

УДК 550.834

ТОМОГРАФИЯ МОРСКОЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕРЕГОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДЕФОРМОГРАФОВ И ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

© 2020 г. Г. И. Долгих¹, С. С. Будрин¹, С. Г. Долгих¹, В. В. Овчаренко¹,
А. А. Пивоваров¹, А. А. Плотников¹, А. Н. Самченко¹, В. А. Чупин¹*,
В. А. Швец¹, А. Н. Швырёв¹, С. В. Яковенко¹, И. О. Ярошук¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук”, Владивосток, Россия

*E-mail: chupin@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 16.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 26.02.2020 г.

Описаны особенности томографии морской земной коры на основе применения береговых лазерных деформографов и широкополосных низкочастотных гидроакустических излучателей. Такой подход полезен при изучении структуры и состава морской земной коры шельфовых областей, в том числе покрытых льдом без его разрушения. В ходе многочисленных экспериментальных исследований установлено, что при глубинах моря, равных или меньше половине длины гидроакустической волны, генерируемой низкочастотными гидроакустическими излучателями, гидроакустическая энергия в основном трансформируется в поверхностные волны рэлеевского типа, которые “просвечивают” дно на трассе “гидроакустический источник—берег”.

DOI: 10.31857/S0367676520060083

ВВЕДЕНИЕ

При анализе современного состояния исследований по томографии морской земной коры рассмотрим следующие направления: 1) разработка низкочастотных гидроакустических излучателей, ориентированных на выполнение томографических задач, связанных с изучением структуры и состава верхнего слоя морской земной коры; 2) выполнение комплексных экспериментов по томографии морского дна на основе использования низкочастотных гидроакустических излучателей и береговых сейсмоакустических приёмных систем; 3) выполнение комплексных экспериментов по томографии морского дна на основе использования низкочастотных гидроакустических излучателей и донных сейсмоакустических приёмных систем; 4) другие дистанционные методы исследования структуры и состава морской земной коры для акваторий, покрытых льдом; 5) другие дистанционные методы исследования структуры и состава морской земной коры для любых акваторий; 6) исследование закономерностей распространения гидроакустических сигналов различных частот в шельфовых областях морей различных конфигураций; 7) решение модельно-теоретических

задач, связанных с изучением структуры и состава морской земной коры.

В первом направлении исследований значительных успехов достигли авторы работ [1, 2]. Во втором направлении в последние три года исследований выполнялись работы только нашим коллективом. В третьем направлении работы ведутся многими коллективами, среди которых можно выделить следующие. В статье [3] представлены экспериментальные результаты сейсмоакустического профилирования с использованием широкополосных сигналов в Каспийском море в интервале глубин до дна ~1000 м. В экспериментах использовались синхронизованные последовательности зондирующих импульсов с линейной частотной модуляцией с девиацией частоты 50–100 Гц, возбуждаемые буксируемым гидроакустическим излучателем оригинальной конструкции (излучаемая мощность до 300 Вт, полный частотный диапазон излучения 100–1000 Гц). Прием сигналов осуществлялся стандартной буксируемой цифровой сейсмокозой. По тематике четвертого направления в работе [4] изучены закономерности распространения волнового возмущения в неоднородной среде, включающей слоистую Землю, жидкий волновод и покрывающий слой льда. На ос-

нове анализа взаимно-корреляционной функции сигналов, принятых в двух разнесенных в пространстве точках, оценены скорости различных мод. В работе [5] представлены результаты анализа модовой структуры естественного шумового поля, наведенного в системе “литосфера–гидросфера–ледовый покров”. Показано, что мониторинг сейсмоакустического шумового фона в условиях мелкого моря при наличии ледового покрова позволяет исследовать параметры геофизической среды томографическими методами. По пятому направлению можно выделить работу [6], в которой описан высокоразрешающий сейсмоакустический комплекс для исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна. В работе [7] использованы экспериментальные данные, полученные на вертикальной гидрофонной решетке во время эксперимента с взрывными источниками звука, и показаны масштабы акустического проникновения в осадочные породы. Среди существующих методов глубинного сейсмического зондирования в последние годы активно развивается метод пассивной поверхностно-волновой томографии [8], использующей естественный микросейсмический шум в качестве источника информации о среде. По шестому направлению в работе [9] исследованы дисперсионные зависимости акустических волн, распространяющихся в условиях, близких к условиям мелкого моря, покрытого льдом. По тематике седьмого направления в статье [10] рассматривается возможность применения методов модовой томографии для восстановления характеристик дна мелкого моря на примере совместной реконструкции рельефа дна и скорости звука в дне.

В нашем методе приемная система не стоит на дне, как во всех ранее применяемых методах, а расположена на берегу. Если методика работы при расположении приемных датчиков на морском дне в виде кос основана на обработке отраженных сигналов, то методика работы при расположении одного приемника на берегу основана на обработке прошедших по различным путям сигналов. Решение обратной задачи позволяет определить пути распространения сигналов в земной коре, скорости различных волн в слоях и на их границах, а по полученным расчетным данным определить упругие характеристики сред их распространения. Полученные результаты позволили сформировать оптимистические надежды на удачное применение данных методов для решения задач по изучению структуры и состава морской земной коры вплоть до границы Мохоровича и построения реальной модели земной коры исследуемых регионов. В основной части работы остановимся кратко на описании аппаратной части, а также на обработке и анализе полученных данных при буксировке гидроакустического излучателя по выбранной трассе.

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ

Первый эксперимент по томографическим исследованиям морской земной коры и построения ее модели [11] был выполнен на основе применения низкочастотного гидроакустического излучателя, подробно описанного в [12], который предназначен для генерации сигналов различной сложности в частотном диапазоне 30–40 Гц при глубинах погружения от 2 до 25 м. Эффективное звуковое давление, которое создает излучатель в рабочем диапазоне частот, может достигать величины 3700 Па (191 дБ/мкПа).

Низкочастотный гидроакустический излучатель, описанный в [13], предназначен для генерации гармонических и фазоманипулированных гидроакустических сигналов в диапазоне 19–26 Гц. Амплитуда объемных колебаний излучателя достигает величины 0.0123 м^3 . На частоте 20 Гц в безграничном водном пространстве это соответствует излучаемой акустической мощности 1000 Вт.

В ходе выполнения работ была проведена модернизация низкочастотного гидроакустического излучателя на 30–40 Гц с целью его использования в буксируемом варианте. Для этого был разработан и установлен на несущий каркас излучателя балансный блок, обеспечивающий устойчивое положение по горизонтали излучателя при скорости буксировки до 3 узлов.

БЕРЕГОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ СИСТЕМЫ

В качестве приемных систем использовались береговые лазерные деформографы стационарного и мобильного типов. Основным стационарным лазерным деформографом являлся 52.5-метровый лазерный деформограф, входящий в состав двухкоординатного лазерного деформографа [14], который состоит из двух лазерных деформографов неравноплечего типа: 52.5-метрового лазерного деформографа “север–юг” и 17.5-метрового лазерного деформографа “запад–восток”. Лазерный деформограф “север–юг”, рабочее плечо которого ориентировано относительно линии “север–юг” под углом 18° (198°), созданный на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона и частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера, находится на глубине 3–5 м под землей. В 70 м от данной установки на глубине 3–4 м под землей смонтирован лазерный деформограф “запад–восток”, рабочее плечо которого ориентировано относительно линии “север–юг” под углом 110° (290°). Угол между рабочими осями лазерных деформографов составляет 92° . Чувствительность лазерного деформографа с длиной рабочего плеча 52.5 м равна $0.01 \text{ нм}/52.5 \text{ м} = 1.9 \cdot 10^{-13}$, а лазерного деформографа с длиной рабочего плеча 17.5 м – $5.7 \cdot 10^{-13}$.

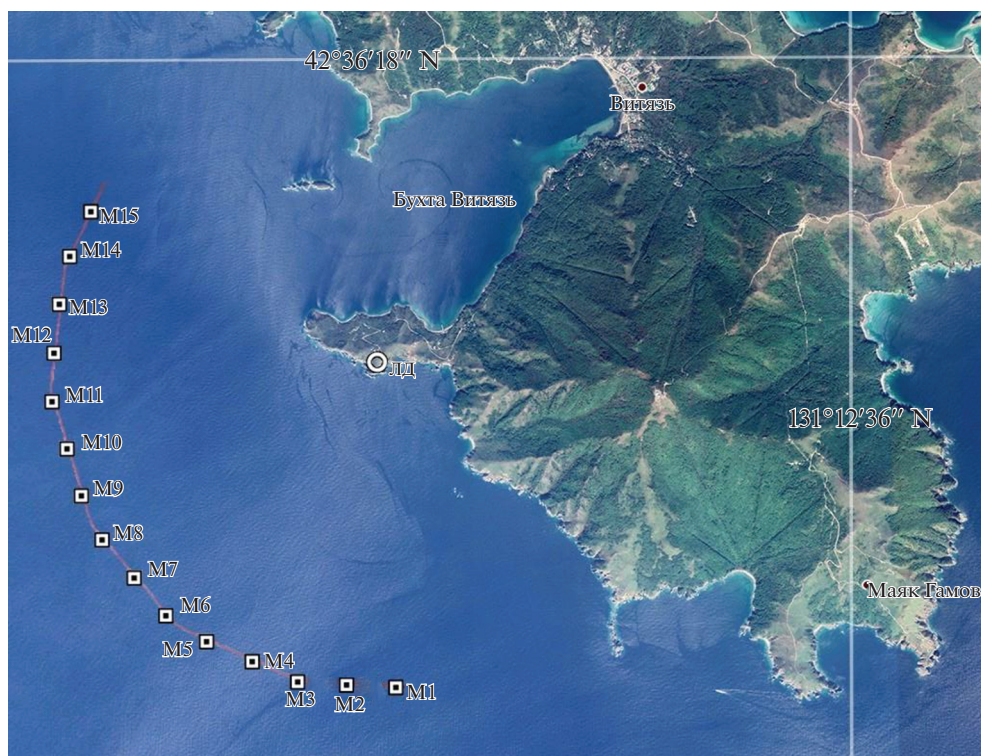


Рис. 1. Точки излучения. ЛД – лазерные деформографы.

Оптическая часть мобильного лазерного деформографа [15] разработана на основе неравноплечего интерферометра Майкельсона и похожа на соответствующий узел деформографов, созданных ранее. В качестве источника света используется частотно-стабилизированный лазер производства MellesGriot, долговременная стабильность которого составляет 10^{-9} – 10^{-10} . Задачей данного прибора является регистрация вариаций микродеформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 (условно) до 1000 Гц с точностью 0.3 нм в практически неограниченном динамическом диапазоне. Мобильный лазерный деформограф использовался зимой (февраль 2017 г., 2018 г.) и располагался на берегу Амурского залива.

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ БУКСИРОВКЕ ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Обычная схема эксперимента построена так: в выбранных точках намеченной трассы проводится излучение фазоманипулированных сигналов, которые принимаются береговыми лазерными деформографами. При обработке производится свертка полученных записей лазерных деформографов с записями контрольного гидрофона или с компьютерным математическим сигналом. По результатам свертки определяется ко-

личество и времена приходов сигналов. Решая обратную задачу по временам прихода и расстоянию от одной точки излучения к другой строится модель морской земной коры на трассе “излучение–прием”. Учитывая, что, как правило, точек излучения немного, при обработке мы получаем приблизительный, усредненный результат на трассе “излучение–прием”, по которому сложно построить реальную модель земной коры. Для построения реальной модели земной коры необходима не одна точка излучения, а значительно больше. Понятно, что при получении комплекса набора данных исследуемой шельфовой области моря при решении обратной инверсионной задачи можно получить модель земной коры, идеально совпадающей с реальной моделью земной коры. Одна из технологий проведения подобных экспериментов связана с применением буксируемых низкочастотных гидроакустических излучателей, непрерывно излучающих фазоманипулированные сигналы с временной привязкой. Пробные эксперименты такой направленности были выполнены на шельфе Японского моря. Буксировка осуществлялась в бухте Витязь Японского моря и вне ее. Наибольшее количество точек излучения получено при проведении эксперимента вне бухты Витязь. На рис. 1 приведены точки, где находился излучатель в момент буксировки, с которых полученные данные свертывались с исходными данными. Прием осуществлялся двумя лазерными деформографами:

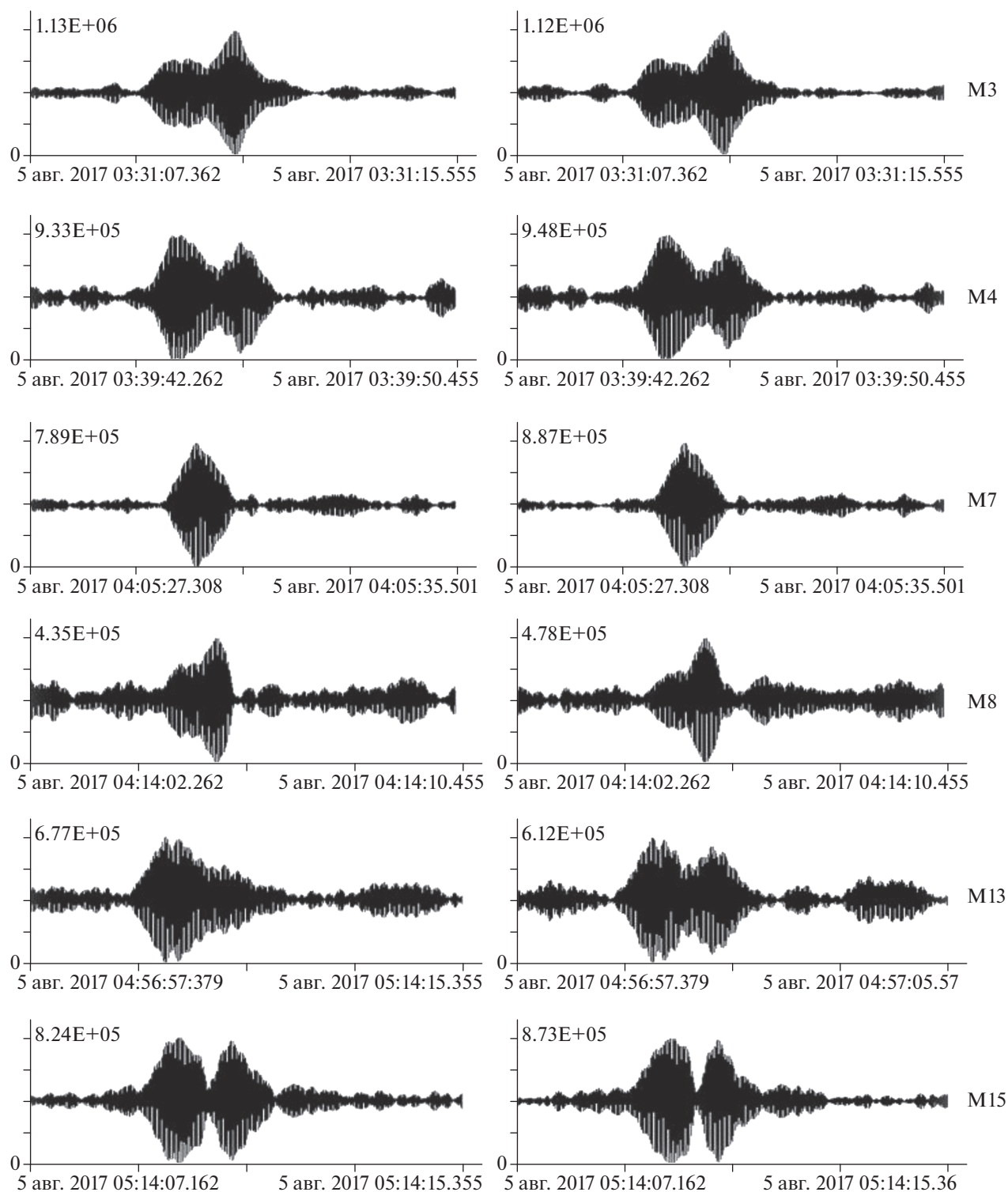


Рис. 2. Свертки сигналов, принятых лазерными деформографами “север–юг” (левый столбик) и “запад–восток” (правый столбик) с сигналами контрольного гидрофона на станциях излучения M3, M4, M7, M8, M13, M15.

“север–юг” и “запад–восток”. На рис. 2 приведены результаты свертки сигналов, полученных этими деформографами, с сигналом, записанным контрольным гидрофоном в разных точках излучения (взяты выборочно).

При анализе полученных результатов сделаны следующие выводы. Свертки данных лазерного деформографа “север–юг” с данными контрольного гидрофона идентичны сверткам данных лазерного деформографа “запад–восток” с данны-

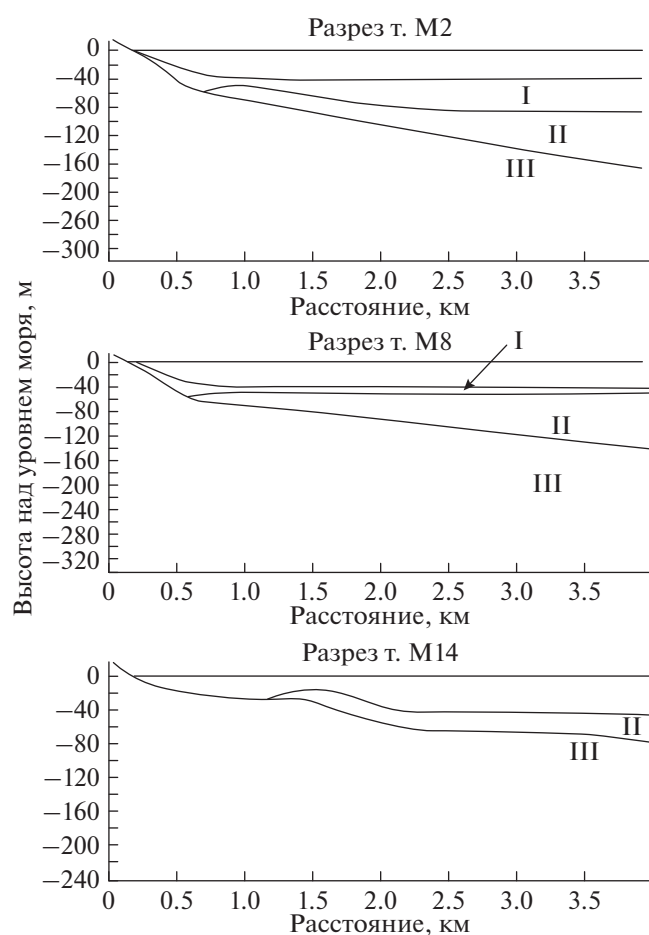


Рис. 3. Модели верхнего слоя морской земной коры.

ми контрольного гидрофона, что говорит только о том, что все получилось идеально. Некоторое расхождение в амплитудах связано с очень малыми искажениями фаз принятых сигналов. По полученным экспериментальным данным можно построить модель верхнего слоя морской земной коры при каждом проходе сигнала, а затем построить пространственную модель земной коры. На рис. 3 представлены модели земной коры, полученные при обработке результатов свертки. В результате выявлен следующий состав дна: I – осадочный слой позднеплейстоцено-голоценового периода (скорость распространения продольных волн составляет $1740 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), II – осадочный слой нижне-го-среднего плейстоцена (скорость распространения продольных волн составляет $1880 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$), III – гранитоиды позднепермского периода (скорость распространения волн Лява составляет $3790 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$). При входе в залив Посьет в 3 км от оси лазерного деформографа “север–юг” в точке излучения гранитный слой находится на глубине 80 м, и над ним 40 м слой осадков. В точке, находящейся под углом 45° к измерительным осям деформографа, на удалении 3 км гранитный слой залегает на глу-

бине 120 м, осадочный слой II имеет толщину около 60 м и на нем залегает тонкий слой осадочных пород I. Внутри залива глубина залегания гранитоидов составляет 160 м и граница между осадочными слоями на глубине 80 м.

При рассмотрении результатов всех свертки, от точки М1 до точки М15, можно выделить следующее: в различных свертках было зарегистрировано от одного прихода до одиннадцати приходов (рис. 2), т.е. обнаруживается тонкая структура морской земной коры области акватории между излучателем и приемником. Один приход указывает на то, что от точки излучения до точки приема не выделено ни одного слоя, а выделенный сигнал отразился от гранитного фундамента. Одиннадцать приходов можно объяснить тем, что между точками излучения и приема выделено около девяти слоев морской земной коры. Дальнейшие расчеты позволят создать модель морской земной коры исследуемого района.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные и созданные излучающие и береговые приемные системы позволили создать технологию изучения структуры и состава морской земной коры шельфовых областей Мирового океана для глубин, равных или меньше половины длины волны, создаваемой в воде применяемыми низкочастотными гидроакустическими излучателями. Проведенные экспериментальные исследования с применением буксируемого низкочастотного гидроакустического излучателя и береговых лазерных деформографов показали большие перспективы применения данной технологии при изучении тонкой структуры морской земной коры исследуемых регионов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-02023_офи-м) и за счет средств государственного бюджета по государственному заданию (№ АААА-А20-120021990003-3).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авербах В.С., Артельный В.В., Боголюбов Б.Н. и др. // *Фундаментальные исследования океанов и морей*. М.: Наука. 2006. Т. 2. С. 491.
2. Авербах В.С., Боголюбов Б.Н., Заславский Ю.М. и др. // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 1. С. 5.
3. Лазарев В.А., Малеханов А.И., Мерклин Л.Р. и др. // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 6. С. 843; Lazarev V.A., Malekhanov A.I., Romanova V.I. // *Oceanology*. 2013. V. 53. № 6. P. 755.
4. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Шуруп А.С. и др. // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 1. С. 76; Presnov D.A., Zhostkov R.A., Shurup A.S. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2017. V. 81. № 1. P. 68.

5. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С. // ДАН. 2018. Т. 479. № 1. С. 80; *Sobisevich A.L., Presnov D.A., Sobisevich L.E., Shurup A.S.* // Doklady Earth Sci. 2018. V. 479. № 1. P. 355.
6. Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В. и др. // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 412; *Dmitrevskiy N.N., Ananyev R.A., Libina N.V. et al.* // Oceanology. 2013. V. 53. № 3. P. 368.
7. Potty G.R., Miller J.H., Lynch J.F. et al. // J. Acoust. Soc. Am. 2000 V. 108. № 3. P. 973.
8. Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. // Тр. VI Междунар. научно-практ. конф. “Морские исследования и образование (MARESEDU-2017)” (Владивосток, 2017). С. 544.
9. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А. и др. // Акуст. журн. 2014. Т. 60. № 4. С. 426; *Presnov D.A., Zhostkov R.A., Shurup A.S. et al.* // Acoust. Phys. 2014. V. 60. № 4. P. 455.
10. Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С. и др. // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 583; *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S. et al.* // Acoust. Phys. 2015. V. 61. № 5. P. 534.
11. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. // ДАН. 2013. Т. 452. № 3. С. 321; *Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A. et al.* // Doklady Earth Sci. 2013. V. 452. № 1. P. 971.
12. Долгих Г.И., Яроцук И.О., Пивоваров А.А. и др. // ПТЭ. 2007. № 5. С. 163.
13. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А. и др. // ПТЭ. 2017. № 4. С. 137; *Dolgikh G.I., Dolgikh S.G., Pivovarov A.A. et al.* // Instrum. Exper. Techn. 2017. V. 60. № 4. P. 596.
14. Долгих Г.И., Ковалев С.Н., Корень И.А. и др. // Физ. Земли. 1998. № 11. С. 76.
15. Долгих С.Г., Долгих Г.И., Чупин В.А. и др. // Фотоника. 2016. № 6(60). С. 82.