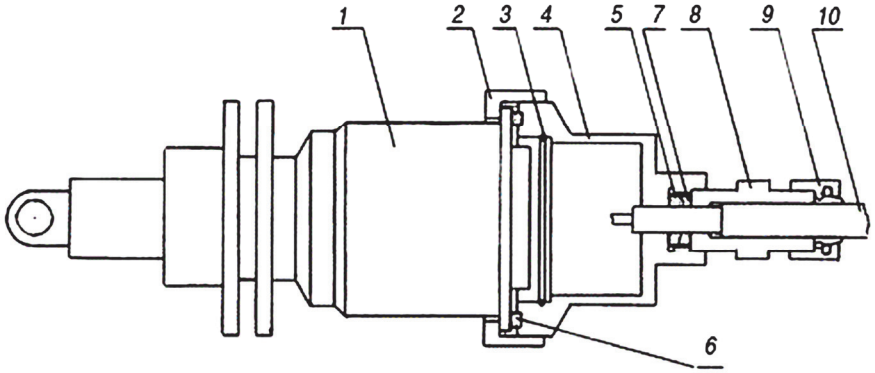


Рис.2. Схема гидрофона: *1* – пьезоэлектрический элемент; *2* – накидная гайка; *3* – стопорное кольцо; *4* – корпус; *5* и *6* – прокладки; *7* – шайба; *8* – гайка; *9* – зажимная гайка; *10* – кабель.

исследования показали, что пьезоэлектрические элементы данного типа обладают хорошей фазовой идентичностью и стабильностью в процессе их работы. Для обеспечения необходимого электрического контакта, на внутреннюю и внешнюю поверхности обожжённых пьезокерамических сфер наносилось металлическое серебряное покрытие, обеспечивавшее подключение пьезоэлектрических элементов к электрической схеме экспериментальной установки.

В рамках этих исследований был также разработан каскад предварительного усиления и передачи полезного сигнала, формируемого созданным гидрофоном. Пьезоэлектрический элемент и каскад предварительного усиления и передачи информации были размещены в герметичной конструкции гидрофона. Размещение предварительного усилителя в одной конструкции с пьезоэлектрическим датчиком обусловлено малой величиной полезного сигнала и позволяет повысить чувствительность канала регистрации исследуемых сигналов. Предварительный усилитель усиливает сигнал пьезокерамики до его прохождения по кабелю и согласует высокоомный выход пьезокерамики с низкоомным входом разработанного усилителя. Комбинация предварительного усилителя и пьезоэлектрического датчика имела равномерные амплитудно-частотные характеристики в диапазоне частот от 0.1 до 1000 Гц.

Гидрофоны устанавливались в озере в подвешенном состоянии и удерживались вертикально на разных глубинах, были полностью погружены в воду. Такой способ установки гидрофонов обеспечивал равномерный контакт с окружающей средой и уменьшал влияние помех, связанных с поверхностными волнами. Для калибровки сейсмоакустических датчиков и гидрофонов была также разработана и создана термодинамическая система возбуждения акустических колебаний с регулируемой мощностью до 100 дБ в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц.

Характеристики гидрофонов и сейсмоприёмников экспериментальной установки приведены в табл.1.

Собственные частоты пьезокерамических гидрофонов можно легко перенастраивать путём замены пьезокерамических элементов, что позволяет управлять селективностью и чувствительностью гидрофонов, настраивая их на собственную частоту исследуемых озёр, водных полостей или пещер.

Табл.1. Характеристики некоторых компонентов экспериментальной системы

Компонент	Диапазон частот, Гц	Чувствительность	Динамический диапазон, дБ	Собственные частоты, Гц
Гидрофон	$0.1–10^3$	5.7; 20; 60 Па/с	120	10; 100; 1000
Сейсмический приемник	0.5–30	1.25×10^{-10} м/с	60	100

3. Результаты и их обсуждение

Экспериментальные исследования приема и регистрации акустосейсмических и гидроакустических сигналов от искусственных источников сейсмических колебаний проводились на озере Парз Лич с использованием вышеописанной экспериментальной установки с сейсмическими датчиками, расположенными на берегу озера, и аналоговыми гидрофонами, погружёнными под воду. Гидрофоны

располагались на глубинах 1, 3 и 5 м, при глубине озера 5 м в месте их установки, и закреплялись на буе на расстоянии приблизительно 8 м от берега. Все гидрофоны регистрировали гидроакустический шум озера Парз Лич. Анализ характеристик фонового шума (рис.3), выполненный по данным гидрофонных измерений, показывает, что весь частотный диапазон зарегистрированных гидроакустических колебаний можно разделить на три области.

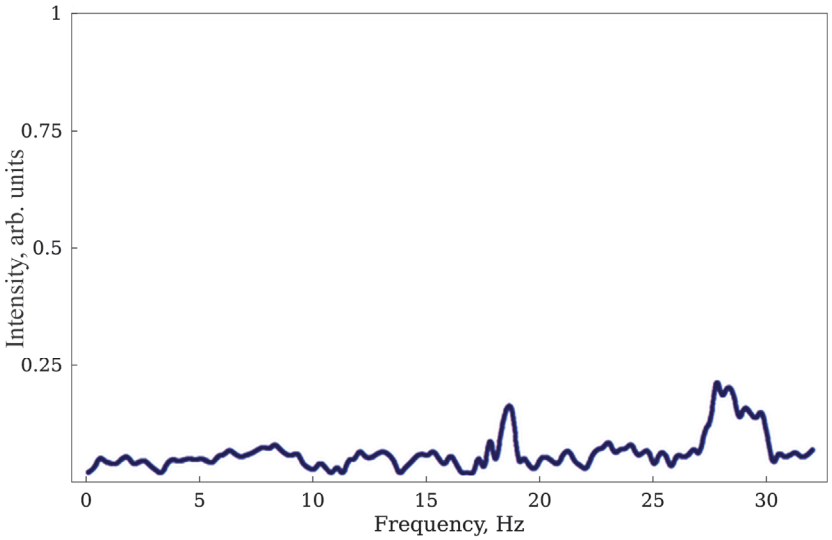


Рис.3. Характерный частотный спектр шумов озера Парз Лич, зарегистрированный гидрофоном.

В первой, низкочастотной, области 0–5 Гц вклад в шум озера, в основном, обусловлен процессами на поверхности озера. В диапазоне частот 5–20 Гц шум обусловлен, главным образом, микросейсмами, резонансными свойствами нижележащих слоёв и самого озера. В верхней области фонового шума выше частот 20 Гц, где в спектре появляются пики, шум обусловлен наличием искусственных источников акустических колебаний, например, плавающих и движущихся вблизи объектов, а также близким расположением промышленных предприятий и т. д.

В первом частотном диапазоне спектр стабилен, во втором диапазоне наблюдаются нерегулярные отдельные пики на различных частотах, соответствующих микросейсмам, а в верхнем диапазоне наблюдаются нерегулярные и регулярные изменения. В области около 18.2 Гц отмечается повышенный фоновый сигнал, соответствующий собственной частоте озера Парз Лич. Периоды регулярных сигналов составляют часы и сутки. Кроме того, установлено, что они совпадают с периодичностью движения тяжёлых транспортных средств, а частотно-амплитудные изменения спектров и длительность сигналов связаны с типом транспортных средств.

Проведённые нами исследования и анализ результатов работ других авторов показывают, что наличие акустосейсмических резонансных явлений и характерных собственных частот является общим свойством замкнутых водных бассейнов, а значения резонансных частот и структура мод в существенной степени определяются геометрией бассейна и глубиной воды [1–3, 8–10, 14–17].

Параллельно с вышеописанными гидроакустическими измерениями, аналогичные измерения нами проводились также сейсмическими датчиками, установленными вблизи берега озера на специальном постаменте. Характерный частотный спектр сигналов, полученных сейсмическими датчиками, показан на рис. 4.

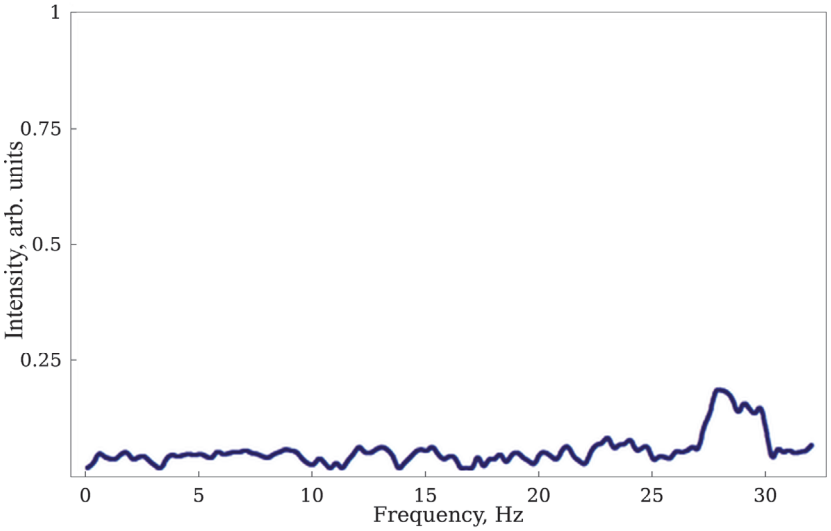


Рис.4. Характерный частотный спектр сигналов, зарегистрированных сейсмическим датчиком.

Сравнение спектра этих сигналов с аналогичными спектрами сигналов, полученными с помощью гидрофонов, показывает отсутствие повышенного фонового шума на выходах сейсмоприёмников в нижней частотной области около 8 Гц, при этом отношение сигнал/шум пика в области 10 Гц значительно ниже. Это указывает на то, что водоём в целом представляет собой антенную систему для приёма и регистрации сверхслабых акустических сигналов.

Результаты гидроакустического мониторинга, полученные другими авторами, также демонстрируют высокую чувствительность замкнутых водоёмов к слабым сейсмическим и геоакустическим сигналам, в том числе при использовании гидрофонных систем и массивов [11–13, 18, 19].

Пример непрерывной видимой регистрации исследуемых сигналов чернильным аналоговым визуальным регистратором (геликордером) со спиральной развёрткой регистрируемых сигналов, представлен на рис.5.

Для определения собственной частоты указанной антенной системы, была проведена серия измерений, в которых для калибровки сейсмоакустических датчиков были использованы созданные нами термодинамические системы возбуждения искусственных акустических колебаний. Измерения проводились в диапазоне частот от 0.1 до 1000 Гц в одинаковых условиях, при различных значениях амплитуды и частоты генерируемых возбуждений.

В частотных спектрах сигналов, зарегистрированных гидрофоном, наблюдается резкое увеличение отношения сигнал/шум в областях 10.1 и 18.2 Гц (рис.6).

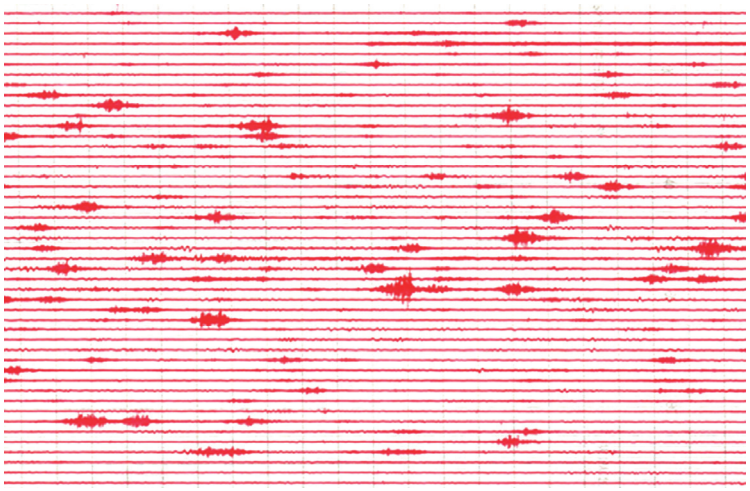


Рис.5. Пример видимой непрерывной регистрации гидроакустических сигналов с винтовой разверткой, зарегистрированных гидрофоном.

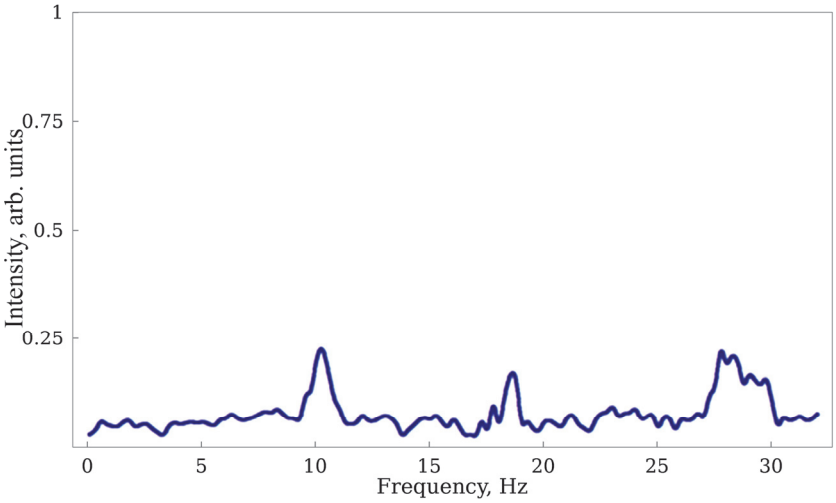


Рис.6. Характерный частотный спектр сигнала от искусственного источника, зарегистрированный в озере Парз Лич.

Эти максимумы в частотном спектре совпадают соответственно с частотой искусственных акустических колебаний, возбуждаемых на частоте 10.1 Гц, и расчётной собственной частотой озера в области измерений – 18.2 Гц.

Также была проведена серия одновременных измерений на одинаковых глубинах воды в трёх равноудалённых друг от друга точках с расстоянием 0.5 м между ними. Во всех экспериментах для полезного сигнала были получены одинаковые отношения сигнал/шум, поскольку $\lambda_{seis} \gg 0.5$ м. Поэтому фазы волны, падающей на сейсмические и гидроакустические датчики, практически одинаковы, что позволяет суммировать результаты измерений и увеличивать отношение сигнал/шум.

Предварительный сравнительный анализ полученных данных с результатами аналогичных исследований, проведённых на озере Севан [1], показал, что уровень шума озера Парз Лич в различных частотных диапазонах в 1.5–1.7 раза

ниже, чем на озере Севан. По-видимому, это обусловлено удалённостью озера Парз Лич от промышленных центров и транспортных магистралей.

Кроме того, после возбуждения искусственных колебаний на озере Севан каждые 18.5 минут наблюдались реверберационные картины, которые не возникали после прихода акустических сигналов от транспортных средств и других аналогичных источников. На озере Парз Лич явления реверберации выражены очень слабо, что обусловлено конфигурацией этого озера. Таким образом, явления реверберации могут приводить к увеличению отношения сигнал/шум при регистрации гидроакустических сигналов, повышая чувствительность канала приема и регистрации и обеспечивая возможность сохранения информации о зарегистрированном процессе.

4. Заключение

На основании проведённых исследований показано, что по сравнению с существующими системами и методами приёма и регистрации акустосейсмических и гидроакустических колебаний, водоёмы определённых размеров могут использоваться в качестве высокочувствительных резонаторов-накопителей акустических волн в диапазоне частот от 0.01 до 1000 Гц, когда фронт акустической волны значительно превышает размеры водоёма. Одновременно, предложен новый чувствительный метод приёма и регистрации гидроакустических колебаний, сочетание которого с использованием озёр и других водоёмов позволяет создавать высокочувствительные и уникальные системы регистрации слабых гидроакустических сигналов.

Общие представления о резонансных модах замкнутых водоёмов и чувствительности гидроакустического мониторинга, приведённые в разных работах [1–3, 8–13], хорошо согласуются с интерпретацией полученных результатов в рамках настоящей работы. Помимо указанных выше основных преимуществ, водоёмы ограниченных размеров, такие как озеро Севан, озеро Парз Лич и т. д., в отличие от стационарных сейсмических станций и океанических или морских станций, весьма удобны с точки зрения сочетания чувствительности, простоты, доступности и экономичности. В отличие от измерений, проводимых в океанах, такие озёра и водоёмы могут быть найдены в любом регионе.

Авторы выражают благодарность ИППФ за предоставление необходимой инфраструктуры и условий для выполнения данной работы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Работа не финансировалась из специальных источников и была выполнена за счёт бюджетного финансирования ИППФ в рамках рабочих программ Института.

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.H. Mkrtchyan, A.R. Mkrtchyan, A.S. Bagdasaryan, V.K. Saryan, A.K. Atanesyan, G.A. Harutyunyan, S.A. Mkhitaryan, Kh.V. Kotanjyan, S.A. Mirakyan, V.N. Agabekyan, V.V. Nalbandyan, H.R. Muradyan, E.A. Mkrtchyan, E.G. Baghdasaryan, V.E. Badoyan, G.G. Tokhmaxyan, S.M. Petrosyan, A.A. Papazyan, E.S. Shadyan, V.Kh. Kotanjyan**. Armenian J. Physics, **13,** 54 (2020).
2. **V.K. Sarian, A.H. Mkrtchyan, R.V. Meshcheryakov**. Armenian J. Physics **15,** 79 (2022).
3. **A.H. Mkrtchyan, A.R. Aramyan, L.Sh. Grigoryan, G.F. Khachatryan, G.A. Harutyunyan, L.E. Khachikyan, G.R. Aramyan.** J. Contemp. Phys., **57,** 238 (2022).

4. **R.M. Allen, P. Gasparini, O. Kamigaichi, M. Böse**. Seismological Research Letters, **80,** 682 (2009).
5. **R.M. Allen, D. Melgar**, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, **47,** 361 (2019).
6. **A. McGarr, R.C. Vorhis.** Seismic seiches from the March 1964 Alaska earthquake, U.S. Geological Survey Professional Paper, **544-E,** 1 (1968).
7. **G.A. Ichinose, J.G. Anderson, K. Satake, R.A. Schweickert, M.M. Lahren**. Geophysical Research Letters, **27,** 1203 (2000).
8. **A.B. Rabinovich,** Seiches and Harbor Oscillations, in: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, World Scientific, Singapore, 193 (2009).
9. **D. Avalos Cueva, C.O. Monzon, A. Filonov, I. Tereshchenko, P. Limon Covarrubias, J.R. Galaviz Gonzalez**. Scientific Reports, **9,** 11863 (2019).
10. **Z. Wynne, T. Reynolds, D. Bouffard, G. Schladow, D. Wain**. Environmental Fluid Mechanics, **19,** 1527 (2019).
11. **C.G. Fox, H. Matsumoto, T.-K.A. Lau**. J. Geophysical Research ,**106,** 4183 (2001).
12. **R.P. Dziak, D.R. Bohnenstiehl, D.K. Smith.** Oceanography, **25,** 116 (2012).
13. **R.P. Dziak, D.R. Bohnenstiehl, H. Matsumoto, C.G. Fox, D.K. Smith, M. Tolstoy, T.-K. Lau, J.H. Haxel, M.J. Fowler**. Bulletin of the Seismological Society of America, **94,** 665 (2004).
14. **N.G. Granin, N.A. Radziminovich, M. De Batist, M.M. Makarov, V.V. Chechelnitcky, V.V. Blinov, I.A. Aslamov, R.Yu. Gnatovsky, J. Poort, S.G. Psakhie**. Marine and Petroleum Geology, **89,** 604 (2018).
15. **M. Iwaki, T. Toda.** Scientific Reports, **12,** 19357 (2022).
16. **D.N. Valeeva, M.A. Nosov**. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, **61,** 260 (2025).
17. **V.I. Bukreev, I.V. Sturova, A.V. Chebotnikov**. Fluid Dynamics, **49,** 395 (2014).
18. **J. Vandemeulebrouck, J.-C. Sabroux, M. Halbwachs, Surono, N. Poussielgue, J. Grangeon, J. Tabbagh**. J. Volcanology and Geothermal Research, **97,** 443 (2000).
19. **Y. Marapulets, A. Shcherbina, A. Solodchuk, M. Mishchenko**. Sensors, **25,** 1197 (2025).

RESEARCH OF SEISMIC-ACOUSTIC PROPERTIES OF LAKE PARZ LICH, ARMENIA

T.G. DOVLATYAN, S.A. MKHITARYAN, H.R. DRMEYAN, A.L. AVAKYAN, Kh.V. KOTANJYAN, V.V. NALBANDYAN, S.V. BARSEGHYAN, Z.H. MKRTCHYAN, V.S. HARUTYUNYAN, D.E. BAGHDASARYAN, I.A. BABAYAN, A.A. PAPAZYAN, A.H. MKRTCHYAN

This work is devoted to experimental studies of the propagation of acousto-seismic and hydro-acoustic waves in multilayer media containing heterogeneities with certain resonant properties (for example, caves, natural and artificial water bodies, etc.), as well as of the phenomena that arise from the interaction of acousto-seismic and hydro-acoustic waves with such heterogeneities. In the present work, Lake Parz Lich, located in the territory of the Republic of Armenia, is considered as such a medium with heterogeneities. Within the framework of the scientific - technical studies carried out, unique equipment was designed and developed, on the basis of which an experimental setup was created for performing the required studies. The natural frequency of the lake, its acoustic properties and the possibility of using the lake as a sensitive antenna for the detection and recording of weak acousto-seismic and hydro-acoustic waves were determined experimentally.