# ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОДВОДНОГО НИЗКОЧАСТОТНОГО ЗВУКА ЧЕРЕЗ МАТЕРИКОВЫЙ БАРЬЕР

### В.А. Щуров, С.Г. Щеглов, А.В. Буренин, Е.С. Ткаченко

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

Обнаружены и исследованы подводный и донный низкочастотные акустические сигналы (400 Гц) от подводного источника излучения, расположенного относительно приемной системы по другую сторону перешейка мыса Шульца. Приемная система состояла из трехкомпонентного донного геофона и приемной акустической комбинированной системы, расположенной в толще волновода на глубине 9 м. Кратчайшее расстояние между источником и приемником через материковый барьер составляет ~ 1000 м. Азимутальный угол прихода сигнала продольных волн совпадает с геометрической линией, соединяющей источник и приемник. Прием поперечной и продольной волн осуществляется по различным ортогональным осям координат геофона. Направление прихода продольной волны в точку измерения близко к горизонтальному. Наличие поперечной волны в донном грунте позволяет предположить, что дно волновода представляет собой твердую жесткую поверхность.

## введение

В данной экспериментальной работе исследуется эффект прохождения подводного низкочастотного звука, излученного в волноводе мелкого моря, через материковый барьер шириной более 400 м. Сигналы, прошедшие через твердую среду, регистрировались также в условиях волновода мелкого моря. Одновременно регистрировались акустические сигналы в водной среде и колебания донного слоя. В водной среде волновода сигналы принимались комбинированной акустической системой [1]. Колебания донного слоя, вызванные прохождением сигнала, регистрировались с помощью трехкомпонентного геофона, помещенного в песчаный грунт на глубину 30 см. Геофон имеет три ортогональных пьезокерамических датчика (оси), измеряющие ускорение частиц среды, в которую он помещен.

Акустические свойства морского дна, в особенности мелкого моря, являются одной из основных проблем в современной гидроакустике. Дальность распространения в мелком море, рассеяние и поглощение звука – все эти характеристики зависят от физико-механических свойств дна. Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с физико-механическими, геологическими свойствами донных осадков, их структурой (размеры зерен, пористость, плотность и т.д.) достаточно подробно описаны в [2, 3].

Переход акустической энергии низких частот через границу вода-дно и обратно хорошо известен в сейсмоакустике [4]. Механизм трансформации продольных волн в поперечные волны следует из принципа Гюйгенса. Согласно данному принципу фронт продольной водной волны, достигая твердого дна, является источником волн (в том числе и поперечных) в твердой среде и обратно. Область, в которой происходит трансформация волн, очевидно, должна быть сравнима с длиной волны. Экспериментально она не установлена.

Взаимодействие акустических волн, излученных в водной среде в виде фазоманипулированного сигнала и принятых лазерным деформографом на суше представлено в [5]. По разности времен прихода сигналов, после автокорреляционной свертки сигнала и его копии, оценивались состав и структура верхнего слоя земной коры, наиболее вероятные пути распространения каждого прихода сигнала. Продольная акустическая низкочастотная волна из волновода мелкого моря, проникая в область твердой среды,

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 231-14-00. E-mail: shchurov@poi.dvo.ru

трансформируется в материковой структуре в различные типы волн. Механизм распространения акустических колебаний в твердой среде и на границе сред с различными физико-механическими параметрами различен. Поверхностные волны Релея, Стонели, Шолте и т.д., т.е. волны, распространяющиеся в придонном слое воды и слое твердой поверхности дна, могут вносить значительный вклад в звуковое поле волновода, в особенности в области низких частот. В работах [6, 7] на основе теоретического анализа данных векторно-фазовых натурных измерений в области инфразвуковых частот проведена оценка характеристик акустического поля в волноводе мелкого моря, показана доминирующая роль поверхностных волн в формировании акустического поля в волноводе со скалистым грунтом. В большинстве работ по исследованию особенностей формирования звукового поля вблизи дна мелкого моря используются в основном гидрофоны или короткие вертикальные антенны, источники звука располагаются в водной толще или на дне. Следует отметить работу, в которой исследуется проход звука от импульсного пневмоисточника через перешеек мыса Шульца [8].

Ширина перешейка в проведенном эксперименте составляла 590 м. Излучение и прием сигналов производились в водной среде, т.е. исследовались только продольные волны.

Материковый барьер, в сущности, не препятствует переносу энергии от источника к приемнику, он приводит к многократной трансформации продольных и поперечных волн, образованию поверхностных волн [4, 5]. Исследование этого явления возможно только при полном описании акустического поля [9].

В данной работе предпринята попытка исследовать векторные характеристики акустического поля в водной среде и в твердом слое донных осадков, установить непосредственную связь этих полей после прохождения звука через материковый барьер.

#### 1. Техника эксперимента

На рис. 1 приведена схема постановки комбинированной приемной акустической системы и трехкомпонентного геофона. Комбинированная приемная система измеряет акустическое давление p(t) и три



Рис. 1. Комбинированный приемник (а); трехкомпонентный геофон (б); схема постановки приемной системы (в): 1 – плавучесть; 2 – приемный акустический модуль; 3 – груз; 4 – трехкомпонентный геофон; 5 – гермоконтейнер; 6 – груз; 7 – кабельная линия; 8 – здание лаборатории на МЭС «Мыс. Шульца». В верхней части рисунка изображены комбинированный приемник и геофон

ортогональные компоненты вектора колебательной скорости  $\vec{V}(t) \{V_x, V_y, V_z\}$ . Оси координат обозначались как  $p, x_1, y_1, z_1$ . Геофон представляет собой полую металлическую сферу с находящимися внутри тремя ортогональными акселерометрами. Диаметр сферы – 20 см. Рабочий диапазон частот приемной системы 10–1000 Гц. Средняя плотность геофона равна 1,95 г/см<sup>3</sup>. Геофон был помещен в песчаный донный слой на глубину 30 см. Направление осей координат геофона:  $x_2, y_2$  лежат в горизонтальной плоскости, ось  $z_2$  направлена вертикально вверх.

На рис. 2 приведена карта расположения излучателей  $U_1$ ,  $U_2$  и приемной системы П. На врезке представлена ориентация координат геофона. Излучатель расположен на акватории залива Петра Великого, приемник – в бух. Витязь. Центр излучателя расположен на расстоянии 1,5 м от дна, глубина места постановки равна 35 м. Дно ровное, песчано-галечное. Береговая черта в т. Б<sub>1</sub> имеет вертикальную скалистую структуру до глубины ~ 25 м, в т. Б<sub>2</sub> – пологий песчаный склон до т. П. Глубина места в т. П составляет 18 м. Расстояние:  $U_1$ Б<sub>1</sub> = 300 м, Б<sub>1</sub>Б<sub>2</sub> = 420 м, Б<sub>2</sub>П = 280 м, общее расстояние  $U_1$ П = 1000 м. Акустический сигнал, излучаемый из точки  $U_1$ , может попасть в точку П двумя путями: по прямой  $U_1$ П или дифракционным путем, огибая мыс Шульца.

На рис. 2 возможное перемещение дифракционной волны изображено пунктиром. Из геометрии рис. 2 следует, что расстояние, которое должна пройти дифракционная волна из т. И, в т. П, должно быть ~1500 м. Приемные системы, используемые в эксперименте, однозначно определят путь реального движения акустической энергии в точку измерения [1, 9]. Последующий анализ показал, что излученный акустический сигнал прошел по кратчайшему пути, т.е. по линии И,П. Расположение горизонтальных осей  $x_2, y_2$  относительно векторов  $\vec{\mathbf{M}}_1$  и  $\vec{\mathbf{M}}_2$  смотрите на врезке рис. 2. Направления осей геофона и комбинированного приемника в горизонтальной плоскости определены по излучению контрольного акустического источника И,, расположенного в бух. Витязь на глубине 10 м, на расстоянии, равном 200 м от приемной системы. По излучению И, (частота 400 Гц) определялись направления ортогональных осей  $x_1, y_1,$  $x_2, y_2, z_3$ . Ортогональные оси векторного приемника обозначены как  $x_1, y_1, z_1$ , оси геофона –  $x_2, y_2, z_2$ . В результате эксперимента выяснилось: ось x<sub>1</sub> составляет с вектором угол 45° (на рис. 2 оси комбинированного приемника не показаны); ось x<sub>2</sub> геофона составляет с вектором угол  $\beta \sim 10^\circ$ ; ось  $y_2$  перпендикулярна  $x_2$ . Ось геофона направлена вертикально вверх. Ось x<sub>1</sub> составляет с осью  $x_2$  угол ~ 35°.



*Puc.* 2. Схема размещения излучателей **И**<sub>1</sub>, **И**<sub>2</sub> и приемной системы **П**. Расстояние между ними по прямой ~1000 м. Расстояние **ИБ**<sub>1</sub> = 300 м, **Б**<sub>1</sub>**Б**<sub>2</sub> = 420 м, **Б**<sub>2</sub>**П** = 280 м. **И**<sub>2</sub> – контрольный излучатель. Расстояние **И**<sub>2</sub>**П** = 200 м. *α* – угол между направлениями **И**<sub>1</sub> и **И**<sub>2</sub>, *β* – угол между направлением излучения **И**<sub>4</sub> и осью *х*<sub>2</sub>, **Л** – помещение лаборатории

| L, символы | F <sub>0</sub> , Гц | <b>2</b> Δ <b>F</b> , Гц | N, период | Т, с  | ∆ <b>t, мс</b> | $\Delta \mathbf{f}_{s}$ , Гц | Е, Ватт |
|------------|---------------------|--------------------------|-----------|-------|----------------|------------------------------|---------|
| 1023       | 400                 | 200                      | 4         | 10,23 | 10             | 0,0978                       | 5,1211  |
| 127        | 400                 | 20                       | 40        | 12,7  | 100            | 0,0787                       | 6,3580  |
| 63         | 400                 | 10                       | 80        | 12,6  | 200            | 0,0794                       | 6,3080  |

Параметры излучаемых сигналов

В месте постановки приемной системы осадочные слои дна представлены песками различного гранулометрического состава: поверхностный слой песчаный, второй и третий слои состоят из гравийно-галечных отложений. Средние значение скорости продольной волны для осадочного слоя находится в пределах 1557–1810 м/с, скорость поперечных волн – 300–475 м/с [10]. Во время эксперимента скорость ветра составляла не более 1 м/с, поверхностное волнение слабое. Скорость звука у поверхности составляла величину 1520 м/с, на глубине 18 м ~1510 м/с, что характерно для бух. Витязь в это время года.

Поводом для данного исследования являются акустические эффекты, связанные с проходом фазоманипулированного сигнала через материковый барьер перешейка мыса Шульца. Источником излучения является широкополосный пьезокерамический излучатель [11]. Параметры излучаемых сигналов приведены в таблице.

L – длина М-последовательности, определяется количеством символов;  $F_o$  – несущая частота; N – количество периодов несущей частоты на символ;  $T = (L*N) / F_o$  – длительность;  $\Delta F = F_o / C$  – частотная полоса;  $\Delta \tau = 1 / \Delta F$  – «ширина» пика автокорреляции, разрешение по времени половина от этой величины;  $\Delta f_s = 1 / T$  – разрешение по частоте;  $E = (1 / Fs) \sum x_i^2$  – энергия сигнала. Временные интервалы между импульсами равны 300 с.

### 2. Анализ экспериментальных данных

Анализ экспериментальных данных основан на измерении семи компонент поля: четырех акустических  $p(t), V_{x_1}(t), V_{y_1}(t), V_{y_1}(t), V_{z_1}(t)$  – акустического давления и трех компонент акустической колебательной скорости частиц среды; трех компонент колебательного ускорения частиц осадочного слоя дна  $\xi_{x_2}(t), \xi_{y_2}(t), \xi_{z_2}(t)$ , из которых были получены компоненты колебательной скорости частиц среды

грунта  $V_{x_2}(t), V_{y_2}(t), V_{z_2}(t)$ . Набор перечисленных величин достаточен для полного описания акустического поля [9].

На рис. 3 приведены частотные спектры одной из реализаций, принятых 13.09.2019 г. Усредненный по семи импульсам спектр имеет сплошной пьедестал от 100 Гц до 500 Гц с тремя спектральными линиями на частотах 112, 212 и 400 Гц. Сплошная часть спектра мощности акустического давления  $S_{p^2}(f)$ превышает акустический шум на ~5 дБ, спектральные линии превышает его на 5-10 дБ (рис. 3, а). Спектры  $V_{x_1}^2(t), V_{y_1}^2(t)$  не приводятся, поскольку они аналогичны  $S_{p^2}(f)$ . Канал  $z_1(t)$  «вышел из строя» во время эксперимента. Спектры мощности колебательной скорости частиц донной среды, зафиксированные геофоном, подобны спектру акустического давления (рис. 3, б). Максимального уровеня достигает у-компонента колебательной скорости  $V_{y_2}^2$  на всех трех частотах. На частоте 400 Гц превышение  $V_{\nu_2}^2 \sim 12$  дБ.

В данной работе представлены исследования сигнала в полосе частот  $\Delta f = 395-405$  Гц, средняя частота 400 Гц, длина волны 3,8 м при скорости звука 1510 м/с.

На рис. 4 приведены: мощность акустического давления  $p^2(t)$  и мощности трех ортогональных компонент колебательной скорости частиц донного грунта, принятые геофоном:  $V_{x_2}^2(t)$ ,  $V_{y_2}^2(t)$ ,  $V_{z_2}^2(t)$ . Временные интервалы между импульсами рав-

Временные интервалы между импульсами равны 300 с, что согласуется с таблицей. Превышение S/N для  $p^2(t) \sim 10-12$  дБ,  $V_{x_2}^2(t) \sim 8$  дБ,  $V_{y_2}^2(t) \sim 12$  дБ,  $V_{z_2}^2(t) \sim 7$  дБ. Уровни шумов для всех каналов геофона совпадают с точностью до ~1 дБ, что указывает на хорошее «сцепление» геофона с грунтом и может служить доказательством однородности песчаного донного слоя в месте установки геофона, как это подтверждается видеосъемкой дна.



*Рис.* 3. Спектры мощности принятых сигналов: а – акустическое давление  $p^2(f)$ ; (комбинированный приемник): б – компоненты геофона:  $V_{x_2}^2(f)$  – синяя линия,  $V_{y_2}^2(f)$  – красная линия,  $V_{z_2}^2(f)$  – зеленая линия. Время накопления 10 с. Усреднение проведено по семи импульсам. Уровень децибел выбран произвольно



*Рис. 4.* Временная реализация из семи импульсов: *а* – акустическое давление  $p^2(t)$ ; *б* – компоненты колебательной скорости  $V_{x_2}^2(t)$ ,  $V_{y_2}^2(t)$ ,  $V_{z_2}^2(t)$ . Время усреднения 10 с. Уровень децибел выбран произвольно

На рис. 2 показана ориентация осей геофона относительно вектора  $\vec{\mathbf{M}}_1$ , определенная по акустическому излучению контрольного излучателя  $\mathbf{M}_2$  на тональной частоте 400 Гц. Из рисунка следует, что ось  $x_2$  составляет с направлением  $\vec{\mathbf{M}}_1$  угол ~ 10°, следовательно, ось  $y_2$  с направлением  $\vec{\mathbf{M}}_1$  составляет угол ~ 80°.

Из рис. 4 следует, что уровень сигнала  $V_{y_2}^2(t)$  превышает на 4–5 дБ по сравнению с  $V_{x_2}^2(t)$ . Это возможно только в случае, если по осям  $x_2$  и  $y_2$  регистрируются различные типы волн. Поскольку характеристика направленности каналов геофона косинусная и соз  $100^\circ = 0.98$ , соз  $80^\circ = 0.17$ , то с определенной степенью точности можно считать, что ось  $x_2$  регистрируют только продольную волну от источника, прошедшую барьер. Ось  $y_2$  способна регистрировать поперечную волну, возникшую в результате трансформации продольной волны. Аномальное значение уровня сигнала  $V_{y_2}^2(t)$ , скорее всего, скрыто в механизме трансформации продольной волны

при переходе через барьер и в свойствах донного грунта. В [4] также указывается на аномальную величину поперечной волны при ее трансформации из продольной волны. Возможно, что осадки обладают сдвиговой жидкостью, в которой могут распространяться поперечные волны [2, 3].

Отсюда следует, что акустическая энергия, пришедшая через твердую среду от источника излучения в точку нахождения геофона, представляет собой сумму энергий продольной и поперечной волн.

На рис. 5 представлены угловые характеристики продольных волн: азимутальные углы  $\psi(t)$  для геофона и комбинированного приемника (рис. 5, *a*); полярного угла  $\theta(t)$  для геофона (рис. 5, *б*).

Акустический комбинированный приемник устойчиво регистрирует импульсный сигнал по каналам р,  $x_1$  и  $y_1$ . Система координат  $x_10y_1$  развернута относительно  $x_20y_2$  на угол  $\approx 40^\circ$ . Из рис. 5, *а* следует, что направления распространения продольной волны относительно осей  $x_1$  и  $x_2$  в пределах точности эксперимента составляют соответственно  $\sim 40^\circ$  и  $\sim 10^\circ$ .



Рис. 5. Угловые характеристики направленности движения энергии манипулированного сигнала в придонном слое и волноводе: *a* – азимутальный угол *ψ(t)* (красная линия – геофон, черная – комбинированный приемник); *б* – полярный угол *θ*<sub>2</sub>(*t*) прихода донной продольной волны (геофон). Частота – 400 Гц. Усреднение – 10 с

Угол между осями  $x_1$  и  $x_2$  составляет ~ 35°, следовательно, направления продольных волн в волноводе и грунте в пределах точности эксперимента совпадают.

При  $\theta(t) \approx 80^{\circ} - 85^{\circ}$  энергия продольной волны приходит в точку измерения под углом ~ 5°-10° к горизонту из донного слоя в акустический волновод (рис. 5,  $\delta$ ). Поскольку канал  $z_1$  вышел «из строя», вычислить угол  $\theta_1$  не представляется возможным. Угол  $\theta_2$ отсчитывается от положительного направления оси  $z_2$ , которая направлена вертикально вверх. Уровень сигнала по оси  $y_2$  значительно превышает уровень по оси  $x_2$  (рис. 4). Поскольку ось  $y_2$  практически перпендикулярна к направлению излучения  $\vec{\mathbf{M}}_1$  и продольной компонентой  $V_{y_2}(t)$  по оси  $y_2$  можно пренебречь, возникает предположение, что по оси  $y_2$  зарегистрирована поперечная волна, выходящая из донного слоя.

Таким образом, в горизонтальной плоскости направленные свойства акустического поля продольных волн полностью согласованы в двух средах – жидкой и твердой. К сожалению, поскольку нет данных по каналу *z*, мы не можем определить полярный угол  $\theta_1$ в воде. Естественно, согласно закону преломления, он должен отличаться от угла  $\theta_2$ , т.е.  $\theta_1 < \theta_2$  и выходящий луч должен быть ближе к вертикальной оси *z*<sub>1</sub>.

В вертикальной плоскости  $x_20z_2$  мы имеем две компоненты  $V_{x_2}^2(t)$  и  $V_{z_2}^2(t)$ , возможно предположить, что это компоненты плоской волны Стонели [12], бегущей по границе вода–грунт. В этом случае вертикальная компонента должна быть больше горизонтальной, т.е.  $V_{z_2}^2(t) > V_{x_2}^2(t)$ . Однако  $V_{x_2}^2(t) > V_{z_2}^2(t)$  на ~ 2–3 дБ (рис. 4). Кроме того, в волноводе на высоте 9 м регистрируется комбинированным приемником акустическая волна того же направления. Присутствие поверхностной волны Стонели по оси  $x_2$  и поперечной волны по оси  $y_2$  есть признаки того, что в этом случае поверхностный слой дна должен быть твердым и жестким.

Для выяснения структуры акустического поля в воде и донном слое использовался автокорреляционный метод. На рис. 6–9 приведены свертки зарегистрированных сигналов с их репликой (копией сигнала) [13]. Согласно таблице импульс состоит из трех посылок различной временной длительности *L*. Корреляционные характеристики первой посылки при длине М-последовательности L = 1023 с разрешающей способностью по временному сдвигу  $\tau = 10$  мс представлены на рис. 6. Посылка М-последовательности при L = 1023 содержит 1023 символа, один символ содержит четыре периода несущей частоты 400 Гц. Длительность первой посылки ~ 10 с. Автокорреляция компонент  $p(\tau), V_{x_1}(\tau), V_{y_1}(\tau), V_{x_2}(\tau), V_{z_2}(\tau)$ 

42 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2020. № 3 (33)

при временной задержке  $\tau$  до 0,2 с имеет корреляционные пики различной величины и длительности, которые соответствуют лучевым приходам сигнала, прошедшего через материковый барьер (рис. 6, *a*, *б*, *в*, *г*, е).

Акустическое давление p(t) и горизонтальные компоненты колебательной скорости  $V_{x_1}(t)$ ,  $V_{y_1}(t)$ ,  $V_{x_2}(t)$ соответствуют продольным колебаниям в воде и грунте. Компоненты  $V_{y_2}(t)$  и  $V_{z_2}(t)$  могут соответствовать поперечным колебаниям грунта. Как следует из рис. 5, энергия продольной волны сигнала течет в плоскости  $x_20z_2$  под небольшим углом к горизонту. Поскольку автокорреляционные колебания по  $z_2$ (рис. 6, е) согласованы во времени с кривыми А, Б, Г, то характер колебаний в вертикальной плоскости обусловлен в основном продольными колебаниями, что согласуется с [4].

Автокорреляции  $V_{y_2}(\tau)$  на рис. 6,  $\partial$  при временном сдвиге от 1,4 до 1,7 с отличны от нуля только в малой окрестности  $\tau = 1,6$  с. Следует отметить, что этот пик присутствует и в компонентах  $x_2, z_2$ . Автокорреляция  $V_{y_1}(\tau)$  на рис. 6, *в* одного порядка с другими каналами в воде и грунте. Отсюда следует, что на каналах *p*,  $x_1, y_1, x_2, z_2$  регистрируются продольные волны, кото-



Рис. 6. Автокоррелограммы акустического давления и компонент колебательной скорости: a - p(t);  $b - V_{x_1}(\tau)$ ;  $e - V_{y_1}(\tau)$ ;  $e - V_{x_2}(\tau)$ ;  $d - V_{y_2}(\tau)$ ;  $e - V_{z_2}(\tau)$ ; l = 1023, разрешающая способность по временному сдвигу т = 10 мс

рые приходят в точки измерения с согласованными задержками во времени. Отсутствие корреляции по каналу  $y_2$  можно объяснить тем, что поперечная волна не успела прийти к данному моменту времени в точку измерения П, поскольку ее скорость значительно меньше продольной волны.

Из рис. 6,  $\partial$  следует, что поперечная волна, распространяющаяся в грунте, имеет горизонтальную поляризацию. Необходимо учесть, поскольку угол между вектором  $\vec{\mathbf{M}}_1$  и осью  $y_2$  составляет ~85°, то незначительная часть энергии продольной волны («следы») должна быть зафиксирована на рис. 6, 7. Наглядная картина прихода отдельных рефракционных лучей представлена на сонограммах автокорреляции (рис. 7).

Приходы водных лучей (рис. 7, *a*, *б*, *в*) одновременны. Возможно разделить наиболее яркие восемь приходов за время сдвига  $\tau \sim 0.2$  с. Если взять условно за среднюю скорость звука ~1600 м/с (см. табл. 3 [14]), то пути первого рефрагированного луча и последнего отличаются на ~320 м. При геометрической длине пути между точками И<sub>1</sub> и П, равный ~1000 м,

это составляет величины ~1/3. Лучи, приходящие на геофон, по времени прихода отличаются от водных лучей (рис. 7, г, е), в особенности по оси z<sub>2</sub>. Время между первым и последним приходами равно ~0,34 с. Учитывая, что для этих лучей скорость звука может быть ~ 1800 м/с [10, 14], то разность длин прихода равна ~ 600 м. Простой геометрический расчет показывает, что при И, П = 1000 м (наиболее короткий путь первого луча) и 1600 м длины пути последнего луча максимально возможная глубина достигаемая последним лучом (при средней скорости 1800 м/с), может составлять ~500 м. Надо отметить, что на сонограмме  $V_{y_2}(t)$  видны отдельные «следы» лучей, совпадающих по времени с  $V_{x_0}(t)$ ,  $V_{z_0}(t)$ , вызванные слабым присутствием продольных волн, как это и указывалось ранее.

Автокоррелограммы двух следующих посылок L = 127,  $\Delta t = 100$  мс и L = 63,  $\Delta t = 200$  мс указывают на существование раздельных во времени согласованных приходов энергии по воде и грунту (рис. 8, 9).



*Рис.* 7. Сонограммы автокорреляции рис. 6: a - p(t);  $\delta - V_{x_1}(\tau)$ ;  $e - V_{y_1}(\tau)$ ;  $e - V_{x_2}(\tau)$ ;  $\partial - V_{y_2}(\tau)$ ;  $e - V_{z_2}(\tau)$ ; L = 1023. Разрешающая способность по временному сдвигу равна 10 мс

#### СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



Рис. 9. Автокоррелограммы акустического давления и компонент колебательной скорости: a - p(t);  $b - V_{x_1}(\tau)$ ;  $e - V_{y_1}(\tau)$ ;  $e - V_{x_2}(\tau)$ ;  $d - V_{y_2}(\tau)$ ; d

Поскольку автокорреляция компоненты  $V_{y_2}(t)$  не наблюдается (рис. 6,  $\partial$ ) или незначительна (рис. 8,  $\partial$ , 9,  $\partial$ ), то отсюда следует вывод, что  $V_{y_2}(t)$  есть колебательная скорость поперечной волны, бегущей в донном слое, обладающим сдвиговой упругостью. Следует отметить, что уровень  $V_{y_2}^2$  превышает уровни  $V_{x_2}^2$  и  $V_{z_2}^2$  на 3–4 дБ (рис. 4). Коррелограммы на рис. 8,  $\partial$ , 9,  $\partial$  наблюдаются на фоне большого «разброса» случайного процесса исходных данных, максимум которых может быть вызван незначительным вкла-

дом продольных колебаний по оси  $y_2$ . Из рис. 6,  $\partial$ , 7,  $\partial$ , 8,  $\partial$ , 9,  $\partial$  следует, что поперечная волна и реплика не когерентны.

Разнесение во времени максимумов автокорреляционных колебаний указывает на рефракцию продольных волн в вертикальной плоскости. Задержка прихода сигнала от поперечной волны на ~5 с дает оценку ее скорости распространения ~300–400 м/с при скорости продольной волны в грунте ~1800 м/с [10, 14]. Обнаружение поперечной волны указывает на то, что придонный слой грунта обладает упругим сопротивлением сдвигу. Модель переходного слоя можно представить в виде желе, которое при малом сдвиге ведет себя как упругое твердое тело. Поскольку амплитуда продольных и поперечных смещений в акустической волне не превышает 0,01 мм [1], то такая модель полностью отвечает упругому слою вода–дно при переходе к твердому полупространству. Данная модель может быть применена и к мягкому газонасыщенному дну.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сигналы частотой 400 Гц, прошедшие в акустический волновод мелкого моря через материковый барьер шириной 420 м, зафиксированы в водной среде волновода и его донном грунте. Акустический комплекс, состоящий из комбинированной приемной системы, расположенной в толще волновода, и трехкомпонентного донного геофона, позволяет провести полное исследование в пограничных зонах вода– твердое полупространство.

Особенности наблюдаемого акустического поля:

1. В волноводе и донном грунте направления прихода энергии продольной акустической волны совпадают с геометрической линией, соединяющей источник и приемник. Автокорреляционные характеристики продольной волны в акустическом волноводе и грунте аналогичны. 2. Полярный угол продольной волны в донном грунте находится в пределах  $\theta \sim 80^{\circ} - 85^{\circ}$ , т.е. с горизонтом угол составляет  $5^{\circ} - 10^{\circ}$ .

3. Поперечная волна, зафиксированная у-компонентой трехкомпонентного геофона, имеет горизонтальную поляризацию. Временная задержка прихода поперечной волны относительно продольной составляет ~5 с. Оценка скорости поперечной волны составляет ~300 м/с.

4. Последовательность лучевых приходов есть результат рефракции в вертикальной плоскости в донном слое волновода.

5. Существование поперечной волны, зафиксированной геофоном, находящимся на глубине 30 см, указывает на то, что приповерхностный слой грунта обладает сдвиговой упругостью. При трансформации продольной волны в поперечную волну величина мощности компоненты  $V_{y_2}^2(t)$  должна быть пропорциональна величине сдвиговой упругости среды.

6. На основе вышеописанных свойств донного грунта предлагается модель донного слоя на основе упругих свойств желе. При амплитуде смещений частиц среды в акустической волне ~0,01 мм структура желе полностью удовлетворяет свойствам упругого твердого тела.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке госзадания «Изучение фундаментальных основ возникновения, развития, трансформации и взаимодействия гидроакустических, гидрофизических и геофизических полей Мирового океана». Регистрационный номер: АААА-А20-120021990003-3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Щуров В.А. Векторная акустика океана. Владивосток: Дальнаука, 2003. 307 с.

2. Физика океана / под. ред. А.С. Монина. М.: Наука, 1978. 456 с.

3. Акустика морских осадков / под ред. Л. Хемптона. М.: Мир, 1977. 534 с.

4. Поперечные и обменные волны при глубинных сейсмических исследованиях на акваториях // Труды ВСЕГЕИ. 2019. Т. 360. 155 с.

5. Долгих Г.И., Привалов В.Е. Лазерная физика. Фундаментальные и прикладные исследования. Владивосток: ООО Рея, 2016. 452 с.

6. Касаткин Б.А., Касаткин С.Б. Особенности распространения и интерференции нормальных волн в волноводной системе водный слой – морское дно с низкой сдвиговой упругостью // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 1 (25). С. 46–58.

7. Касаткин Б.А., Злобина Н.В., Касаткин С.Б. Особенности пространственно-частотной структуры звуковых полей, сформированных пограничными волнами Релея– Шолте // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 55–62.

Рутенко А.И., Мануличев Д.С. Распространение низкочастотных волн через мыс Шульца // Акуст. журн. 2014. Т. 60, № 4. С. 384–394.
Щуров В.А. Движение акустической энергии в океане. Владивосток, 2019. 204 с.

10. Самченко А.Н., Ярощук И.О. Акустические параметры рыхлых донных отложений залива Петра Великого (японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 5. С. 130–136.

11. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Войтенко Е.А., Лебедев М.С. Измерительный комплекс для исследования и мониторинга изменчивости морской среды в заливах, бухтах и морских гаванях // Подводные исследования и робототехника. 2014. № 1 (17). С. 68–72.

12. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометиздат, 1982. 264 с.

13. Зверев В.А., Стромков А.А. Выделение сигналов из помех численными методами. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2001. 188 с.

14. Донченко С.Н. Акустические и физико-математические свойства и параметры донных отложений // Гидроакуст. журн. Украина. 2004. № 1. С. 59–69.