

УДК 534.6

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В МЕЛКОМ МОРЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ДОННЫХ ОСАДКАХ

А.Н. Самченко, А.Н. Швырев,  
А.А. Пивоваров,  
Р.А. Коротченко

Тихоокеанский океанологический  
институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН<sup>1</sup>

Рассмотрены результаты гидроакустических экспериментов с использованием низкочастотных излучателей (26 и 33 Гц), проведенных в 2010 г. в заливе Посьета Японского моря. Гидроакустические эксперименты проводились на акватории, где ранее были получены сведения о геологической обстановке в верхнем осадочном слое. Показан пример влияния неоднородных включений в донных отложениях на распространение акустического сигнала.

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективными и интенсивно развивающимися методами исследования динамических процессов и неоднородностей в мелководной среде стали акустические и сейсмоакустические. Причина этого в большей степени связана с быстрым развитием технических средств, вычислительной техники и методов математической обработки. Использование низкочастотных звуковых волн (ниже 1 кГц) сделало возможным проведение комплексных исследований больших морских акваторий в непрерывном режиме. Сейсмоакустический мониторинг позволяет делать заключения о наличии тех или иных неоднородностей в водной среде, а также фиксировать различные динамические процессы в шельфовой океанической зоне.

С точки зрения волновой акустики формирование зву-

кового поля в зоне океанского шельфа определяется волноводом – поверхностью моря и поглощающим дном. Каждый конкретный волновод имеет множество специфических свойств и факторов, которые определяют некоторый набор закономерностей распространения звука в нем. Преобладающими факторами являются распределение по глубине скорости звука и геоакустические свойства дна. Все другие, например случайные неоднородности и морские течения, оказывают на звуковое поле существенно меньшее влияние. Таким образом, бессмысленно проводить какие-либо экспериментальные и теоретические акустические исследования до тех пор, пока не определены основополагающие факторы мелководной зоны. Обобщение, а также качественное и количественное описание последних находит свое выражение в такой научной категории, как геоакустическая модель дна. Основное место в формировании модели зани-

мают экспериментально измеренные, экстраполированные и предсказанные количественные значения тех параметров дна, которые представляют интерес для подводной гидроакустики, например скорость распространения звуковых волн в осадках, структура и мощность осадочных слоев, их плотность и т.п.

В общепринятом понимании геоакустическая модель описывает: слой воды, осадочную толщу, состоящую из рыхлых и консолидированных осадочных отложений, твердый фундамент [9]. Она имеет два уровня представления – качественный, описательный, и количественный, в котором все характеристики формализуются в виде пространственно-временных зависимостей, например, скорость звука в осадках представляется как функция координат глубины и места. Оба уровня диалектически связаны между собой. Знание качественного геологического состава осадков позволяет делать заключения о количественных значениях па-

<sup>1</sup> 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43, тел.: (423) 2312617, e-mail: samchenko@poi.dvo.ru

раметров модели. И, наоборот, полученные акустическими или сейсмическими методами количественные значения параметров модели могут вносить свои коррективы в понимание процессов геологического формирования морского дна.

### ■ Экспериментальные работы

Данная статья посвящена обсуждению результатов низкочастотных гидроакустических экспериментов, проведенных на шельфе Японского моря в 2010 г. Экспериментальные гидроакустические исследования проводились как на стационарной акустической трассе, выделенной по геофизическим данным [7], так и в различных направлениях от приемной антенны (рис. 1). Излучение осуществлялось с помощью низкочастотного преобразователя электромагнитного типа, погружаемого в точки излучения на глубину 10 м и развивающего эффективное звуковое давление до 1 кПа в полосе частот 25–40 Гц [1]. Прием велся на автономную восьмиэлементную вертикальную антенну [2], нижний гидрофон которой располагался в 2 м от дна, а расстояние между гидрофонами составляло 4.5 м. Частота дискретизации регистрируемых сигналов составляла от 700 до 1024 Гц. Излучались сигналы с несущей частотой 26 и 33 Гц, фазоманипулированные M-последовательностями длиной 63, 127, 255 и 511 символов, с 4–10 периодами несущей частоты на символ. Конструктивные особенности излучателя обеспечивали существенный уровень излучения третьей гармоники (78 и 99 Гц соответственно), также являющийся фазоманипулированным. Экспериментальные гидроаку-

стические исследования с применением низкочастотных излучателей показали свою эффективность при изучении распространения акустического сигнала в осадочном слое, а также его поведения на границах раздела [8].

Распространение низкочастотного звука в донных осадках не имеет аналитического решения, в сейсмоакустических исследованиях используют только геометрию распространения сигнала. Схема гидроакустических экспериментов (рис. 1) с

применением низкочастотных излучателей дает возможность исследовать поверхностные волны, приходящие по границе разделов: донные осадки – вода и рыхлые отложения – консолидированные осадки. Ранее нами уже были получены некоторые оценки по глубине распространения в полосе частот 25–100 Гц сигнала [7], принятого на расстояниях 2–20 км от источника. Принятые и обработанные сигналы несут в себе информацию о том волноводе, через который они прошли. Ре-

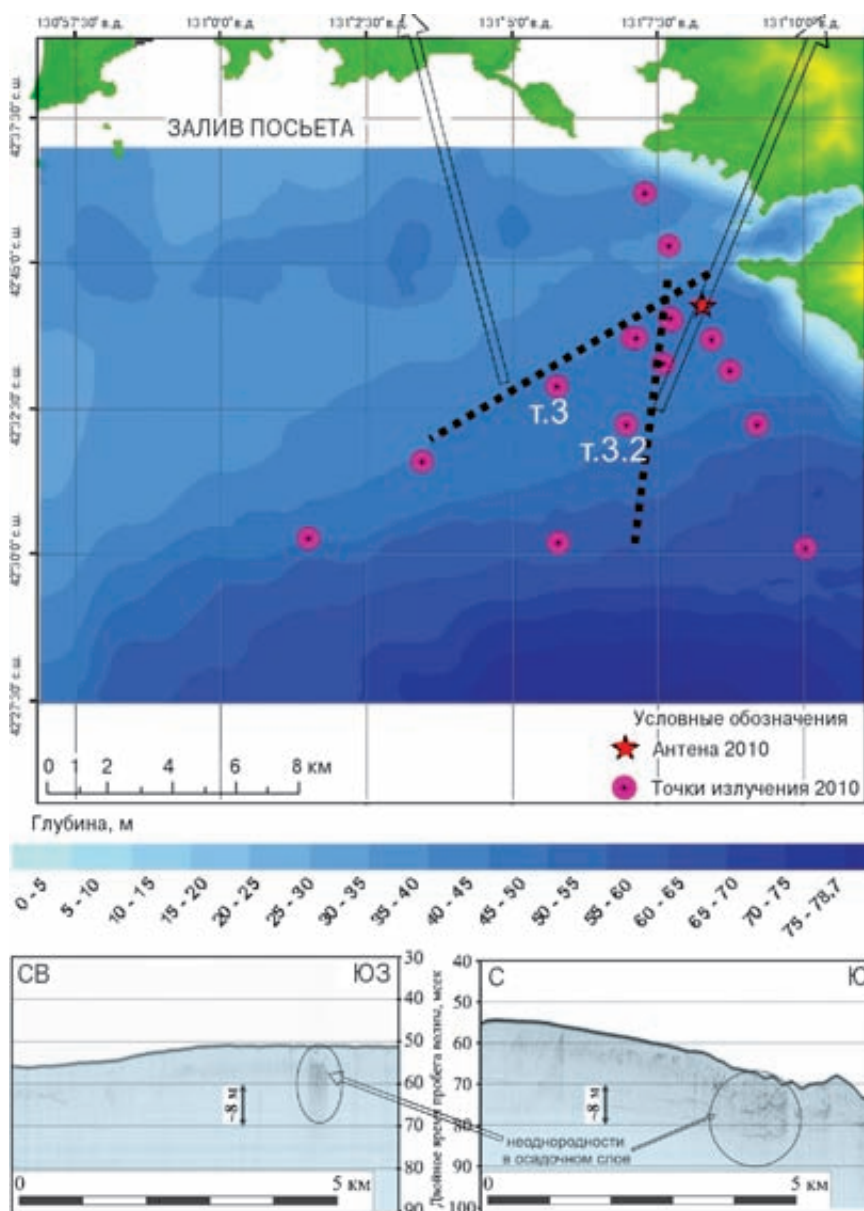


Рис. 1. Схема гидроакустических исследований, проведенных в 2010 г.: показаны две части разреза сеймопрофиля НСП в заливе Посьета Японского моря

зультаты низкочастотных гидроакустических экспериментов были проанализированы и получены некоторые оценки параметров геоакустической модели, толщина слоев донных отложений и приблизительные продольные скорости звука в осадочных слоях и фундаменте. Также с помощью гидроакустических исследований могут быть обнаружены неоднородности в донных осадках, размер которых превышает длину волны излучаемого сигнала.

Для решения задач обнаружения погруженных объектов с другими акустическими характеристиками по отношению к вмещающим породам необходимо исследовать на уже известных трассах, где донные осадки представляют собой однородный слой, например стационарная гидроакустическая трасса м. Шульца – о-в Фуругельма [8], и на гидроакустической трассе, где обнаружены неоднородности в верхнем слое донных осадков по данным непрерывного сейсмического профилирования (НСП) (рис. 1) [6]. На сейсмических профилях НСП показаны примеры выделения неоднородностей в осадочном слое, на профиле СВ-ЮЗ неоднородность небольшая по размерам и представляет собой линзу мелкозернистого песка в диаметре 200–300 м. На сейсмическом профиле НСП С-Ю (рис. 1) выделена область мелкозернистого песка шириной около 1 км, вытянувшаяся вдоль 45-й изобаты на несколько километров. По данным литологического опробования на акватории, где проводились гидроакустические исследования, преобладает фракция среднезернистых песков в верхнем слое донных осадков [3, 6]. Скорость звука для среднезернистых песков в среднем выше, чем для мелкозернистых, при-

мерно на 150 м/с (справочные данные).

### Обсуждение результатов

На рисунках 2, 3 показаны результаты гидроакустических экспериментальных исследо-

ваний при постановке судна в точках 3 и 3.2 (рис. 1). На корреляционных функциях ноль временной шкалы соответствует времени прихода третьей гармоники.

Звуковые волны, формирующие главный максимум

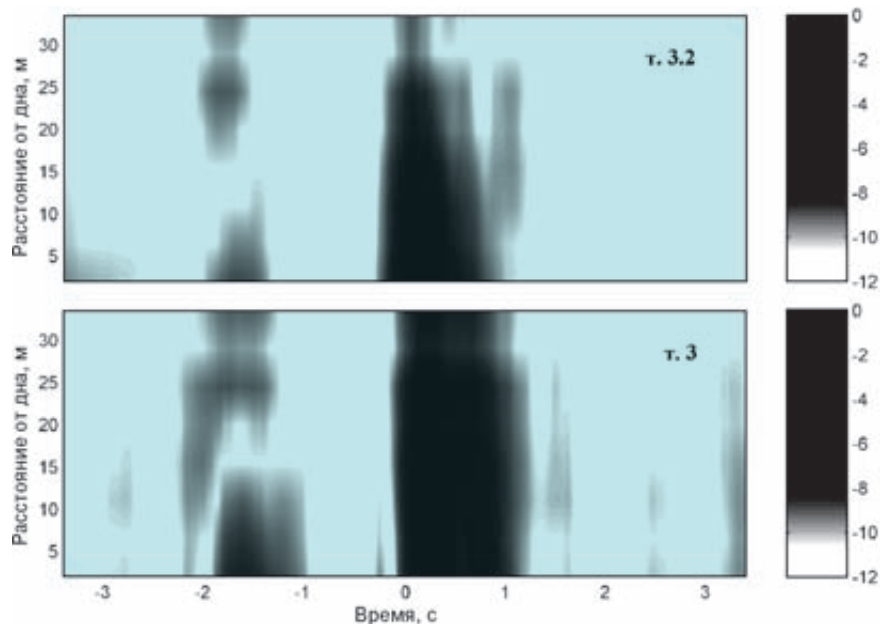


Рис. 2. Корреляционная функция гидроакустического сигнала, излученного в точках 3 и 3.2 (рис. 1), принятая на всех датчиках приемной антенны

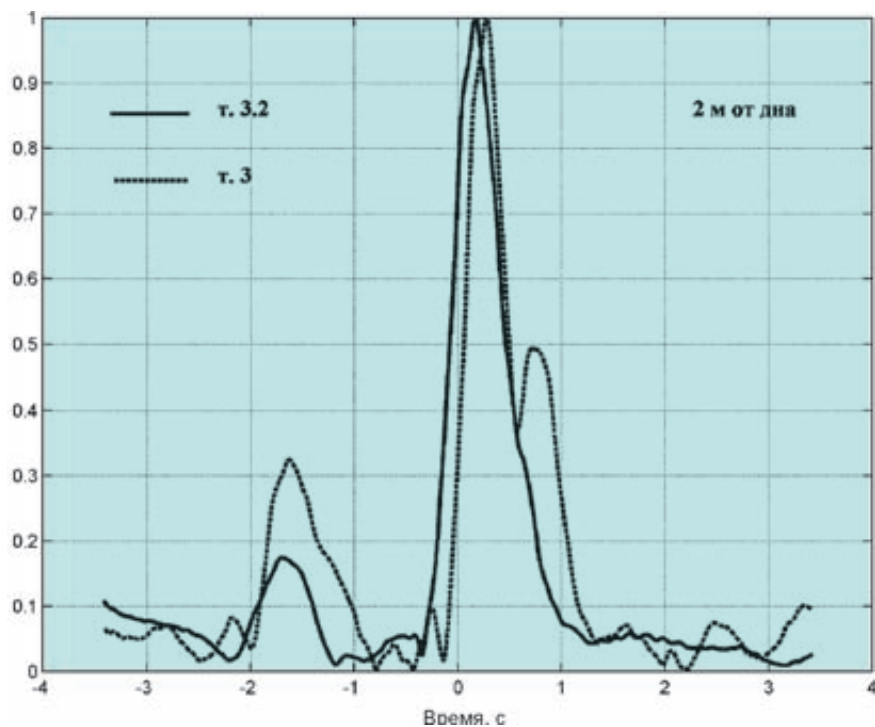


Рис. 3. Корреляционная функция гидроакустического сигнала, излученного в точках 3 и 3.2 (рис. 1), принятая на нижнем датчике приемной антенны

корреляционных функций, распространяются с групповой скоростью «водных» мод (условно 1500 м/с), но проникают в осадочные слои до самого фундамента, поэтому положение и ширина главного максимума несут информацию о мощности осадочных слоев. Неоднородности в осадочном слое, скорее всего, меняют форму главного максимума. Так, главный максимум излученного гидроакустического сигнала из точки З имеет одинаковую форму на всех датчиках приемной антенны (рис. 2), поскольку осадочный слой на гидроакустической трассе от приемной антенны до точки излучения З имеет условно однородную структуру. Выделенная по данным НСП линза мелкозернистых песков на трассе имеет небольшие размеры, которые несущественно влияют на распространение акустического сигнала. Главный максимум принятого сигнала с точки излучения З.2 на датчиках приемной антенны

у поверхности воды утончается по сравнению с придонным. По всей видимости, такая особенность распространения гидроакустического сигнала связана с тем, что точка излучения З.2 попадает на участок с мелкозернистыми песками, имеющими меньшую скорость продольных волн по сравнению с вмещающими песками (рис. 1). На рис. 3 показаны корреляционные функции для излученного гидроакустического сигнала, где главные максимумы имеют предвестники, приходящие на 1,8 с раньше, которые, по нашим оценкам, распространяются по граниту, что дает возможность получать информацию о границе осадки – гранитный слой.

Из рис. 4 можно получить следующие параметры геоакустической модели залива Посьета: толщина осадочного чехла около 400 м (из них – около 100 м рыхлых осадков и соответственно 300 м консолидированных), средняя скорость

звука в консолидированных осадках ~ 4 км/с, в фундаменте ~ 6 км/с. Отметим, что эти величины хорошо совпадают с оценками, полученными другими косвенными методами [4, 5] (прямых данных для залива Посьета нет).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предпринята попытка создания методики оценки некоторых важнейших параметров геоакустической модели, а именно толщины осадочных слоев и скорости распространения продольных звуковых волн в консолидированных осадочных породах и фундаменте при помощи измерения параметров низкочастотных фазоманипулированных сигналов, излучаемых в воду и регистрируемых гидрофонами на различных дистанциях от точки излучения. Показан также пример воздействия неоднородностей в осадочной толще на распространение низкочастотного акустического сигнала. Выработаны критерии обнаружения неоднородностей в донных отложениях по форме принятого акустического сигнала в случае, когда неизвестно строение осадков.

Результатом настоящей работы является приближение к решению задачи геоакустической инверсии, позволяющее на качественном уровне проследить зависимость распространения гидроакустического сигнала от геологических структур. Основные направления дальнейших исследований – разработка математических моделей распространения нестационарных низкочастотных звуковых полей в неоднородных неоднородных средах, а также проведение соответствующих натуральных и численных экспериментов.

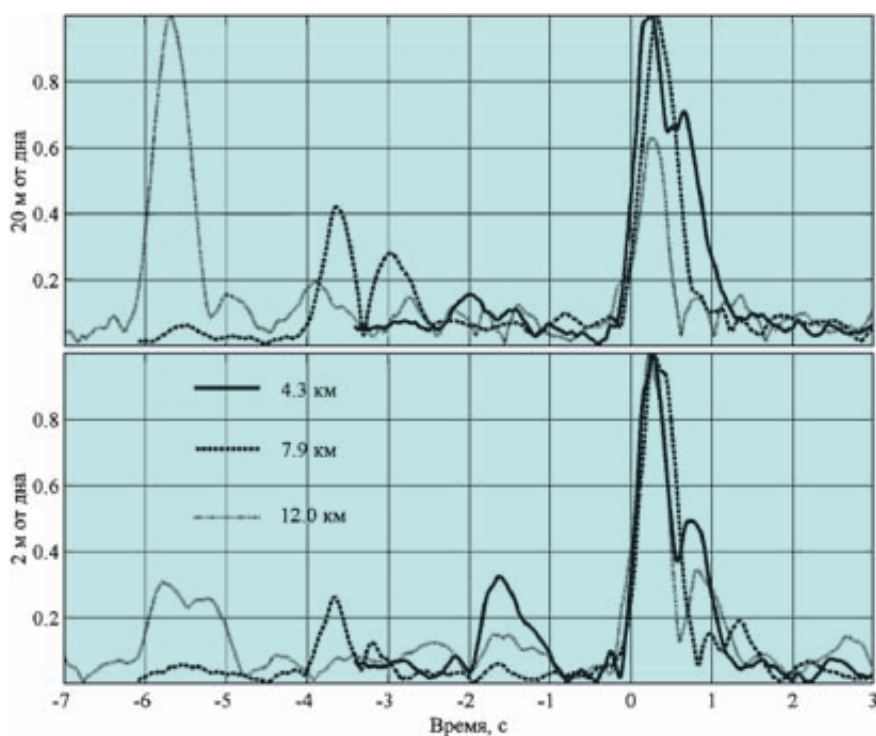


Рис. 4. Пример регистрируемых корреляционных функций

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долгих Г.И., Ярощук И.О., Пенкин С.И., Швырев А.Н. Низкочастотная широкополосная гидроакустическая излучающая система // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 5. С. 163–164.
2. Ковзель Д.Г. Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная вертикальная акустико-гидрофизическая измерительная система «Молюск-07» // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 138–142.
3. Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др. Структура осадков и фаций Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 286 с.
4. Марков Ю.Д. Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 128 с.
5. Медведев С.Н., Прокудин В.Г. Реализация метода отраженных волн при сейсмоакустических исследованиях в мелком море // Шестой Всероссийский симпозиум «Физика геосфер»: мат-лы докл. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 98–101.
6. Самченко А.Н., Карнаух В.Н., Аксентов К.И. Геолого-геофизические исследования верхней части донных отложений залива Посыета (Японское море) // Шестой Всероссийский симпозиум «Физика геосфер»: материалы докл. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 310–313
7. Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Ярощук И.О. Исследования низкочастотных акустических сигналов в шельфовой зоне японского моря с учетом геоакустической модели // XX сессия Российского Акустического Общества, 27–31 октября 2008 г.: сб. тр. Т. 2. М.: ГЕОС, 2008. С. 350–353
8. Самченко А.Н., Пивоваров А.А., Швырев А.Н., Мартынов М.Ю. Выбор оптимальной гидроакустической трассы по геолого-геофизическим данным // XII научная школа-семинар им. акад. Л.М. Бреховских «Акустика океана»: материалы докл. М.: ГЕОС, 2009. С. 296–299.
9. Hamilton E.L. Geoaoustic modeling of the sea floor // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 68. P. 1313–1340.

