

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ШЕЛЬФЕ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

**А.Н. Самченко, Г.И. Долгих, А.В. Кошелева,  
А.А. Пивоваров, А.Н. Швырев, И.О. Ярошук**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Тихоокеанский океанологический институт  
им. В.И. Ильичева ДВО РАН<sup>1</sup>

Статья посвящена обсуждению результатов гидроакустических экспериментальных работ в заливе Петра Великого Японского моря, проведенных в мае и октябре 2016 г. В эксперименте использовались низкочастотные излучатели с несущей частотой 22 и 33 Гц, прием сигналов осуществлялся на автономные гидроакустические станции (АГС), синхронизированные по времени. Полученные в результате измерений групповые скорости различных мод позволяют провести оценки геоакустических свойств дна. Результаты гидроакустических работ сравниваются с геоакустической моделью участка шельфа в районе проведения экспериментов. Геоакустическая модель построена на основе имеющейся геолого-геофизической информации залива с расчетом акустических свойств дна.

## ВВЕДЕНИЕ

В последнее время широкое распространение набирает изучение акустических свойств дна на основе сейсмоакустических исследований в связи с активным освоением шельфовых областей океана [1, 2]. Поиск и добыча полезных ископаемых, проведение коммуникаций по дну океана, строительство гидротехнических сооружений необходимо предварять детальными геолого-геофизическими исследованиями, в том числе и изучением свойств дна. Много публикаций посвящено геоакустической инверсии, где путем анализа акустических волн, распространяющихся в океане, пытаются получить информацию о структуре и характеристиках дна, например в работе [3]. В глубинном сейсмическом зондировании Земли используют как искусственные источники акустического сигнала: взрывные, ударные и в водной среде – пневматические и электроискровые, так и естественные – волны землетрясений [4, 5].

Экспериментальные акустические исследования, представленные в данной статье, принципиально отличаются от приведенных выше работ прежде всего используемыми низкими частотами и источниками возбуждения акустических волн. Отличительным также является применение в эксперименте сложных,

длительных по времени, фазоманипулируемых сигналов. Подобные работы проводились на побережье Нижегородского водохранилища авторами статьи [6]. Коллегами использовался в экспериментах когерентный гидроакустический излучатель. Результаты экспериментальных работ показали возможность проследить осадочную толщу до глубин 2 км. Глубина проникновения сигнала в наших экспериментах превысила 400 м в осадочном слое при расстоянии между приемником и излучателем 17 км. Таким образом, рабочие характеристики, компактность и простота в использовании низкочастотных излучателей электромагнитного типа позволяют решать задачи томографии дна эффективно с экономической и экологической точки зрения. Успешное применение гидроакустических излучателей ранее было получено в эксперименте, где приемная система располагалась на суше [7].

Как известно, на океаническом шельфе формирование звукового поля для достаточно низких частот в основном определяется свойствами донных осадков, нежели скоростью звука в воде. Разработка же геоакустических моделей дна на основе геологических и геофизических данных позволяет лишь

<sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 2312617.  
E-mail: samchenco@poi.dvo.ru

приблизительно описать акустические свойства среды [8]. Корректировка и количественное уточнение таких моделей возможно только на основе совместного проведения натуральных акустических экспериментов и последующего математического моделирования звукового поля.

## ■ Геоакустическая модель

Обобщение, а также качественное и количественное описание геометрических параметров геологических структур и их акустических характеристик находит свое выражение в такой научной категории, как геоакустическая модель [9]. Геоакустическая модель построена всего залива Петра Великого [10]. В данной статье рассмотрим участок шельфа (далее полигон), где проводились сейсмоакустические эксперименты.

В пределах исследуемого полигона в заливе Петра Великого нет буровых скважин, поэтому информация о его строении основана на геологическом опробовании дна трубками и дночерпателями [11], изучении геологического строения береговой линии [12] и результатов геофизических работ на полигоне [13–16]. На основе данных сейсморазведки и геологической информации на исследуемом полигоне выделено 3 осадочных слоя и акустический фундамент, представленный гранитоидами позднеперм-

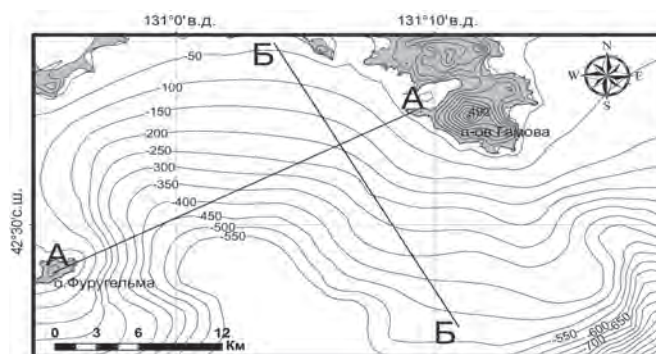


Рис. 1. Акустический полигон в заливе Петра Великого. Изолиниями показана верхняя кромка акустического фундамента

ского возраста [13]. Мощность осадочного слоя на полигоне достигает более 500 м (рис. 1). Осадочные слои дна исследуемого полигона представлены песками различного гранулометрического состава позднеплейстоцено-голоценового возраста – поверхностный слой, грубозернистыми песками нижнего–среднего плейстоцена во втором слое и третий слой состоит из гравийно-галечных отложений, предположительно, неогенового возраста. На рис. 2 показаны разрезы AA и BB, построенные на основе модели геологического строения, где цифрами I–III показаны осадочные слои и IV – акустический фундамент. Разрез BB построен над известным сейсмическим профилем [13].

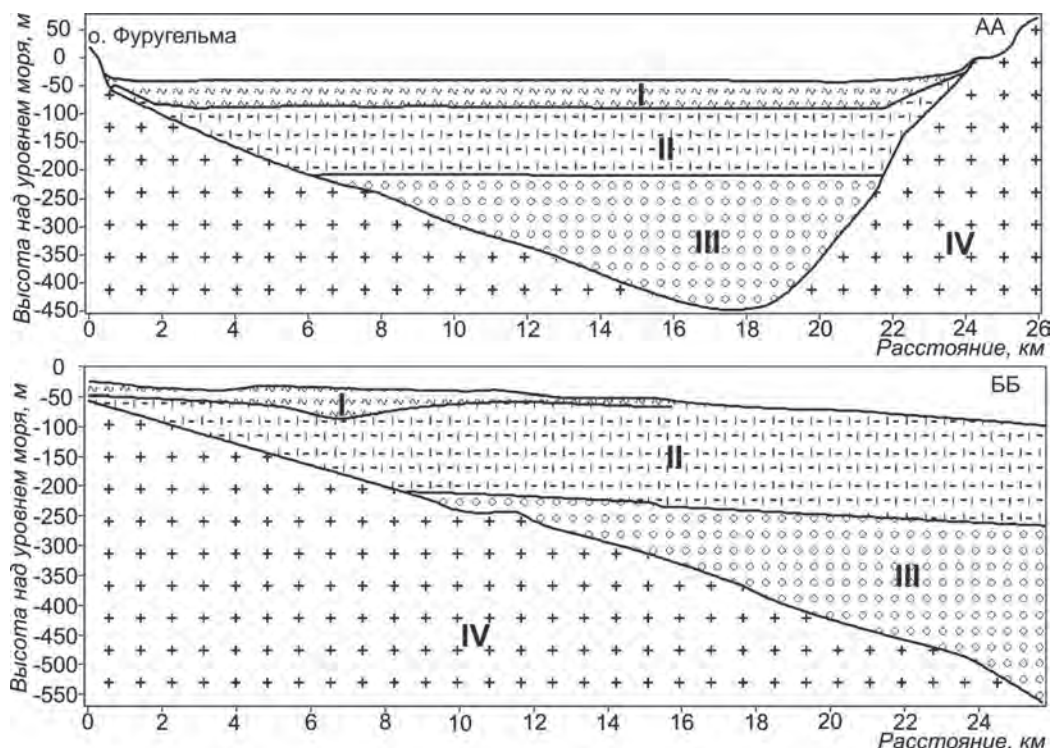


Рис. 2. Геологическая модель по разрезам AA и BB (рис. 1)

Акустические свойства садочных слоев позднелайстоцено-голоценового возраста и нижне-среднего плейстоцена рассчитаны на основе гранулометрического состава проб донных осадков [10]. Кроме того, в модели учитывается изменение акустических характеристик рыхлых отложений с глубиной. Акустические свойства для всего осадочного слоя позднелайстоцено-голоценового возраста находятся в пределах от 1575 до 1810 м/с –  $V_p$ , от 300 до 475 м/с –  $V_s$  и от 1,85 до 2,14 г/см<sup>3</sup> –  $\rho$ , с учетом, что максимальная мощность слоя не более 50 м. Соответственно в модели, в зависимости от глубины места, акустические свойства слоя нижне-среднего плейстоцена принимают значения от 1800 м/с до 1850 м/с –  $V_p$ , от 469 м/с до 500 м/с –  $V_s$  и от 2,13 г/см<sup>3</sup> до 2,18 г/см<sup>3</sup> –  $\rho$ . Осадочный слой неогенового возраста состоит из гравийно-галечных отложений, акустические свойства которого в модели взяты из справочных источников. Значения  $V_p(N_2) = 3000$  м/с,  $V_s(N_2) = 1810$  м/с,  $\rho(N_2) = 2,33$  г/см<sup>3</sup> являются средними для всего осадочного слоя неогено-

нового возраста. Акустические свойства фундамента приняты одинаковыми в модели для всего исследуемого полигона ( $V_p = 5400$  м/с,  $V_s(N_2) = 3300$  м/с,  $\rho = 2,79$  г/см<sup>3</sup>,  $K_p = 35$  дБ/м), вычислены в лабораторных условиях на образцах пород [17]. Образцы пород отбирались на суше.

### ■ Схема экспериментов

В мае и в октябре 2016 г. на акустическом полигоне ТОИ ДВО РАН в заливе Петра Великого Японского моря были проведены низкочастотные гидроакустические эксперименты. Излучение низкочастотных сигналов осуществлялось вдоль акустической трассы при помощи двух излучателей с основными частотами 22 Гц и 33 Гц [18]. Глубина погружения гидроакустического излучателя 22 Гц составляла 18 м, а излучателя 33 Гц – 15 м. На рис. 3 показаны схемы экспериментов, проведен-

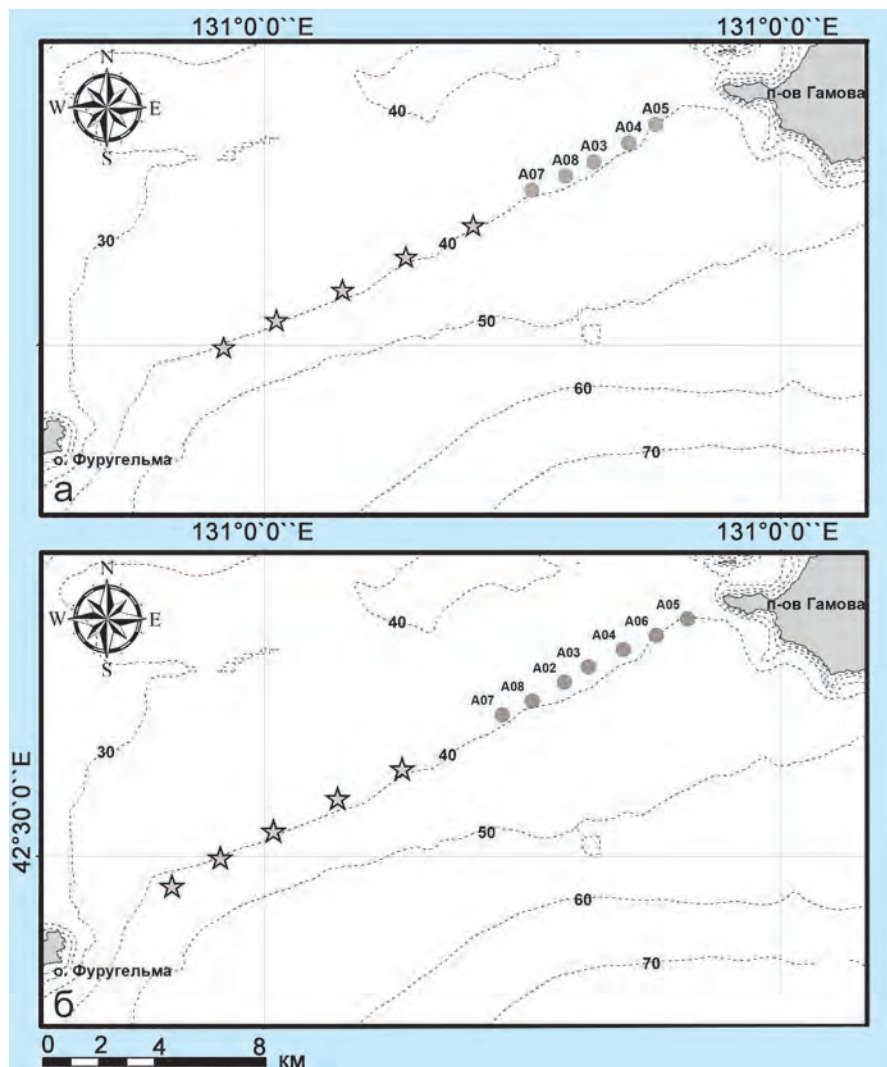


Рис. 3. Схемы экспериментов в мае (верхний – 33 Гц) и в октябре (нижний – 22 Гц) 2016 г. Звездочки – точки излучения, кружки – постановки донных автономных гидроакустических станций

ных в мае (верхний рисунок) и в октябре (нижний рисунок) 2016 г. В мае 2016 г. излучение на частоте 33 Гц было выполнено в пяти точках, а прием осуществлялся в четырех точках, где были расположены донные станции, снаряженные автономными гидроакустическими регистраторами (А3, А5, А7, А8) [19]. Необходимо отметить, что гидрофоны расположены на расстоянии примерно 20–30 см от дна в используемых АГС. Расстояние между точками излучения и приема варьировались от 2 до 14 км. В ходе эксперимента излучались как тональные сигналы, так и фазоманипулированные М-последовательностью длиной 255 символов, с 20 периодами несущей частоты на символ (длительность сигнала 155 с). Конструктивные особенности излучателя обеспечивали заметный уровень излучения третьей гармоники (99 Гц, мощность излучаемого сигнала примерно на 30 дБ ниже, чем на частоте 33 Гц), также фазоманипулированной. На частоте 33 Гц излучатель создавал эффективное звуковое давление примерно 1 кПа.

По этой же трассе в октябре 2016 г был проведен подобный эксперимент с излучателем 22 Гц (рис. 3). Здесь было выбрано пять точек излучения, семь точек приема (А2–А8), расстояние между точками излучения и приема изменялось от 3 до 17 км. Излучались как тональные сигналы с несущей частотой 22 Гц, так и фазоманипулированные М-последовательностями длиной 63 и 255 символов, с 20 периодами несущей частоты на символ (длительность сигналов 57 и 232 с). Конструктивные особенности данного излучателя обеспечивали заметный уровень излучения третьей и пятой гармоник (66 Гц, мощность излучаемого сигнала примерно на 40 дБ ниже, чем на частоте 22 Гц; 110 Гц, мощность излучаемого сигнала примерно на 45 дБ ниже, чем на частоте 22 Гц), также фазоманипулированных. На частоте 22 Гц излучатель создавал эффективное звуковое давление примерно 6 кПа. Во всех экспериментах частота дискретизации принимаемых сигналов была выбрана 3255 Гц.

Фазоманипулированные сигналы имеют ширину около 12 Гц, поэтому данные, полученные на приемных станциях, пропускались через линейные полосовые фильтры с шириной полосы пропускания 12 Гц и центральными частотами 22, 33, 66, 99 и 110 Гц. Далее вычислялись нормированные взаимокорреляционные (далее – корреляционные) функции между ними и «эталонными» сигналами, сформированными из исходных М-последовательностей с учетом доплеровского сдвига частоты. Эти функции могут быть интерпретированы как распределение энергии звукового сигнала по отдельным нормальным модам, различающимся по групповой скорости.

## ■ Обсуждение результатов

Ранее авторами было проведено моделирование распространения низкочастотного акустического сигнала [20], расчеты основаны на методе тензорных импедансов [21]. Используемый в расчетах метод позволяет свести краевую задачу теории упругости к задаче Коши для матричного и скалярного уравнений типа Риккати.

$$dY/dz = YAY + SY + YQ + P,$$

где  $Y$  –  $(2 \times 2)$  матрица тензора импедансов упругого слоя;  $A(z)$ ,  $S(z)$ ,  $Q(z)$ ,  $P(z)$  – известные матрицы, характеризующие свойства неоднородного упругого слоя и частоту. Непосредственно в водном слое тензор импедансов вырождается в скалярный импеданс, а матричное уравнение переходит в обычное уравнение Риккати. Расчеты распространения акустического сигнала основаны на данных геоакустической модели. По акустической трассе от о-ва. Фуругельма до мыса Шульца (расчет проводился на половине данной трассы, ближе к мысу Шульца) в случае, когда излучение происходило бы вблизи приемной антенны, наблюдается формирование одной моды с групповой скоростью порядка 3000 м/с и второй моды порядка 1550 м/с. Во втором случае фиксируются три моды, когда точка приема смещена на 5 км, со скоростями порядка 3000, 1900 и 1590 м/с. Рассчитанные групповые скорости мод схожи с распространением волн типа Рэлея–Шолте–Стоунли на границах сред (вода – рыхлые осадки, между осадочными слоями с различными скоростными параметрами). Похожие теоретические исследования с близкими выводами представлены в работе [22]. Таким образом, зафиксированные сигналы с измеренными в эксперименте групповыми (средними) скоростями можно считать поверхностными волнами. Ранее авторами проводились расчеты трансформации гидроакустических волн на границе «вода–дно» [23].

На рис. 4, а показаны сигналы 22 Гц, принятые на различных АГС с точек излучения 1 и 2, где зафиксирована одна мода. Корреляционная функция во всех случаях имеет узкий пик с центром в 1350 м/с, что соответствует сигналу, прошедшему по границе вода – рыхлые отложения. Для сигналов 33 и 66 Гц корреляционная функция значительно шире – от 1600 до 2000 м/с. Отмечается раздвоение пика корреляционной функции на приемных станциях от ближних точек излучения, что показывает наличие двух осадочных слоев, близких по акустическим параметрам (рис. 5). Скорее всего, различие в корреля-

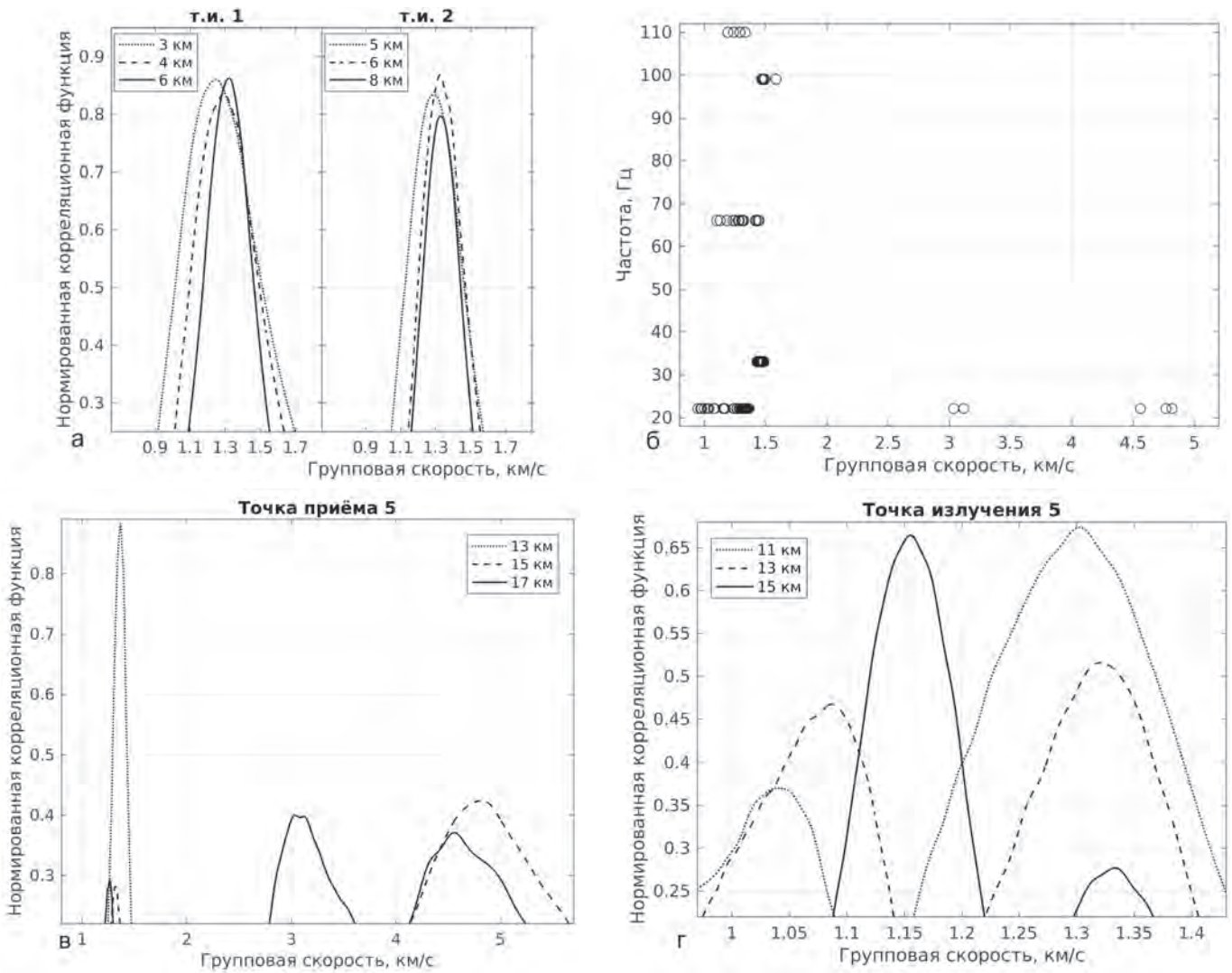


Рис. 4. а – сигналы 22 Гц, принятые на различных АГС с точек излучения 1 и 2; б – композиция всех принятых мод (с уровнем более 0,4) и их скоростей со всех точек излучения и приема; в – нормированная корреляционная функция для фазоманипулированного сигнала с несущей частотой 22 Г; г – моды 22 и 33 Гц с групповыми скоростями порядка 1000 м/с и меньше

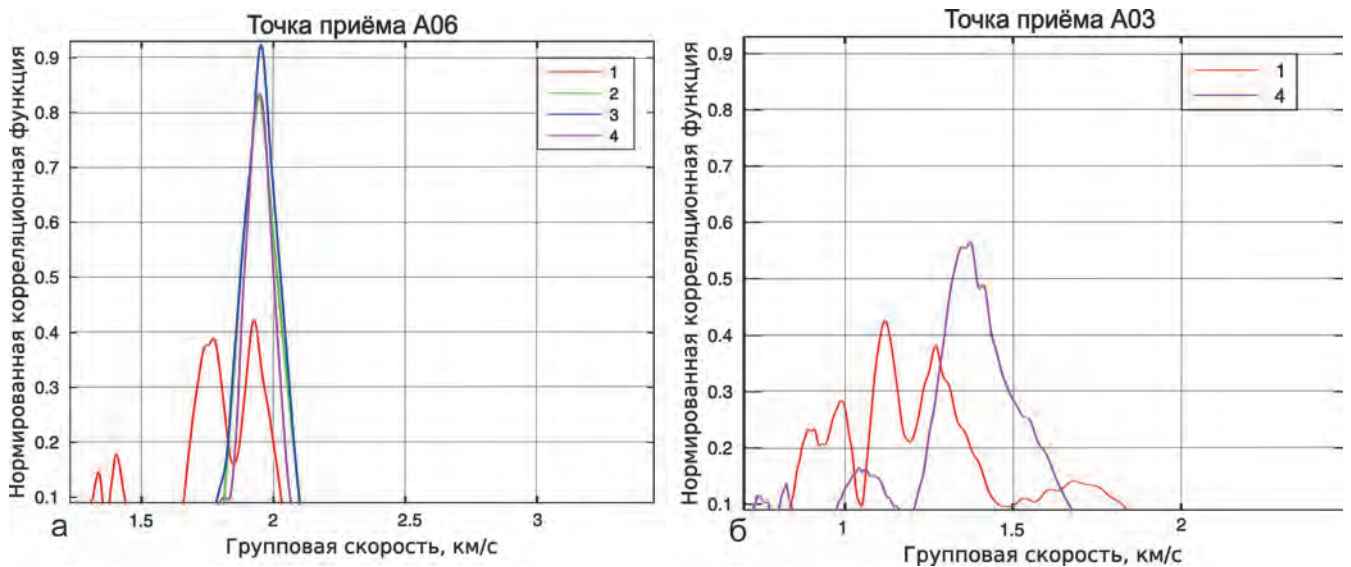


Рис. 5. а – нормированная корреляционная функция для фазоманипулированного сигнала с несущей частотой 33 Гц; б – нормированная корреляционная функция для фазоманипулированного сигнала с несущей частотой 22 Гц (низкоскоростной участок). Цветом показаны корреляционные функции, принятые из разных точек излучения

ционных функциях, полученных с разных точек приема и излучения, свидетельствует о том, что имеются значительные неоднородности в верхних осадочных слоях по акустической трассе. Так в работе [15] на сейсмоакустических профилях наблюдается погруженное в осадочной толще на 5–10 м древнее русло р. Туманной, проходящее перпендикулярно акустической трассе.

На рис. 4, в для примера представлены такие нормированные корреляционные функции, когда излучатель работал в самой дальней точке трассы (точка излучения № 5), а сигнал регистрировался на всех приемных системах. Как видно из рисунка, в разных точках приема регистрируются различные наборы мод. Такое положение дел связано с тем, что модовая структура поля формируется в основном осадками, изменяющимися по трассе. Ранее было установлено из геологических данных, что вдоль данной трассы залегает три осадочных слоя (более 400 м) [10], а водный слой здесь практически не меняется (вариации менее 2 м) и равен всего 40 м. Также нами приняты моды 22 и 33 Гц с групповыми скоростями порядка 1000 м/с и меньше (рис. 4, г и рис. 5), что соответствует скоростным характеристикам поперечных волн в рыхлых донных отложениях. Однако поперечная волна не создает объемных деформаций, а следовательно, не создает звукового давления, которое регистрируется гидрофоном.

На рис. 4, б приведена композиция всех принятых мод (с уровнем более 0,4) и их скоростей со всех точек излучения и приема. В основном приняты сигналы различной частоты, прошедшие по границе вода – рыхлые отложения. Сигналы с высоким уровнем сигнала приняты только на частоте 22 Гц со скоростями 1000–1400, 3000–3100 и более 4500 м/с, которые соответствуют трем границам: вода – рыхлые отложения, рыхлые отложения – гравийно-галечный слой и гравийно-галечный слой – акустический фундамент. Необходимо отметить, что амплитуды принятых сигналов 22 Гц, прошедших из глубин, увеличиваются по сравнению с прошедшими по поверхности с увеличением расстояния между приемником и излучателем (рис. 4, в). Информация о среде распространения сигналов может быть получена и по форме корреляционных функций. Отмечается, что узкие пики корреляционной функции соответствуют сигналам, прошедшим по ровным границам геологических сред, а широкие – там, где имеется наклон границы. Сигналов, прошедших по границе между

двух осадочных слоев, в эксперименте зафиксировано не было, когда расстояние между приемником и излучателем было более 6 км. Хотя два осадочных слоя с четкой границей между ними есть в геоакустической модели, поскольку они зафиксированы на сейсмических профилях [13]. Скорее всего, четкой границы между осадочными слоями по акустической трассе нет, она размыта и/или имеет значительные изменения по профилю. Таким образом, необходимо уточнить геологическое строение вдоль акустической трассы и внести корректировку в геоакустическую модель дна.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных сейсмоакустических исследований зафиксированы волны типа Рэлея–Шолте–Стоунли, прошедшие по границе вода – дно и по границам донных пород с различными акустическими свойствами. По данным расчета модовой структуры зафиксированных сигналов на расстояниях более 15 км между точками излучения и приема сигналы частотой 22 Гц получены групповые скорости 1350–1550, 1600–1900, 2800–3100 и 4400–4900 м/с. Скоростные характеристики мод сигналов с частотами 33, 66, 99 и 110 Гц колеблются в пределах от 1350 до 2000 м/с. Кроме того, на приемных системах на частотах 22 и 33 Гц приняты волны со скоростями примерно 1000 м/с и ниже, которые соответствуют скоростям поперечной волны в осадочном слое позднелайстоцено-голоценового возраста.

Проведенные эксперименты и детальная обработка их результатов позволили установить принципиальную возможность решения обратных задач определения числа и мощности осадочных слоев – по положению главного максимума корреляционной функции и по скорости распространения акустических волн. Имеются перспективы для дальнейших исследований в данной области, набора статистики проведенных экспериментальных сейсмоакустических работ на различных акустических трассах. При проведении измерений на более мелкой сетке (порядка нескольких сотен метров) возможно создание методики более детального восстановления структуры осадочных слоев. Кроме того, остались нерешенными несколько вопросов по результатам экспериментов: например моды на частоте 110 Гц распространялись по трассе быстрее, чем на частоте 99 Гц.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brandes H.G., Silva A.J., Walter D.J. Geo-acoustic characterization of calcareous seabed in the Florida Keys // *Marine Geology* 182. 2002. P. 77–102.
2. Kulgemeyer T., Dobeneck T., Muller H. et al. Lithofacies distribution and sediment dynamics on a storm-dominated shelf from combined photographic, acoustic and sedimentological profiling methods (Bay of Plenty, New Zealand) // *Marine Geology*. 2016. Vol. 376. P. 158–174
3. Dettmer J., Stan E.D. Bayesian evidence computation for model selection in non-linear geoaoustic inference problems // *J. Acoust. Am.* 2010. Vol. 128 (6). P. 3406–3414.
4. Мордвинова В.В., Артемьев А.А. Трехмерная модель юга Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий по обменным волнам // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 6. С. 887–904.
5. Кожевников В.М., Середкина А.И., Соловей О.А. Дисперсия групповых скоростей волн Рэлея и трехмерная модель строения мантии центральной Азии // *Геология и геофизика*. 2014. Т. 55, № 10. С. 1564—1575.
6. Авербах В.С., Боголюбов Б.Н., Заславский Ю.М. и др. Применение сложных фазоманипулированных сигналов для сейсмоакустического зондирования грунта гидроакустическим источником // *Акуст. журн.* 1999. Т. 45, № 1. С. 5–12.
7. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Чупин В.А., Швырев А.Н., Ярошук И.О. О перспективах применения лазерных деформографов для диагностики морского дна // *ДАН*. 2013. Т. 452, № 3. С. 321–325.
8. *Акустика дна океана* / под ред. Купермана У. и Енсена Ф. М.: Мир, 1984. 454 с.
9. Hamilton E.L. Geoaoustic modeling of the sea floor // *J. Acoust. Soc. Am.* 1980. Vol. 68. P. 1313–1340.
10. Самченко А.Н., Ярошук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (Японское море) // *Вестн. ДВО РАН*. 2017. № 5. С. 130–136.
11. Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И., Деркачев А.Н., Дударев О.В., Марков Ю.Д., Уткин И.В. Структура осадков и фаций Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 286 с.
12. Сясько А.А., Кутуб-Заде Т.К., Короткий А.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Ханкайская. 2-е изд. Листы К-52-ХП, К-52-ХVIII, м-б 1 : 200000 / ред. Коваленко С.В. Владивосток: Гл. упр. природ. ресурсов и охраны окружающей среды по Прим. краю ФГУП, 2002.
13. Марков Ю.Д. Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 128 с.
14. Отчет о НИР «Оценка перспектив на нефтегазоносности нераспределенных акваторий Дальневосточных морей и их конкретных участков на основе современных технологий сбора, обработки геофизических данных и моделирования нефтегазоносных систем». 2011. ГК № 16.420/2011-ДМНГ-2. С. 100–118.
15. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части осадочного чехла и геоакустическая модель шельфа залива Посыета (Японское море) // *Тихоокеан. геология*. 2013. Т. 32, № 1. С. 65–75.
16. Филатьев В.П. О сочленении континентальных структур Сихотэ-Алиня с глубоководной котловиной Японского моря // *Морские геофизические исследования*: тр. ТОИ ДВНЦ АН СССР. Владивосток, 1975. Т. 8. С. 122–125.
17. Свининников А.И., Ярошук И.О. Геоакустическая модель шельфа Японского моря // *Вестн. ДВО РАН*. 2006. № 3. С. 85–93.
18. 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.
19. Пат. № 171967 РФ, МПК G01V 1/38 Пивоваров А.Н. Автономный регистратор гидрофизических полей / Пивоваров А.Н., Ярошук И.О., Швырев А.Н., Леонтьев А.П.; ТОИ ДВО РАН. № 2017109315/28; заявл. 20.03.2017; опубл. 22.06.2017, Бюл. № 18.
20. Samchenko A.N., Kosheleva A.V., Shvyrev A.N., Pivovarov A.A. Low-frequency hydroacoustic experiments on the shelf using the data of geoaoustic sediment model // *Chinese Physics Letters*. 2014. Vol. 31, is. 12. P. 124–301.
21. Мачевариани М.М., Тютюкин В.В., Шкварников А.П. Импедансный метод расчета характеристик упругих слоисто-неоднородных сред // *Акуст. журн.* 1971. Т. 17, № 1. С. 97–102.
22. Безруков А.В., Приходько В.Ю., Тютюкин В.В. Импедансный метод расчета характеристик нормальных волн в упруго-жидкостных слоисто-неоднородных волноводах // *Акуст. журн.* 1986. № 32 (3). С. 372–373.
23. Чупин В.А., Будрин С.С., Долгих Г.И., Пивоваров А.А., Самченко А.Н., Швырев А.Н., Ярошук И.О. Сезонная зависимость эффективности трансформации гидроакустических волн на границе «вода–дно» // *Подводные исследования и робототехника*. 2015. № 2 (20). С. 35–39.