

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ МОРСКОГО ДНА И В ТОЛЩЕ ВОДЫ

**С.С. Будрин, Г.И. Долгих, А.А. Пивоваров, А.Н. Самченко,
В.А. Чупин, А.Н. Швырев, И.О. Ярощук**

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей распространения низкочастотного гидроакустического сигнала для томографии верхнего слоя морской земной коры и структуры водной толщи. Исследования проводились в заливе Петра Великого Японского моря при распространении сигнала частотой 33 Гц по трассе «вода – верхний слой земной коры – вода» с использованием приёмной гидрофонной системы. Новизна работы состоит в том, то, что точка излучения акустического сигнала находилась в бухте Витязь, а точки приёма – в заливе Посъет, при этом сигнал проходил через мыс Шульца. Полученные результаты свидетельствуют о том, что подобные экспериментальные методы могут быть применены для изучения как масштабных гидрофизических аномалий, возникающих на трассе распространения акустического сигнала, так и для исследования геологической структуры шельфовой зоны.

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, автономная гидрофонная система, акустическая томография.

Введение

В настоящее время известно, что флуктуации параметров акустического сигнала являются индикатором всевозможных гидрофизических процессов. Источником акустических флуктуаций могут служить мелкомасштабная турбулентность и перемешивание, внутренние гравитационные волны, внутренние приливы и крупномасштабные вихри. Метод обнаружения гидрофизических процессов и аномалий по флуктуациям параметров акустического сигнала, проходящего от источника излучения до приемника (работа на просвет), называется акустической томографией. Огромным плюсом данного метода является то, что можно охватывать большие объёмы водной толщи, что имеет неоспоримое преимущество перед точечными измерениями. Идея томографии заключается в расположении требуемого количества источников и приемников звука в исследуемой акватории и затем, по вариациям времени распространения «про-

светных» акустических сигналов, восстановлении пространственно-временной структуры неоднородностей морской среды. В качестве носителя информации о среде берётся разность фаз «просветных» сигналов, так как для них существуют простые аналитические выражения, к тому же это просто реализовать технически. Все прочие характеристики звукового поля (интенсивность, модовый состав, угловой спектр и т.п.) трудноизмеримы [1].

Первые шаги в акустической томографии были сделаны Манком и Вуншем [2], которые пытались измерить параметры океанических течений. В эксперименте использовались 2 корабля, на которых были размещены приемники и передатчики акустических сигналов. Акустический сигнал в виде коротких импульсов передавался одновременно с двух кораблей, находящихся на расстоянии 25 км друг от друга. В отсутствие течения импульсы имели одинаковую форму и время распространения. При возникновении течения импульсы и время их прихода изменялись в за-

висимости от направления движения сигнала (вдоль или против течения), при этом был сделан вывод, что скорость течения пропорциональна изменению времени распространения акустического сигнала.

Из экспериментов, в которых использовался тональный сигнал низкой частоты, можно выделить эксперимент [3] по излучению сигнала 400 Гц на двух трассах, одна из которых пересекала Флоридский пролив, а другая связывала Эльютеру с Бермудскими островами, при этом источники излучения и приемники были стационарными. В результате эксперимента было выявлено, что флуктуации акустического сигнала практически совпадают с фазами приливов. При этом выяснилось, что флуктуации фазы сигнала лучше коррелировали с приливами, чем флуктуации амплитуды.

Переходя к технической реализации метода акустической томографии, можно отметить несколько подходов. В [4] представлена классическая реализация, которая состоит из 7 приёмопередающих систем, работающих на частоте 50 кГц и находящихся на глубинах до 100 м, при этом работающих автономно. Кроме приемника и передатчика на каждой станции находятся датчики давления, осуществляющие контроль глубины погружения и способные измерять параметры приливов и отливов. Для синхронизации измерений используются GPS приемники, установленные на каждой станции. Для измерения течений и параметров среды в исследуемой акватории возле каждой точки на дне установлены доплеровские измерители течений (ADCP) и CTD зонды, измеряющие соленость, температуру и давление. Передача данных на берег производится с помощью радиоканала.

Кроме активных методов акустической томографии существуют и пассивные методы. Так, в [5, 6] описан метод пассивной акустической томографии с использованием кораблей в качестве источника излучения. Данная система состоит из свободно дрейфующих радиобуев с подвесными гидрофонами, источником излучения, как уже было сказано выше, являются проходящие суда. Положение судов контролируют с помощью автоматической системы опознавания (AIS), положение буев отслеживают с помощью GPS приемников. Таким образом вычисляют времена задержки звукового сигнала, связанного с гидрофизическими процессами. В статье приведены результаты экспериментов, проведенных у побережья Нью-Лондона, Коннектикут, в Лонг-Айленд-Саунд в августе 2015 года.

К пассивным методам акустической томографии можно отнести использование океанических глайдеров [7]. На данный момент глайдеры повсеместно

используются для сбора гидрофизических параметров среды, таких как температура и соленость, что, в свою очередь, является полезным для акустической томографии. Если на глайдер поместить акустический приемник, он может стать частью томографической системы, предоставляющей дополнительные сведения о времени распространении акустических лучей. Однако существуют проблемы, связанные с использованием глайдеров в качестве акустических приемников, в частности, неопределенность в подводном положении, что может привести к неоднозначности принятых данных, но эти данные могут быть использованы как дополнительные в постобработке результатов акустической томографии.

Вышеперечисленных проблем можно избежать, используя в качестве приемника звука автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) другого типа. Так, в [8] описывается применение АНПА «MARC», который являлся носителем высокочувствительной гидроакустической приёмной системы. При прохождении аппарата по горизонтам глубин через каждый метр была построена картина пространственно-временного распределения гидроакустического поля давления на клиновидном шельфе, созданном низкочастотным гидроакустическим излучателем с центральной частотой излучения 33 Гц.

В последнее время для изучения строения верхних слоев земной коры и их характеристик применяется метод эмиссионной сейсмической томографии и микросейсмической томографии. При этом используют информацию, которую приносят к поверхности Земли слабые сейсмические сигналы. Для проведения данных видов томографий используют сигналы эндогенного происхождения. Микросейсмический мониторинг анализирует сигналы от микроземлетрясений, а эмиссионная сейсмическая томография ориентирована на анализ более тонких сейсмических проявлений. Методы эмиссионной томографии позволяют извлечь информацию о строении и состоянии среды на основе регистрации сейсмических шумов. Присутствие в среде источников сейсмического излучения или контрастных неоднородностей приводит к появлению когерентных компонент в случайном волновом поле, зарегистрированном на поверхности с помощью сейсмоприемников [9].

Также можно отметить метод акустической низкочастотной томографии с использованием приемников, построенных на лазерно-интерференционных методах. В [10] для приема гидроакустического сигнала, излученного в море, используется волоконно-оптический сейсмоприемник, построенный на основе интерферометра Маха-Цендера. В работе

представлены результаты экспериментов по приему тонального и фазоманипулированного низкочастотного сигнала. Данный метод планируют использовать как для сейсмоакустической томографии, так и для томографии в арктических районах океана, при этом сейсмоприемник устанавливается непосредственно на ледовый покров.

Существует более комплексный подход к вопросам акустической и сейсмической томографии. Так, в [11] описывается комплекс для изучения и исследования гидросферных и литосферных процессов. В его состав входят 2 лазерных деформографа, построенных по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона, низкочастотных акустических излучающих систем 22, 33 и 245 Гц и приемных систем. Также данный комплекс может быть дополнен широкополосным сейсмическим излучателем. В [12] в качестве источника был использован подобный излучатель. На шельфе возрастающей глубины (от берега до глубокого моря) в выбранных точках измерялись вариации гидросферного давления от поверхности до дна с интервалами 1 м. По полученным экспериментальным данным была построена экспериментальная пространственно-частотная модель системы «вода–дно». Таким образом, данный комплекс может применяться для исследований, касающихся различных видов томографии.

■ Описание и методика проведения эксперимента

Представленный в работе эксперимент проводился в октябре 2019 года. В качестве источника излучения использовался низкочастотный гидроакустический излучатель электродинамического типа, а в качестве «просветного» сигнала использовался тональный сигнал с частотой 33 Гц [13]. Максимальное избыточное давление, создаваемое излучателем на акустической оси на расстоянии 1 м, достигало величины 2,2 кПа. В качестве приемной системы выступал автономный погружной контейнер, оснащенный гидрофоном 8104 компании Brüel & Kjær, вынесенный наружу через герметичное соединение, и усилителем заряда NEXUS 2692 того же производителя. Гидрофон обладает чувствительностью 56 мкВ/Па и может принимать сигналы в частотном диапазоне от 0,1 Гц до 120 кГц. Усилитель заряда имеет встроенные фильтры низких и высоких частот и имеет возможность усиления от –20 до +80 дБ при емкости датчика 1 нФ. При проведении эксперимента использовался встроенный в усилитель фильтр с частотами среза 10 и 100 Гц, что позволило принимать

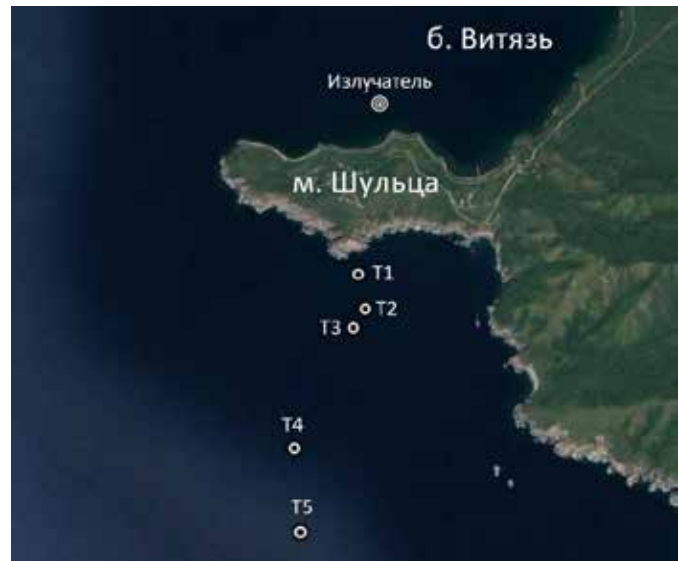


Рис. 1. Схема проведения эксперимента. Излучатель – точка излучения; T1-T5 – точки измерений

тональный сигнал частотой 33 Гц и избежать нежелательных помех в низкочастотной области. С помощью аналого-цифрового преобразователя данные с усилителя заряда записывались на портативный компьютер. В качестве источника питания в контейнере использовался аккумуляторный блок, обеспечивающий автономность всех устройств вплоть до 9 ч. На рис. 1 представлена схема проведения эксперимента.

Излучение проводилось в бух. Витязь залива Петра Великого. Прием прошедшего через мыс Шульца акустического сигнала производился в нескольких точках со стороны открытой части Японского моря. Излучатель погружался на глубину 12 м, а глубина места в точке излучения составляла 20 м. При выходе в точки измерений по согласованию производилось излучение тонального сигнала частотой 33 Гц в непрерывном режиме. В точках измерений с помощью гидрологического зонда производились замеры скорости звука по всей глубине. Затем автономным погружным контейнером, оснащенный гидрофоном, с интервалом в 2 м от поверхности до дна происходило измерение поля давления, создаваемого излучателем.

■ Обсуждение полученных результатов

В результате обработки полученных данных были построены вертикальные распределения поля давления по глубине. На рис. 2 представлены вертикальные распределения давления, построенные для точек измерений T1 и T2.

Механизм передачи акустической энергии из жидкой среды в твердую и обратно происходит сле-

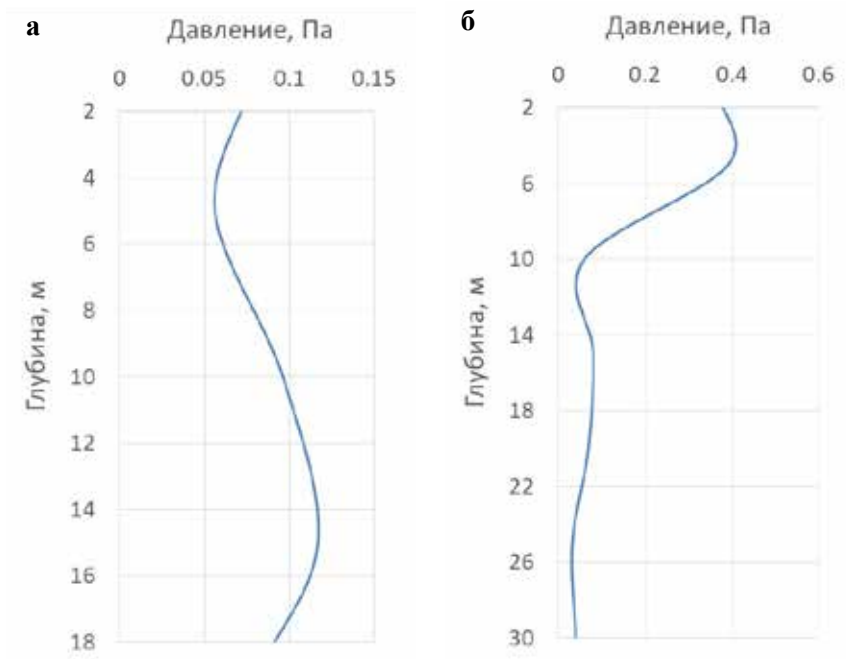


Рис. 2. Вертикальные распределения поля давления в точках измерений T1 (а) и T2 (б)

дующим образом. Акустическая энергия, излученная в жидкой среде, при определенной глубине, являющейся критической для данной частоты, переходит в энергию объемных колебаний твердой среды, в том числе энергию волн Рэлея [14]. Затем, пройдя через мыс Шульц, по слоям грунта из бух. Витязь переходит в шельфовую зону Японского моря и начинает пе-

реходить обратно из колебаний грунта в водное пространство. Таким образом, логично предположить, что при таком механизме распространения основная часть энергии будет концентрироваться у дна, что и показано на рис. 2, а, где максимальное давление достигается в нижней части жидкого полупространства. Однако в точке измерения T2 (рис. 2, б), находящейся на расстоянии от первой менее чем 200 м, наблюдается противоположная картина. Большая часть энергии находится в верхней части водного слоя толщиной 10 м. Более интересные эффекты можно обнаружить на вертикальных распределениях поля давления, построенных по данным, полученным в остальных точках измерений, приведенных на рис. 3.

На рис. 2 максимумы давления во всех трех случаях находятся на разных горизонтах, единственным общим моментом в этих случаях является то, что энергия концентрируется в слое толщиной 10 м. Можно предположить, что такие распределения могут быть связаны с гидрофизическими процессами, однако выше говорилось, что в каждой точке производилось измерение скорости звука и температуры по всей глубине (рис. 4).

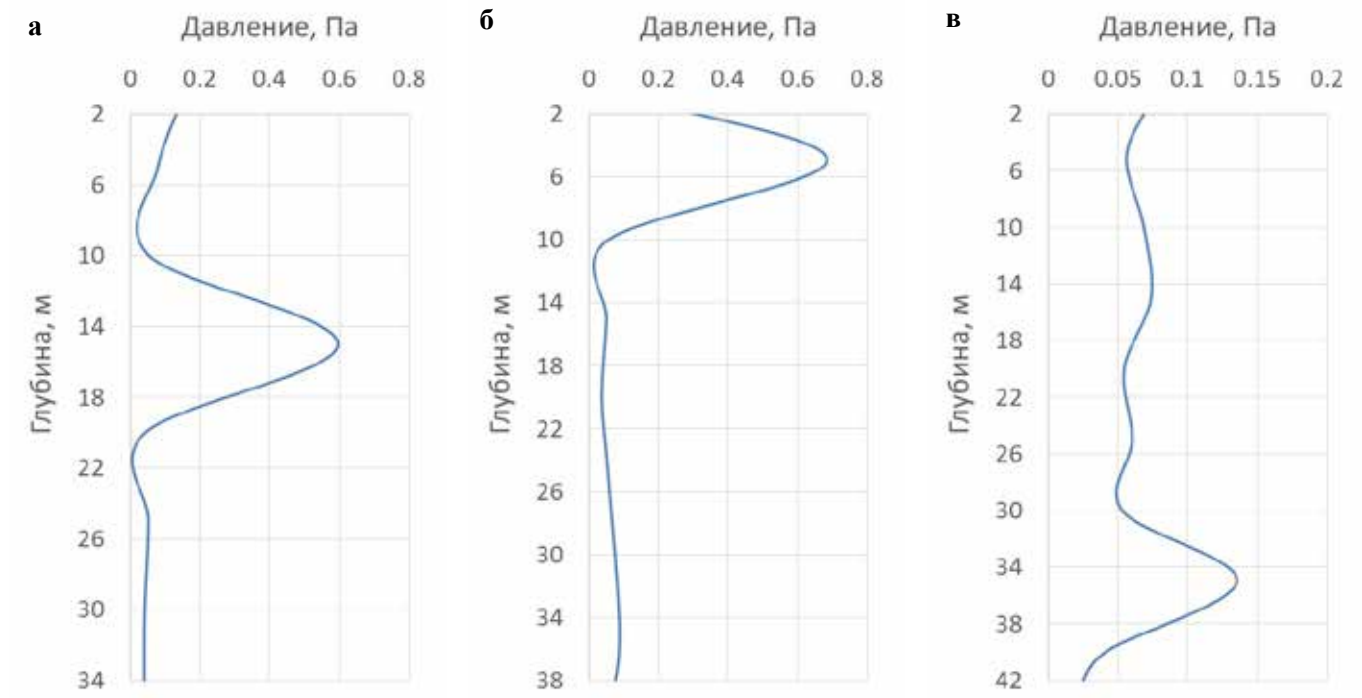


Рис. 3. Вертикальные распределения поля давления в точках измерений T3 (а), T4 (б) и T5 (в)

По распределениям на рис. 3 нет ничего необычного для данной акватории в это время года, небольшой отрицательный градиент скорости и температуры формируются в верхнем слое толщиной 18–22 м, затем идет слой скачка толщиной 10–12 м, после которого также имеется небольшой отрицательный градиент. Допустим, что в каждой точке измерений область дна можно представить как мнимый точечный излучатель, находящийся под слоем скачка, имеющий диаграмму направленности 180 градусов и направленный вверх. Исходя из этого лучи, направленные вверх, проходили бы слой скачка, и вся энергия канализировалась бы в верхнем слое. Остальные лучи остаются под слоем скачка. В результате имелось бы два максимума поля давления в поверхностном и придонном слоях (кроме точки Т1), однако формирование максимумов энергии происходит всегда только в одном из слоев, а в точке Т3 максимум вообще находится по центру поверхностного слоя. Это было бы верно с частотами излучения гораздо выше используемой в экспериментах. Длина волны для 33 Гц в воде составляет около 45 м, что соизмеримо с глубинами, на которых проводились измерения. В связи с этим более простым объяснением будет, что при выходе из твердой среды акустический сигнал будет формировать нормальные волны в волноводе, роль которого выполняет шельф клиновидной формы. При этом моды, формируемые волноводом, будут непосредственно зависеть от формы и геологической структуры самого волновода.

Для лучшего понимания описанных процессов необходимо рассчитать удельную акустическую энергию в точках измерений по формуле:



Рис. 5. Распределение удельной акустической энергии, рассчитанной по формуле (1), в зависимости от расстояния до излучателя

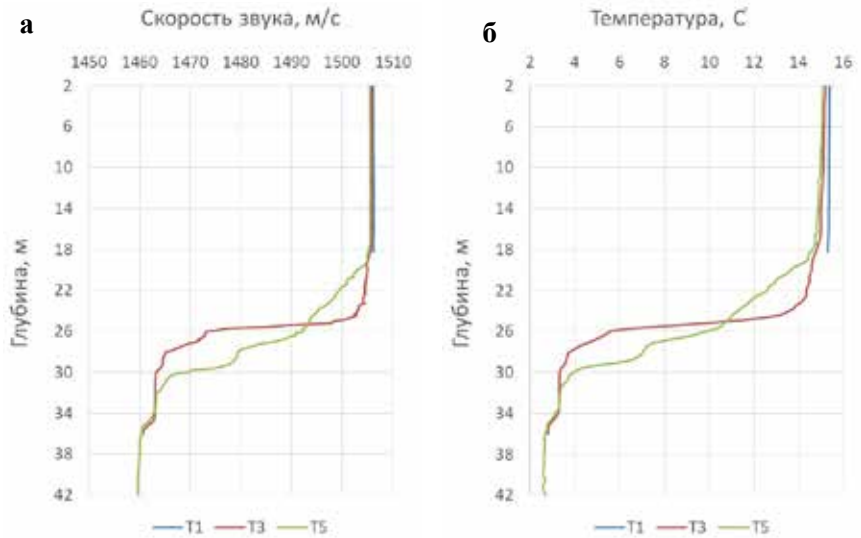


Рис. 4. Вертикальные распределения скорости звука (а) и температуры (б) в точках измерений Т1, Т3 и Т5

$$E_{yo}(h) = \frac{1}{2\rho c^2} \int_{h_2}^{h_1} P(h)^2 dh \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, c – скорость звука в воде, h_1 и h_2 – крайние глубины, на которых производились измерения, $P(h)$ – функция распределения давления по глубине.

По полученным результатам был построен график, представленный на рис. 5.

Так как точек измерений было сделано слишком мало, можно сделать промежуточный вывод о том, что распределение энергии имеет зоны максимумов и минимумов, т.е. имеет характерные зоны выхода акустической энергии, что, в свою очередь, может быть связано с формой и геологической структурой волновода.

Заключение

По результатам эксперимента можно сделать некоторые выводы. Вертикальные распределения поля давления, которое создается при прохождении акустического сигнала через твердую среду, имеет непостоянную структуру с максимумами, которые располагаются как в верхних, так и в нижних слоях водной толщи. В связи с длиной волны используемого сигнала, соизмеримой с глубинами измерений, влияние гидрологических факторов на формирование максимумов поля давления является маловероятным. Формирование данных максимумов связано с образованием нормальных волн, ха-

рактические характеристики которых зависят от формы шельфа (канала) и его геологической структуры. Несмотря на небольшое и неравномерное распределение точек, в которых производились измерения, по рассчитанному распределению энергии по трассе распространения можно судить о том, что оно является нелинейным и имеет свои максимумы и минимумы. Данный вид экспериментов может быть применен в качестве одного из акустических и сейсмоакустических методов исследования для изучения как масштабных

гидрофизических аномалий, возникающих на трассе распространения акустического сигнала, так и для исследования геологической структуры шельфовой зоны.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания (№ АААА-А20-120021990003-3) «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана».

ЛИТЕРАТУРА

1. Стародубцев П.А., Бакланов Е.Н., Халаев Н.Л., Москаленко Э.В. Кратко о томографировании процесса восстановления характеристик морской среды // Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов мирового океана: мат. V Междунар. науч.-техн. конф. Владивосток: Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, 2018. С. 303–309.
2. Munk W. H., Worcester P. F. and Wunsch C. Ocean acoustic tomography. Cambridge: New York: Cambridge University Press, 1995. ISBN 0521470951.
3. Clark J. G., Kronengold M. J. *Acoust. Soc. Am.* 1974. V. 56. P. 1071–1083.
4. Arata Kaneko, Xiao-Hua Zhu, Ju Lin, 2020. Coastal acoustic tomography. Elsevier, ISBN 9780128189429.
5. Bruce C., William A. K., William S. H., Jeff T., Jit S., Christopher M. V. and Karim G. S. Passive travel time tomography using ships as acoustic sources of opportunity // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140. P. 3074.
6. Jacquelyn S. K., Christopher M. V., Brendan V. N. and Karim G. S. Passive ocean acoustic tomography using ships as sources of opportunity recorded on an irregularly spaced free-floating array: A feasibility study // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 139. P. 2026.
7. Lora J. Van Uffelen, Sarah E. W., Craig M. L., Jason I. G., Peter F. W. and Matthew A. D. Ocean gliders as tools for acoustic tomography // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140. P. 3075.
8. Чупин В.А., Долгих Г.И., Щербатюк А.Ф. Исследование пространственно-временного распределения акустического поля в прибрежной области моря // *Подводные исследования и робототехника.* 2018. Т. 26, № 2. С. 44–48.
9. Чеботарева И.Я. Многообразие типов эндогенных сейсмических источников в эмиссионной томографии // *Актуальные проблемы нефти и газа.* 2019. Т. 25, № 2. С. 1–16.
10. Кульчин Ю.Н., Каменев О.Т., Петров Ю.С., Ромашко Р.В., Колчинский В.А. Разработка физических основ низкочастотной акустической томографии на арктическом шельфе волоконно-оптическими сейсмоприемниками // *Изв. РАН. Серия физическая.* 2018. Т. 82, № 5. С. 556–559.
11. Долгих Г.И., Чупин В.А., Щербатюк А.Ф. Аппаратно-программный комплекс для исследования динамики гидросферно-литосферных процессов // *Приборы и техника эксперимента.* 2017. № 1. С. 156–157.
12. Долгих Г. И., Дзюба В. П., Чупин В. А. Особенности распространения на клиновидном шельфе возрастающей глубины сигналов, генерируемых береговым низкочастотным сейсмоакустическим излучателем // Доклады XVI школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских, совмещ. с XXXI сессией Российского Акустического Общества. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2018. С. 53–56.
13. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Чупин В.А., Яковенко С.В., Ярошук И.О. Излучающая гидроакустическая система на частотах 19–26 Гц // *ПТЭ.* 2017. № 4. С. 137–141.
14. Grigoriy I. Dolgikh, Sergey S. Budrin, Stanislav G. Dolgikh, Vladimir V. Ovcharenko, Vladimir A. Chupin, and Sergey V. Yakoveko. Particulars of a transmitted acoustic signal at the shelf of decreasing depth // *J. Acoust. Soc. Am.* 2017. V. 142, No. 4. P. 1990–1996.



Об авторах

БУДРИН Сергей Сергеевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика, океанология, физика атмосферы и океана, геофизика, сейсмоакустика
Тел.: +7 (423) 231-25-98
E-mail: ss_budrin@mail.ru, budrin.ss@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-7462-9459

ДОЛГИХ Григорий Иванович, д.ф.-м.н., профессор, академик РАН, директор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: физика геосфер, изучение физики возникновения, развития и трансформации геосферных процессов инфразвукового и звукового диапазонов, разработка и создание аппаратно-программных лазерно-интерференционных систем
Тел.: +7 (423)-231-14 00, **факс:** +7 (423) 231-25-73
E-mail: dolgikh@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-2806-3834

ЧУПИН Владимир Александрович, к.ф.-м.н., в.н.с.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: сейсмоакустика, волновые процессы в океане, взаимодействие атмосферы и океана, крупномасштабные и синоптические процессы в океане
Тел.: +7 (423) 231-25-98
E-mail: chupin@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0001-5103-8138

ПИВОВАРОВ Александр Анатольевич, научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана, низкочастотная гидроакустика, сейсмоакустика, геоморфология шельфа и прибрежной зоны
Тел.: +7 (423) 231-26-17
E-mail: pivovarov@poi.dvo.ru

САМЧЕНКО Александр Николаевич, к.г.н., с.н.с.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: геоакустическое моделирование, низкочастотная гидроакустика, сейсмоакустика, геоморфология шельфа и прибрежной зоны
Тел.: +7 (423) 231-26-17
E-mail: samchenko.an@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-5184-0718

ШВЫРЕВ Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., с.н.с.
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: экспериментальные исследования звуковых полей и динамики вод в шельфовых зонах, математическое моделирование звуковых полей и гидрофизических процессов в прибрежных районах океана, низкочастотная гидроакустика, сейсмоакустика.
Тел.: +7 (423) 231-26-17
E-mail: shvyrev@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0003-1184-8683

ЯРОЩУК Игорь Олегович, д.ф.-м.н., доцент, заведующий лабораторией
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Тихокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук
Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43
Область научных интересов: акустика океана, статистическая радиофизика, теория и математическое моделирование низкочастотных волновых процессов в слоистых, нерегулярных, случайных средах, метод поперечных сечений
Тел.: +7 (423) 231-26-17
E-mail: yaroshchuk@poi.dvo.ru
ORCID: 0000-0002-3212-9752

Для цитирования:

Будрин С.С., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырев А.Н., Ярощук И.О. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ВЕРХНЕМ СЛОЕ МОРСКОГО ДНА И В ТОЛЩЕ ВОДЫ // Подводные исследования и робототехника. 2022. № 3 (41). С. 45–53. DOI: 10.37102/1992-4429_2022_41_03_04. EDN: QUANEU.

