

ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 534.143,550.34.01

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ ВОДОЕМА
ПРИ НАЛИЧИИ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

© 2019 г. Д. А. Преснов^{a, *}, А. Л. Собисевич^a, П. Д. Груздев^b, В. И. Игнатъев^c,
А. И. Коньков^d, А. Ю. Мореев^b, А. В. Тарасов^{c, d}, А. А. Шувалов^{c, d}, А. С. Шуруп^{a, e}

^aИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Б. Грузинская 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^bАО “Концерн “МПО-Гидроприбор”, Б. Сампсониевский пр. 24, Санкт-Петербург, 194044 Россия

^cООО “ГЕОДЕВАЙС”, ул. Гаванская 41, пом. 89, Санкт-Петербург, 199406 Россия

^dСанкт-Петербургский государственный университет, физический факультет

Университетская набережная 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^eМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы, ГСП-1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: presnov@physics.msu.ru

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 06.05.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

В работе представлены результаты натурных испытаний в ледовых условиях Ладожского озера морских сейсморазведочных излучателей и площадной измерительной сейсмоакустической системы на основе автономных буев вмораживаемого типа. Демонстрируется возможность выделения в принимаемом сигнале отдельных мод, распространяющихся в системе “ледовый покров–водный слой–слой осадков–упругое полупространство”. Предложена итерационная томографическая схема, позволяющая восстанавливать сильноконтрастные скоростные аномалии в рассматриваемой слоистой среде. Приводятся результаты томографической оценки характеристик дна, водного слоя и ледового слоя в активном режиме.

Ключевые слова: сейсмоакустическая томография, электроискровой излучатель, слоистая среда, нормальные волны, совместная оценка акустических характеристик льда, воды и дна

DOI: 10.1134/S0320791919050186

ВВЕДЕНИЕ

Начиная со второй половины двадцатого столетия роль прикладных задач по изучению геологического строения и океанологической обстановки арктического шельфа неуклонно растет. Основной спецификой шельфа в Арктике является присутствие сплошного ледового покрова, который ограничивает применение надводных судов для выполнения исследований различного типа. Естественным решением указанной проблемы может быть использование ледового покрова для расположения научного оборудования. Перспективным способом изучения физических характеристик среды является томографический метод с расстановкой приемников на границе или по площади заданного региона, который успешно разрабатывается сегодня как для изучения неоднородностей океана [1], так и геологических структур твердой Земли [2]. Преимуществом данного подхода является возможность дистанцион-

ного изучения даже тех областей среды, где отсутствует возможность размещения оборудования для проведения контактных измерений. Задачей настоящего исследования является апробация в натуральных условиях развиваемого метода сейсмоакустической томографии [3] с учетом особенностей приема и излучения сигнала, обусловленных наличием ледового покрова.

Необходимо отметить, что в условиях, когда ледовый покров отсутствует, уже достигнуты значительные успехи в экспериментальном выделении гидроакустических мод различных номеров, восстановлении течений и определении параметров поверхностных слоев морского дна [4–7]. При этом по причине значительной временной нестабильности океана, как правило, используются сложные типы сигналов и дорогостоящие источники. Теоретические предпосылки обработки гидроакустических сигналов в арктическом волноводе изложены в работе [8] и списке источников указанной статьи. Одни из первых экспе-

риментальных попыток измерения времен пробега различных мод в ледовых условиях выполнялись в работе [9] с использованием стандартного сейсмического и гидроакустического оборудования. В настоящей работе проверка возможностей активной сейсмоакустической томографии выполнялась на основе разработанных в Институте физики Земли РАН специализированных автономных гео-гидроакустических буев [10] и импульсных сейсморазведочных излучателей.

Ранее было показано [11], что полное волновое поле в среде, содержащей ледовый покров, водный слой и упругое полупространство, включает несколько модовых составляющих, которые дают основной вклад в низкочастотной области – изгибно-гравитационная волна ледового покрова, донная поверхностная волна рэлеевского типа и гидроакустические модовые сигналы. Важно, что эти волны отличаются друг от друга как по частоте, так и по скорости распространения [11], т.е. могут быть разделены при частотно-временном анализе сейсмоакустического поля, зарегистрированного в достаточно широкой полосе частот с помощью разнесенных в пространстве сейсмоакустических приемников. Численное исследование влияния вариаций различных параметров модели на возмущения времен распространения модовых сигналов продемонстрировало [11] возможность отдельного томографического восстановления характеристик рассматриваемой среды при отдельном рассмотрении изгибной волны ледового покрова (зависит от параметров льда), гидроакустических мод (позволяют оценить характеристики водного слоя), а также фундаментальной моды поверхностной волны рэлеевского типа (несет информацию о свойствах упругого полупространства). Также ранее была экспериментально продемонстрирована [3, 9, 16] возможность оценки времен распространения отмеченных выше модовых сигналов при использовании только сейсмических приемников, расположенных на поверхности льда. Это существенно упрощает проведение натурного эксперимента, так как не требуется расположения сейсмоакустических приемников ни на дне, ни в водной толще. Полученные ранее теоретические результаты [11], а также первые данные натурных измерений [3, 9, 16] позволяют перейти к более детальному рассмотрению задачи о совместном томографическом восстановлении физических свойств ледового покрова, донных осадков и водного слоя на основе экспериментального приема различных мод, несущих информацию о среде распространения в рамках модели “ледовый покров–водный слой–слой осадков–упругое полупространство”.

Для решения задач настоящей работы в начале апреля 2018 г. была проведена экспедиция на Ладожском испытательном гидроакустическом полигоне Карельского Филиала АО “Концерн

“Океанприбор”. Полигон расположен в северо-западной части Ладожского озера в заливе Найсмери и представляет собой вытянутый на несколько километров фьорд, шириной порядка 350 м. Глубина в самой глубокой части залива 20 м и достаточно резко уменьшается к берегу (рис. 1), который представляет собой скальный массив. Удаленность полигона от промышленных объектов и судоходных линий гарантирует малые акустические помехи на уровне естественных шумов. В то же время полигон обладает подходящей для исследований различного плана береговой инфраструктурой.

В апреле 2018 г. погода на полигоне была достаточно благоприятной, температура в дневные часы держалась в районе 0°C, ночью достигала –6°C, на открытых местах дул тихий северо-восточный ветер. Ледовый покров был покрыт тонким (порядка 2–5 см) слоем снега, толщина льда составляла в разных местах от 20 до 35 см. Измерительные пункты организовывались на поверхности ледового покрова в вершинах правильного пятиугольника, а излучатель располагался вблизи берега. Весеннее время не всегда является удачным для ледовых экспедиций по причине многократного перехода окружающей температуры через 0°C, что приводит к образованию в ледовой толще водяных слоев, мешающих точному вмораживанию приборов.

АППАРАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

В настоящее время при изучении строения верхней части донных осадков (до 100 м) для решения инженерных задач на акваториях применяются различные источники, к основным из которых относятся гидролокаторы, небольшого объема пневмопушки и электроискровые излучатели [12]. Все большую популярность получают именно искровые источники или спаркеры, которые обладают рядом конкурентных преимуществ, к которым относятся: возможность быстрого изменения формы, интенсивности и спектрального состава импульса; отсутствие пульсаций парогазовой области; возможность создания заданной диаграммы направленности путем группирования источников.

В настоящей работе использовался одиночный электроискровой источник, предназначенный для возбуждения высокочастотного акустического импульса при выполнении скважинных сейсморазведочных работ высокого разрешения. Принцип действия спаркера (рис. 2а справа сверху) основан на создании электрического пробоя между группами электродов, при котором возникает искровой разряд. Основным техническим элементом системы электроискрового источника является накопитель энергии, полностью определяющий все акустические параметры возбуждаемого сигнала. Нами использовался спаркер и накопи-

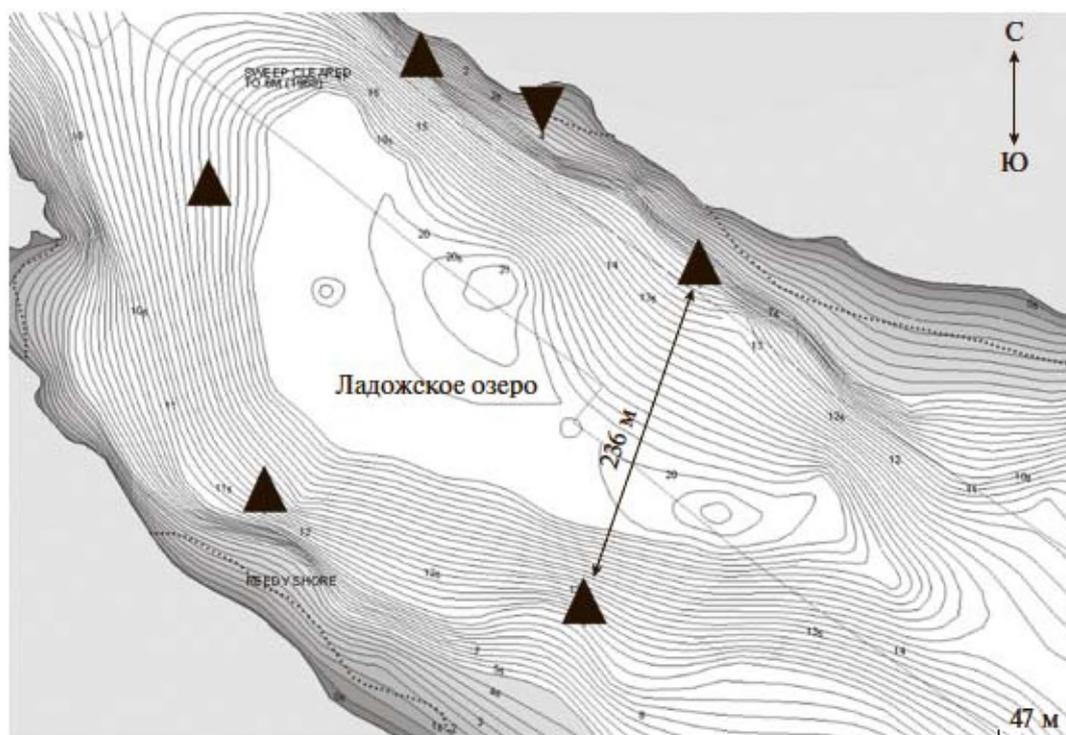


Рис. 1. Схема экспериментальных работ на Ладожском озере. Треугольники с основаниями внизу – пункты приема. Треугольник с основанием сверху – пункт излучения. Контурными линиями нанесена батиметрия.



Рис. 2. Используемые технические средства: (а) – электроискровой излучающий комплекс (накопитель энергии и спаркер); (б) – гео-гидроакустический измерительный буй ледового класса.

тель энергии производства ООО «ГЕОДЕВАЙС» – модель MultiJack 500HP1.5 (рис. 2а), обеспечивающий энергию импульса порядка 500 Дж.

Для приема сейсмоакустического сигнала на поверхности льда использовались автономные

вмораживаемые буи [10], включающие широкополосный чувствительный элемент, основанный на принципах молекулярной электроники, регистратор с системой точной временной синхронизации и блок аккумуляторов. Такие системы мо-

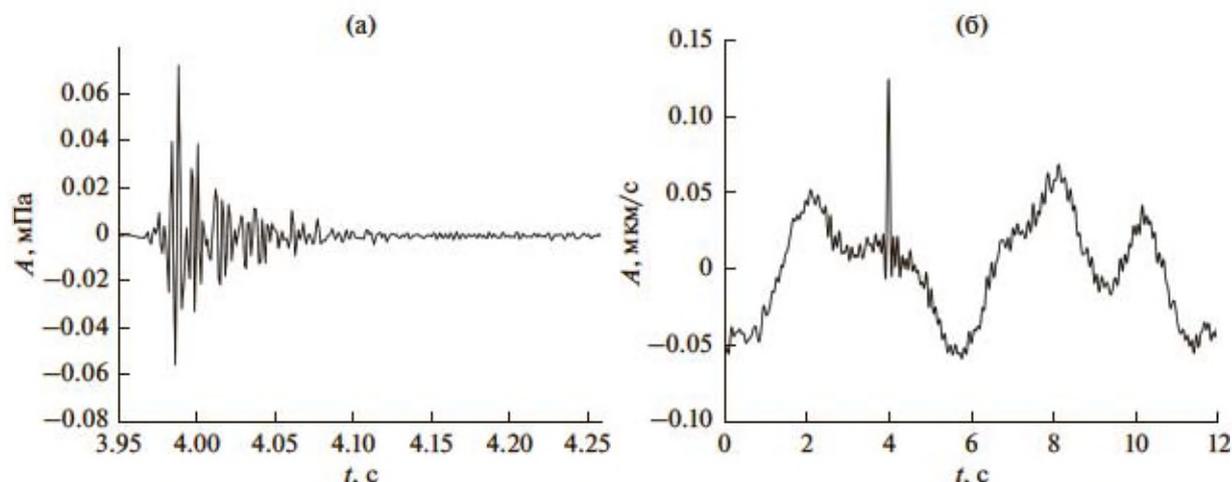


Рис. 3. Импульс, генерируемый расположенным на половине глубины водоема спаркером, зарегистрированный гидрофоном в диапазоне частот (а) – 50–500 Гц и (б) – сейсмическим приемником в диапазоне частот 0.03–10 Гц на берегу.

гут оперативно размещаться на ледовом поле одним человеком. Там, где это было возможно, во льду вырубалась лунка на глубину порядка 25 см, в которую на песчаную подушку устанавливался модуль ледовой системы. Для защиты от ветровой помехи место установки присыпалось снегом. В рамках эксперимента буями измерялась вертикальная компонента колебательной скорости в диапазоне частот от 0.03 до 50 Гц. На рис. 1 отмечены положения приемных пунктов (треугольники с основанием внизу) относительно берегов и рельефа дна водоема, и точка излучения (треугольник с основанием сверху). Приемная система автономно работала в течение 5 дней. Дополнительно использовались контрольные пьезокерамические гидрофоны, установленные на половине глубины водоема, на расстоянии 20 м от излучателя в северо-западном направлении, а также низкочастотный вертикальный маятниковый сейсмометр типа СМЗ-ОС (чувствителен к изменениям колебательной скорости), размещенный на массивном бетонном блоке на берегу в 20 м на север от места расположения источника. Данные с дополнительных приборов принимались на сейсмический регистратор Reftek-130В и записывались с частотой оцифровки 1 кГц.

Спаркер опускался на глубину, равную половине глубины водоема, с надводного судна, которое обеспечивало электропитание, и излучал сигналы с периодичностью 10 с. Стационарные условия эксперимента позволили выделить, в процессе обработки, 12 идентичных сигналов, которые были когерентно просуммированы для снижения влияния фонового шума. На рис. 3 приведены волновые формы импульса акустического давления, распространяющегося в воде (рис. 3а) и трансформирующегося при прохождении берегового клина в сейсмоакустическое возмущение на

берегу (рис. 3б). Каналы синхронизованы, но масштаб времени на графиках разный. Сигнал от спаркера наблюдается на фоне высокоамплитудной низкочастотной шумовой помехи с характерным периодом микросейсмических колебаний. Однако хорошая повторяемость генерируемого импульса позволяет достаточно точно его зарегистрировать, даже при низком исходном соотношении сигнал/помеха (рис. 3б). В частности, когерентное суммирование сигналов, записанных сейсмическим приемником, позволило повысить соотношение сигнал/помеха на 23 дБ. Структура сигнала, записанного гидрофоном (рис. 3а), неоднозначна по причине формирования сложной интерференционной картины, обусловленной многократными отражениями от осадочных слоев дна, ледового покрова, берега и бортов корабля. Обращает на себя внимание небольшая длительность сигнала, которая составляет всего несколько десятков миллисекунд. Можно заметить также, что амплитуда акустического давления в воде достаточно велика для его точного выделения на фоне помехи.

На рис. 4 показан частотный состав импульса акустического давления, возбуждаемого в водном слое (рис. 3а). Амплитудный спектр имеет осциллирующий характер с максимумом в окрестности 250 Гц. Важной особенностью электроискрового источника является зависимость спектрального состава возбуждаемого импульса от его интенсивности. Учитывая особенности приемного оборудования, низкочастотный сигнал был зарегистрирован только на берегу (рис. 4б). При этом обращает на себя внимание присутствие сигнала во всем частотном диапазоне.

Таким образом, используемый накопитель энергии и электроискровой излучатель являются высококачественными приборами, которые поз-

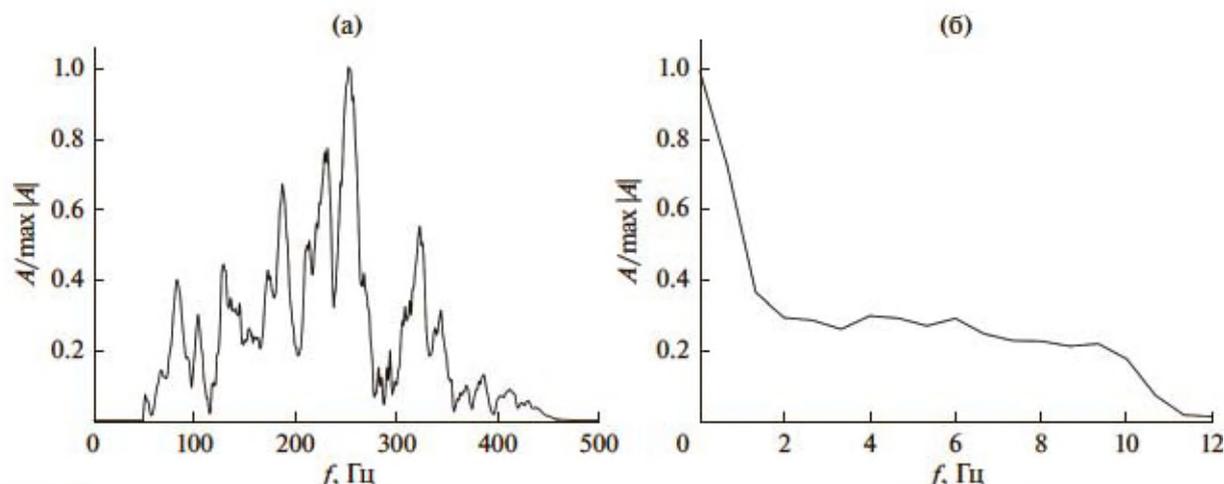


Рис. 4. Нормированный амплитудный спектр сигнала спаркера, зарегистрированного (а) – гидрофоном, расположенным в водном слое, и (б) – сейсмометром, расположенным на берегу, примерно на том же расстоянии от источника, что и гидрофон.

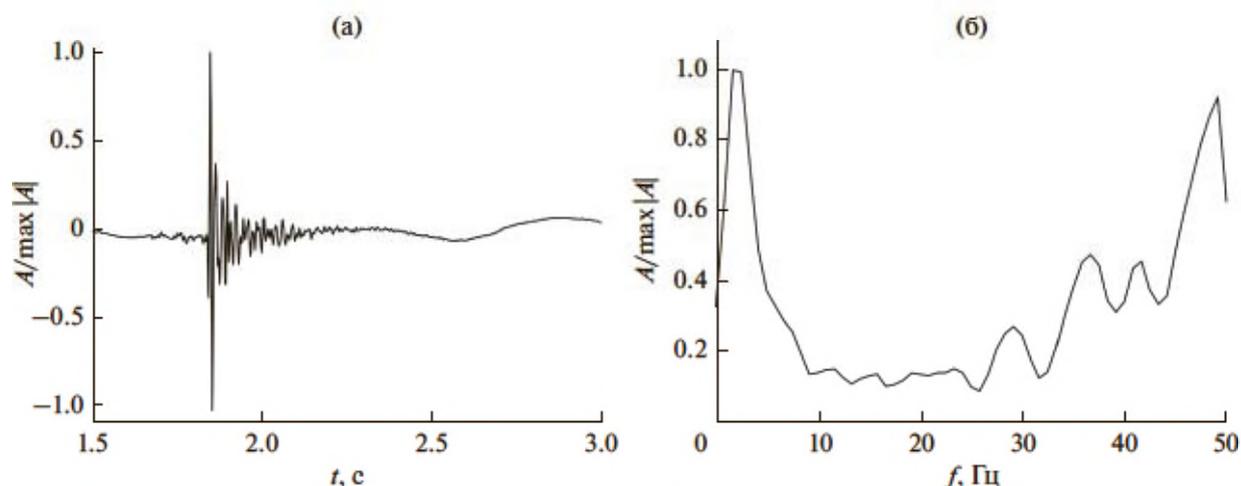


Рис. 5. Сейсмоакустический сигнал от выстрела холостого патрона вблизи дна зарегистрированный (а) – на поверхности льда и (б) – его амплитудный спектр.

воляют генерировать достаточно широкополосные импульсы акустического давления большой амплитуды. Важной особенностью является хорошая повторяемость сигналов, позволяющая осуществлять их когерентное накопление для повышения отношения сигнал/помеха в низкочастотной области. Однако, вдали от береговой линии применение такого типа источника может быть осложнено в связи с повышенными требованиями к его энергообеспечению.

Используемая в настоящей работе ледовая приемная система является низкочастотной, что не позволяет использовать ее совместно со спаркером. По этой причине, для реализации томографической схемы измерений нами использовалось сейсморужье производства компании “Геодавайс”. При помощи сейсморужья выполнялась серия выстрелов строительными патрона-

ми мощностью 2.7 кДж максимально близко к поверхности дна. Регистрация при этом осуществлялась на поверхности ледового покрова, при помощи вмороженных гео-гидроакустических буев. Для примера на рис. 5 приведен сигнал, записанный на расстоянии 165 м от источника, и его спектр. Можно сделать вывод, что для решения задач настоящего исследования сейсморужье является более предпочтительным источником, т. к. позволяет возбуждать импульсы в требуемом диапазоне частот и является гораздо более мобильным.

ВЫДЕЛЕНИЕ МОДОВЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Первым этапом томографического исследования является построение фоновой модели среды,

которая приближенно удовлетворяет условиям эксперимента и позволяет теоретически рассчитывать кинематические параметры ожидаемых сейсмоакустических сигналов. Как видно на рис. 1, глубина озера в местах установки измерительных сенсоров варьируется от 13 до 20 м. На основании изучения литературных данных было установлено, что дно в заливе Найсмери покрыто слоем ила мощностью до 18 м, а подстилающие породы сложены гранитами рапакиви. Это позволило, в качестве начального приближения, предложить слоистую модель среды, параметры которой – скорость продольных волн c_l , скорость поперечных волн c_t , плотность ρ и толщина слоя h указаны в табл. 1. Отличительной особенностью модели является наличие мягкого осадочного слоя.

С использованием результатов работы [11] в рамках составленной модели среды были рассчитаны фазовые c и групповые v скорости сейсмоакустических мод, формирующихся в среде, содержащей ледовый покров. Результаты расчета показали, что волновое поле в низкочастотной области представляет собой сумму достаточно большого числа модовых составляющих. В дальнейшем ограничимся рассмотрением только изгибно-гравитационной волны ледового покрова, фундаментальной моды поверхностной волны рэлеевского типа и первой нормальной гидроакустической моды (рис. 6, рассматриваемые участки дисперсионных кривых выделены серым цветом), которые в условиях проведенного эксперимента дали основной вклад в регистрируемое низкочастотное волновое поле.

Как отмечалось выше, на рис. 1 показана площадная расстановка вмораживаемых гео-гидроакустических буев. Вблизи каждого измерительного пункта на дне последовательно излучалось несколько сигналов с помощью сейморужья. В результате было получено 20 трасс, вдоль которых распространяется волновое возмущение. Условия эксперимента и, в частности, плотность ледового покрова не позволили добиться идеальных расстояний между пунктами, поэтому реальные расстояния изменяются от 165 до 372 м. Глубина озера в местах расположения пунктов в среднем составляла 13 м. На рис. 6 серым фоном отмечены модовые составляющие в частотном диапазоне, который целесообразно рассматривать в рамках проведенного эксперимента в виду высокого отношения сигнал/помеха. Снизу этот частотный диапазон ограничен вблизи частоты $f = 6$ Гц, где скорости фундаментальной и изгибной мод имеют близкие значения, а, значит, их будет затруднительно разделить в принимаемом сигнале. Ситуация осложняется также присутствием низкочастотного шума на частотах ниже 10 Гц.

Таблица 1. Параметры начальной слоистой модели среды

	h , м	c_l , км/с	c_t , км/с	ρ , кг/м ³
Лед	0.2	2.2	1.7	900
Жидкость	20	1.5	–	997
Осадки	18	0.7	0.4	2000
Основание	–	4.5	2.7	2600

Для определения времен пробега τ сигналов вдоль различных трасс вычислялась функция взаимной корреляции $K(\tau)$ между сигналом, записанным в точке излучения, и сигналом, принятым на удаленном пункте. При этом считалось, что среда распространения является изотропной, и для каждой пары измерительных точек взаимно-корреляционные функции сигналов, излученных с противоположных сторон, усреднялись. Выполняя фильтрацию в различных частотных диапазонах, по положению максимума огибающей взаимно-корреляционной функции, можно определить время пробега различных частотных составляющих излученного сигнала. Следуя результатам численного расчета, представленным на рис. 6, заметим, что нетривиальная в общем случае задача разделения мод с помощью одиночных приемных станций может быть решена в рамках обозначенной модели среды, так как рассматриваемые моды имеют разную скорость распространения в заданном диапазоне частот. Так,

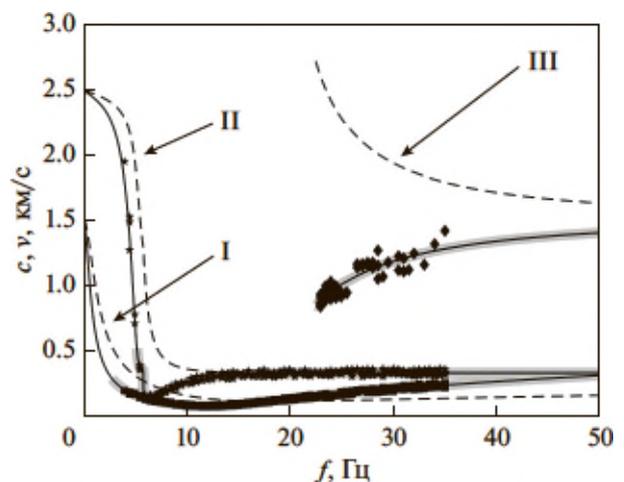


Рис. 6. Дисперсионные кривые сейсмоакустических мод низших номеров, формирующихся в модели среды с параметрами указанными в табл. 1. I – изгибно-гравитационная волна, II – фундаментальная мода поверхностной волны рэлеевского типа, III – первая нормальная гидроакустическая мода. Сплошные линии – групповые скорости v , пунктирные линии – фазовые скорости c . Точками отмечены оценки скоростей, полученные в эксперименте.

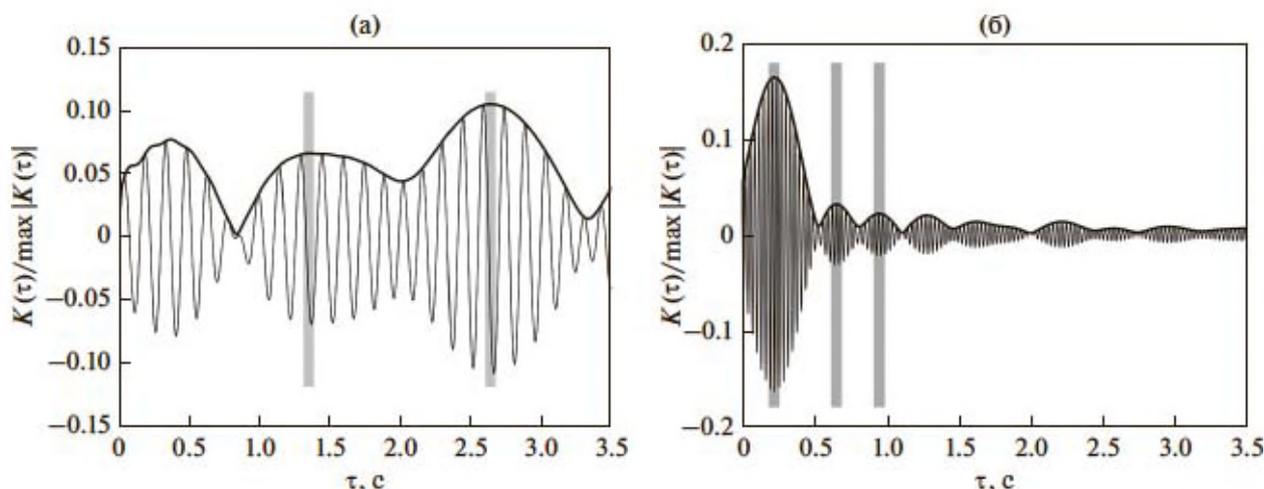


Рис. 7. Пример оценки времен распространения различных модовых составляющих сигналов на основе узкополосной фильтрации взаимно-корреляционной функции. (а) – Центральная частота $f = 7$ Гц, донная поверхностная и изгибная моды, (б) – центральная частота $f = 32.5$ Гц, гидроакустическая, донная поверхностная и изгибная моды.

наименьшее время пробега будет у первой нормальной гидроакустической волны, затем придет поверхностная волна рэлеевского типа и, наконец, изгибно-гравитационная волна. Причем в низкочастотной области (до 23 Гц) корреляционная функция должна иметь всего два максимума, так как гидроакустические моды на этих частотах не распространяются. Для определения достоверных максимумов огибающей функции взаимной корреляции их поиск выполнялся в 20% интервале от рассчитанных на основе модельных групповых скоростей (рис. 6) времен пробега. На рис. 7 в качестве примера приведены взаимно-корреляционные функции сигналов, распространяющихся вдоль трассы длиной 236 метров (см. рис. 1) для двух частотных диапазонов 5.8–8.2 Гц (рис. 7а) и 29.9–35.1 Гц (рис. 7б). Серым цветом на графике нанесены положения максимумов, которые удовлетворяют указанному выше условию. В результате были оценены экспериментальные времена пробега вдоль различных трасс в нескольких частотных диапазонах. На рис. 6 точками нанесены скорости, рассчитанные на основе экспериментальных оценок времен пробега вдоль прямой. Эти результаты будут использоваться далее при томографической оценке параметров среды.

ТОМОГРАФИЧЕСКАЯ СХЕМА

Для решения обратной задачи применяется линеаризованная томографическая схема, предложенная ранее в [13, 14] и использовавшаяся для восстановления характеристик водного слоя [13], а также параметров дна [14]. В настоящей работе предпринята попытка обобщения полученных результатов на случай совместного восстановле-

ния параметров льда, водного слоя и дна. Как и в работе [13], искомое двумерное распределение скорости в среде раскладывалось на базисные функции, формирующие полосчатый базис. Матрица возмущений представляет собой задержки времен распространения модовых сигналов относительно фоновой скоростной модели среды, вызванные последовательным введением в каждую из базисных полос возмущений тех параметров модели, которые требуется восстановить. Предполагая, что наблюдаемые в эксперименте возмущения времен распространения мод могут быть представлены в виде линейной комбинации временных задержек, вызванных базисными функциями, решение обратной задачи восстановления пространственных распределений параметров среды можно свести к решению системы линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложения этих параметров по полосчатому базису. Процесс построения матриц возмущений с помощью базисов полосчатого типа для совместного восстановления различных параметров среды подробно описан в работах [1, 13, 14].

На первом этапе для оценки возможностей и ограничений рассматриваемого подхода в условиях проведенных измерений было проведено численное моделирование с параметрами, близкими к условиям эксперимента. В соответствии с результатами работы [14] трехмерная задача разбивалась на две двумерные. В этом случае, в каждой точке горизонтальной плоскости среда представлялась вертикально-слоистой. Для описания региона (рис. 1) на площади 500×500 м была построена квадратная сетка с шагом между узлами 5 м. В каждом узле сетки среда представляла собой слоистую модель: упругое полупространство,

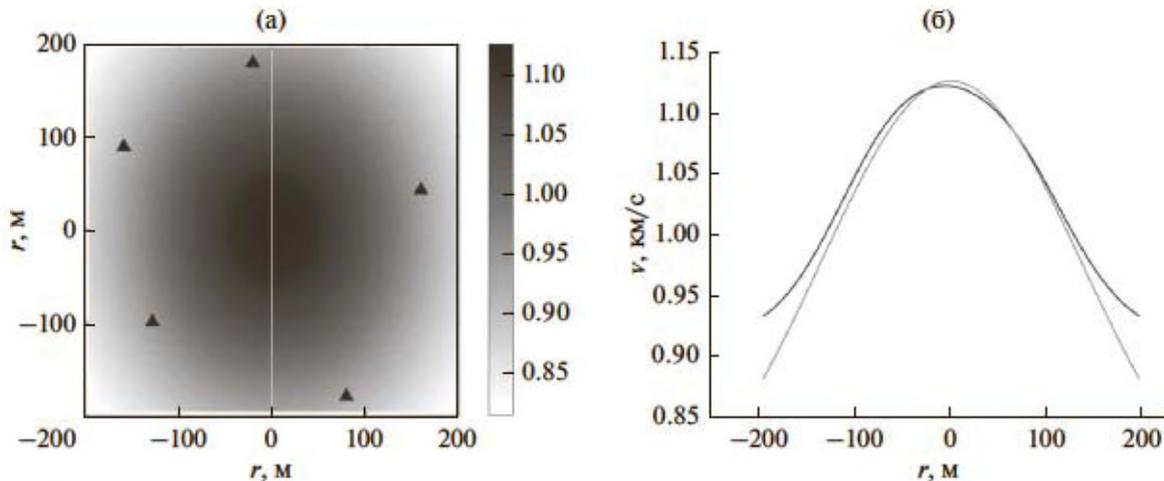


Рис. 8. (а) – Заданное распределение групповой скорости первой нормальной гидроакустической моды на частоте $f=27$ Гц с контрастом 30%; (б) – сечение (а), проходящее через ноль оси абсцисс: заданная модель (серый), результат томографического восстановления (черный).

упругий осадочный слой, жидкий слой и упругий слой ледового покрова.

Как показано в [15], волновое поле в слоистой модели может быть представлено в виде суммы отдельных модовых составляющих, имеющих различную скорость распространения. Для расчета фазовых и групповых скоростей численно решалось дисперсионное уравнение. При этом, следуя результатам [11], наибольшее влияние на скорости рассматриваемых мод будут оказывать толщина водного слоя, скорость поперечных волн в осадочном слое и толщина ледового покрова. В горизонтальной плоскости задавалось возмущение параметров среды в виде двумерной осесимметричной функции Гаусса. Принимая во внимание данные о рельефе дна (рис. 1), в качестве начальных выбирались параметры модели, указанные в табл. 1; их возмущение в максимуме функции Гаусса достигало 30% относительно фоновых значений. В результате было рассчитано горизонтальное распределение групповых скоростей v различных мод на различных частотах f . На рис. 8а для примера представлено рассчитанное модельное распределение групповой скорости v первой нормальной гидроакустической моды на частоте $f=27$ Гц при изменении глубины жидкого слоя от 15 до 20 м, что соответствует условиям эксперимента. Времена распространения сигналов между всеми парами источников и приемников для заданных пространственных распределений групповых скоростей мод рассчитывались в лучевом приближении путем численного решения уравнения эйконала [14], что позволило получить “экспериментальные” данные для решения обратной задачи. Полученные времена использовались далее для изучения устойчивости решения обратной задачи при добавлении слу-

чайных шумов в исходные данные при заданном количестве и конфигурации базисных функций, а также для оценки разрешающей способности томографической схемы. Стандартным способом рассчитывалась невязка полученного решения:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\sum_{i,j} |T_i - \hat{T}_i|^2}{\sum_{i,j} |T_i|^2}},$$

где T_i – экспериментальное время пробега сигнала между i -ой парой, \hat{T}_i – время пробега сигнала между i -ой парой, рассчитанное теоретически в лучевом приближении для восстановленной модели среды.

Достаточно сильный скоростной контраст (рис. 8а) может приводить к отклонению от линейного приближения при решении обратной задачи, что потребовало применения итерационного подхода для получения оценок среды с приемлемой точностью. В этом случае, на каждом итерационном шаге восстановлению подлежит поправка к распределению скорости в среде относительно полученной на предыдущем шаге скоростной модели. На первой итерации принималось однородное распределение в соответствии с параметрами, указанными в таблице 1. Удовлетворительный результат решения обратной задачи на модельных данных был получен после пяти итераций для всех трех рассматриваемых мод, имеющих разные скорости. На рис. 8б в качестве примера показаны восстановленное и заданное значения групповой скорости первой нормальной гидроакустической моды на частоте $f=27$ Гц в сечении исходной модели, отмеченном серым цветом на рис. 8а. Невязка по правой части составила $\eta_T = 0.009$, невязка по решению (вычислялась аналогично η_T , см. [14]) равна $\eta_{\Delta v} = 0.03$. Мо-

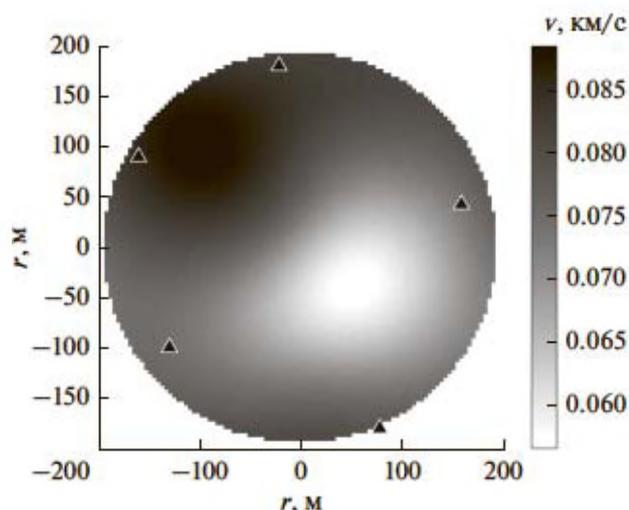


Рис. 9. Результат томографического восстановления распределения групповой скорости изгибной волны ледового покрова на частоте $f = 9.5$ Гц.

делирование показало, что при использовании в разложении 4 базисных полос, поворачиваемых под 7 углами, разрешение, получаемое с помощью рассматриваемой конфигурации приемной системы, не превышает 100 м. Увеличение количества базисных функций приводит к повышению разрешения, но при этом наблюдается ухудшение обусловленности матрицы возмущений при фиксированном объеме исходных данных, что требует привлечения большей регуляризации решения и приводит к увеличению невязки по решению. Добавление в исходные данные случайной помехи с нулевым средним и среднеквадратичным амплитудным отклонением, составляющим 1–5% от среднеквадратичного значения исходных данных, не приводило к существенному ухудшению результатов восстановления. Наблюдаемые при этом случайные возмущения результатов восстановления сглаживались после применения пространственной фильтрации получаемых оценок.

Выбранные параметры решения обратной задачи (параметры базиса, регуляризации и фильтрации), определенные в рамках численного моделирования, использовались на следующем этапе для инверсии экспериментально оцененных времен распространений. На этом этапе исследования была выполнена томографическая реконструкция групповых скоростей рассматриваемых в работе волновых мод для отдельных частотных диапазонов.

Начнем рассмотрение с медленной изгибно-гравитационной моды, энергия которой сосредоточена вблизи ледового покрова. На рис. 9а приведен результат восстановления распределения групповой скорости изгибной волны вблизи ча-

стоты $f = 9.5$ Гц после трех итераций, невязка составила $\eta_T = 0.06$. Скорость этой волны в основном определяется толщиной ледового покрова, причем пониженные скорости (светлые цвета) соответствуют более тонкому льду. Полученный результат в целом соответствует наблюдениям участников экспедиции, так в юго-восточной области ледовый покров являлся крайне неоднородным и состоял из чередующихся слоев твердого льда, жидкости и снега. В частности, именно это обстоятельство привело к смещению приемников относительно изначально планировавшейся схемы наблюдений с равносторонним пятиугольником. В северо-западной части озеро глубже, а лед был консолидированным. Значения скоростей на яркостной шкале рис. 9 можно условно перевести в шкалу толщины льда с пределами 5–40 см (в общем случае необходимо учитывать упругие свойства ледового покрова).

На рис. 10 представлено восстановленное распределение скорости фундаментальной моды поверхностной волны рэлеевского типа на центральной частоте 28.5 Гц, скорость которой сложным образом зависит от характеристик осадков. Невязка после четырех итераций составила $\eta_T = 0.09$. Учитывая грубую связь между глубиной проникновения и длиной волны поверхностного типа, полученное распределение можно отнести к осадочному слою на глубине 7 м. Дно озера в районе исследования имеет углубление. Можно предположить, что в этом углублении накапливаются низкоскоростные осадки, что приводит к тому, что скорости на его склонах оказываются более высокими. Здесь стоит отметить, что при решении обратной задачи не учитывался достаточно сложный рельеф дна, что может приводить к наличию пониженных скоростей в результатах восстановления из-за увеличения геометрического пути, проходимого волной.

На рис. 11 показано восстановленное распределение скорости первой нормальной гидроакустической моды, характеризующей параметры водной толщи. После пяти итераций невязка равна $\eta_T = 0.04$. Учитывая слабое разрешение приемной системы, отметим, что скорость гидроакустической моды максимальна в тех областях среды, где глубина озера больше. Таким образом, в условиях эксперимента оказалось, что характер зависимостей скорости поверхностной волны и гидроакустической моды от глубины являются противоположными.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что начальные параметры модели среды, заданные в табл. 1, достаточно сильно изменяются в горизонтальной плоскости. В частности, вариации толщины ледового покрова достигают 100% относительно фоновой. Сложная структура льда обусловлена тем, что эксперимент выпол-

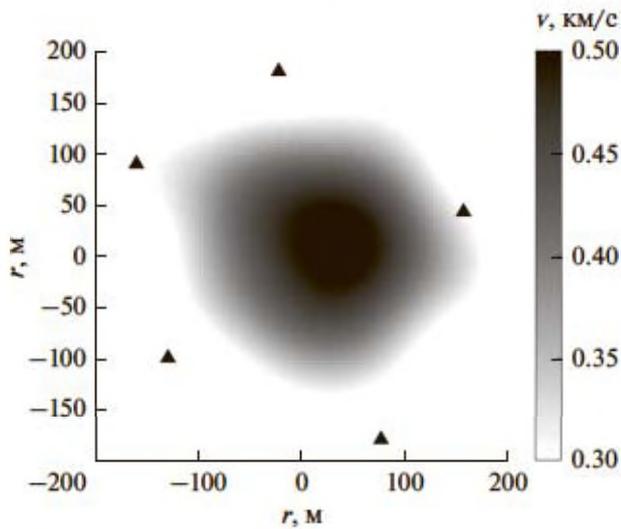


Рис. 10. Результат томографического восстановления распределения групповой скорости фундаментальной моды донной поверхностной волны на частоте $f = 28.5$ Гц.

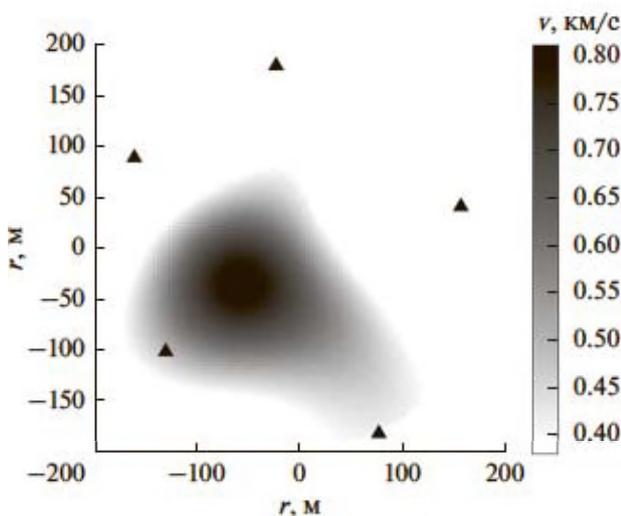


Рис. 11. Результат томографического восстановления распределения групповой скорости первой нормальной гидроакустической моды на частоте $f = 33$ Гц.

нялся в весеннее время, когда лед уже неоднократно начинал таять. Пользуясь приближенным соотношением между скоростью волны рэлеевского типа и скоростью поперечных волн $v = 0.9c$, заметим, что вариации скоростей поперечных волн в осадках лежат в диапазоне $0.27\text{--}0.45$ км/с, который соответствуют достаточно мягким геологическим структурам типа глинистых грунтов. Анализируя распределение групповой скорости гидроакустической моды при условии отсутствия течений и других рассеивателей в водной толще, можно заключить, что изменения скоростей свя-

заны только с изменением глубины водоема, которое соответственно достигает 30% относительно значения, указанного в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе в натуральных условиях испытаны современные скважинные и морские сейсморазведочные излучатели отечественной разработки. На основе обработки экспериментальных данных проанализирован спектральный состав сейсмоакустических сигналов, возбуждаемых в водной толще при наличии ледового покрова электроискровым излучателем и сейсморужем. Подтверждена высокая стабильность генерируемых импульсов, что позволяет успешно применять источники для решения инженерных сейсморазведочных задач в мелком водоеме.

С применением разработанных вмораживаемых автономных гео-гидроакустических буев установлено, что наиболее интенсивный фоновый шум, регистрируемый на льду, находится в диапазоне частот, не превышающем 10 Гц, что существенно ниже центральной частоты электроискрового источника. Это делает возможным применение морской модификации метода отраженных волн для изучения верхней части разреза на акваториях, покрытых льдом.

Предложена и экспериментально апробирована активная томографическая схема совместной оценки параметров ледового покрова, водного слоя и донных осадков с помощью специализированных приемников, расположенных на льду на границе исследуемой области. Для восстановления неоднородностей, обладающих сильным контрастом, применялся итерационный алгоритм. Основой обсуждаемого подхода является возможность выделения в экспериментальных данных отдельных модовых составляющих сигналов и оценки их временных задержек, вызванных присутствием восстанавливаемых неоднородностей. В результате обработки данных проведенных натуральных измерений удалось выделить различные моды волнового поля, формирующегося в ледовых условиях рассматриваемого эксперимента. Для модовых сигналов, дающих основной вклад в регистрируемое поле, в различных частотных диапазонах были восстановлены карты групповых скоростей в исследуемой области, по периметру которой располагались приемники. Полученные результаты позволяют говорить о возможности совместного восстановления характеристик дна, водной толщи и ледового покрова по временам распространения отдельных модовых сигналов, зарегистрированных сейсмоакустическими приемниками, расположенными на поверхности льда. На следующем этапе проводимых исследований предполагается рассмотреть возможности пассивной томографии [16], не тре-

бующей использования сейсмоакустических излучателей, основанной на оценке времен распространения сигналов из функции взаимной корреляции шумового поля. Выполненные в рамках обсуждаемого эксперимента продолжительные измерения сейсмоакустического шума на льду в дальнейшем будут использоваться для исследования этой возможности. В этом случае ожидается расширение частотного диапазона рассматриваемых зондирующих сигналов в низкочастотную область и более детальное изучение характеристик дна, расположенных на больших глубинах.

Авторы благодарны руководству АО «Концерн «Океанприбор»», в частности Генеральному директору А.В. Шатохину, директору Карельского филиала А.В. Борисову и капитану плавбазы П.А. Киркину за всестороннее содействие в организации работ на полигоне.

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70034, а также при поддержке гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Burov V.A., Sergeev S.N., Shurup A.S., Shcherbina A.V.* Acoustic tomography of shallow water with unknown relief of hard bottom // *Phys. Wave Phenom.* 2013. V. 21. № 2. P. 152–157.
2. *Яновская Т.Б.* Поверхностно-волновая томография в сейсмологических исследованиях. СПб.: Наука, 2015. 167 с.
3. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* Исследование геоакустических полей – физическая основа мониторинга локальных неоднородностей и запасов углеводородов в Арктике // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. № 5. С. 565–571.
4. *Белов А.И., Кузнецов Г.Н.* Оценка акустических характеристик поверхностных слоев морского дна с использованием четырехкомпонентных векторно-скалярных приемников // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 2. С. 194–202.
5. *Гиндлер И.В., Козельский А.Р.* О возможности восстановления геоакустических параметров морского дна на основе экспериментальной информации о функции Грина гидроакустического волновода в широкой полосе частот // *Акуст. журн.* 1992. Т. 38. № 1. С. 29–33.
6. *Вировлянский А.Л., Казарова А.Ю., Любавин Л.Я., Стромков А.А.* Измерения разностей времен распространения сигналов вдоль лучей с борта дрейфующего судна // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45. № 4. С. 473–478.
7. *Гончаров В.В., Иванов В.Н., Кочетов О.Ю., Курьянов Б.Ф., Серебряный А.Н.* Акустическая томография на шельфе Черного моря // *Акуст. журн.* 2012. Т. 58. № 5. С. 614–622.
8. *Кудряшов В.М.* Применение шумового сигнала в акустической томографии арктического бассейна // *Акуст. журн.* 2002. Т. 48. № 2. С. 216–223.
9. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С.* Натурные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоема // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 1. С. 76–80.
10. *Sobisevich A.L., Presnov D.A., Agafonov V.M., Sobisevich L.E.* New-generation autonomous geohydroacoustic ice buoy // *Seism. Instr.* 2018. V. 54. № 6. P. 677–681.
11. *Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С.* Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 4. С. 426–436.
12. *Калинин А.В.* Сейсмоакустические исследования на акваториях. М.: Недра, 1983. 204 с.
13. *Буров В.А., Сергеев С.Н., Шуруп А.С.* Роль выбора базиса в задачах акустической томографии океана // *Акуст. журн.* 2007. Т. 53. № 6. С. 791–808.
14. *Presnov D.A., Sobisevich A.L., Shurup A.S.* Model of the geoacoustic tomography based on surface-type waves // *Phys. Wave Phenom.* 2016. V. 24. № 3. P. 249–254.
15. *Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С.* О локализации геологических отдельных арктического шельфа на основе анализа модовой структуры сейсмоакустических полей // *Докл. Акад. наук.* 2018. Т. 479. № 1. С. 80–83.
16. *Жостков Р.А., Преснов Д.А., Шуруп А.С., Собисевич А.Л.* Сравнение микросейсмического зондирования и томографического подхода при изучении глубинного строения Земли // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2017. Т. 81. № 1. С. 72–75.