

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилов А.М., Тарасов С.П., Пояркова В.А., Новиков Б.К. Работа параметрической антенны в условиях мелкого моря // Прикладная акустика. Таганрог: ТРТИ, 1985. Вып. XI. С. 110–116.
2. Воронин В.А., Тарасов С.П., Тимошенко В.И. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. – 400 с.
3. Кириченко И.А., Раскина М.А. Задача синтеза адаптивных акустических систем. Нелинейная гидроакустика // Труды конференции. – Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2006. – С.40–46.
4. Кравчук Д.А. Куценко А.Н. Экспериментальное исследование модового распространения сигнала в мелком море // XVIII сессия Российского акустического общества. 2006. Т.2. – С.214–217.

Кравчук Денис Александрович

Технологический институт Южного Федерального университета в г. Таганроге

E-mail: denik545@yandex.ru

347928, Россия, г. Таганрог, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44

Тел.: 8(8634) 37-17-91

Kravchuk Denis Aleksandrovich

Taganrog Institute of Technology - Southern Federal University

E-mail: denik545@yandex.ru

44, Nekrasovsky, Taganrog, GSP-17-a, Russia, Ph.: +7 (8634)-37-17-95

УДК 534.23

Б. А. Касаткин, Н. В. Злобина, Л. Г. Стаценко, Д.В. Злобин

**ПРИДОННАЯ ВОЛНА И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
ВЕРХНЕГО СЛОЯ МОРСКОГО ДНА**

На основе обобщенной теории отражения сферической волны от импедансной границы раздела доказано существование пограничного звукового канала и локализованной в нем придонной волны. Определены характеристики придонной волны и оптимальные условия ее возбуждения. Показана возможность использования придонной волны для визуализации верхнего слоя морского дна на определенном горизонте, положение которого определяется возвышением источника излучения над дном.

Нормальная волна; полное внутреннее отражение; обобщенная теория отражения; придонная волна; пограничный звуковой канал.

B.A. Kasatkin, N.V. Zlobina, L.G. Statsenko, D.V. Zlobin

**SUBBOTTOM WAVE AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION FOR
ECOLOGICAL MONITORING THE TOP LAYER OF SEA BOTTOM**

On basis of generalized theory of reflection of spherical wave from impedance interface the existence of boundary sound channel and subbottom wave localizing in it is

proved. Characteristics of subbottom wave and optimal conditions of its excitation are determined. The capability of using of subbottom wave for visualization of seabed top layer on specific horizon, which location is defined by source location above sea bottom, are shown.

Normal wave; total internal reflection; generalized theory of reflection; subbottom wave; boundary sound channel.

Принципиальное значение для возможности исследования верхнего слоя морского дна имеет открытие пограничного звукового канала на границе раздела “вода – морское дно” осадочного типа и придонной волны, затекающей в этот канал. Существование придонной волны непосредственно следует из обобщенной теории полного внутреннего отражения, которая впервые была предложена в работе [1], а более строго изложена в монографии [2].

Обобщенная теория полного внутреннего отражения является математическим и физическим обоснованием гипотезы Ньютона о полном внутреннем отражении. Принципиальное отличие обобщенной теории от классической заключается в том, что само полное описание процессов отражения и преломления при закритических углах падения содержит регулярную и обобщенную составляющие. Регулярная составляющая суммарного решения имеет тот же смысл, что и в классическом решении, а ее амплитуда экспоненциально убывает в донном полупространстве при закритических углах падения. Обобщенная составляющая допускает представление только в классе обобщенных функций с финитной областью определения, а ее амплитуда экспоненциально растет, принимая максимальное значение на горизонте полного внутреннего отражения. Сам горизонт полного внутреннего отражения играет роль каустической границы, ограничивающей область существования обобщенной составляющей (обобщенной придонной волны) снизу. Именно обобщенная придонная волна, соответствующая полюсу коэффициента отражения границы раздела “вода – морское дно” в модельном представлении, реализует гипотезу Ньютона о полном внутреннем отражении и полностью ей соответствует.

Интерференционное взаимодействие обеих сопряженных составляющих приводит к образованию интерференционного минимума в поле отраженных волн с оценкой эффективного коэффициента отражения сферической волны $|V_{сф}|_{\min} = 0,5$ и интерференционного максимума в поле прошедших волн. Формирование окна энергетической прозрачности при закритических углах падения обеспечивает, в свою очередь, затекание энергии звуковой волны в придонный слой на горизонт полного внутреннего отражения в виде обобщенной придонной волны как неоднородной волны пограничного типа.

Существование волн обобщенного типа впервые было подтверждено экспериментально в работе французских акустиков [3] в 1999 г. на примере пограничных волн, у которых амплитуда хотя бы одной составляющей хотя бы в одном из сопряженных полупространств экспоненциально растёт при удалении от границы раздела. Такие волны были обнаружены на границах раздела вода-плексиглас, вода-поливинилхлорид и получили в этой работе название обобщённых волн Рэлея.

В соответствии с результатами работы [2] придонная волна, реализующая полное внутреннее отражение, состоит из трех волновых составляющих или парциальных волн: водной волны, обобщенной придонной волны, соответствующей полюсу коэффициента отражения границы раздела “вода – морское дно”, и грунтовой волны. Скорость распространения водной волны в придонной области со-

составляет 1450-1500 м/с, скорость распространения обобщенной придонной волны для грунтов осадочного типа составляет 1350-1400 м/с, скорость распространения грунтовой волны для грунтов того же типа составляет 1650-1750 м/с. Распространяясь совместно, но с разными фазовыми скоростями, эта тройка волн образует характерные крупномасштабные интерференционные структуры, которые уверенно обнаруживаются при локационной съемке морского дна локатором бокового обзора, как в глубоком, так и в мелком море [4].

Лучевая трактовка первой пары нормальных волн в неоднородном модельном волноводе, который вполне адекватно описывает звуковые поля в мелком море, поясняется рис. 1. В предельном случае достаточно высоких частот и больших расстояний от источника первая нормальная волна 1(2), принадлежащая классу обобщенных нормальных волн $n(2)$, вырождается в обобщенную придонную волну, затекающую в придонный слой на горизонт полного внутреннего отражения $z_{\text{п}}$. Вторая нормальная волна 2(1), принадлежащая классу регулярных нормальных волн $n(1)$, вырождается в водную волну, локализованную в волноводе. Интерференционное взаимодействие первой пары нормальных волн как раз и реализует циклическое затекание энергии звуковой волны на горизонт полного внутреннего отражения с последующим ее возвратом в волновод.

Горизонт полного внутреннего отражения и оптимальный угол скольжения, соответствующий максимуму энергетической прозрачности границы раздела вода – морское дно, описываются формулами [2]

$$z_{\text{п}} = z_{\text{h}} \rho_{12}, \quad \beta_{\text{опт}} = \arccos \sqrt{\frac{1 + \rho_{12}^2 c_{12}^2}{1 + \rho_{12}^2}}, \quad (1)$$

где $z_{\text{h}} = h - z_0$, z_0 – вертикальная координата источника, $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$, $c_{12} = c_1 / c_2$, ρ_1 и ρ_2 – плотность водной среды и дна, c_1 и c_2 – скорость звука в воде и в грунте соответственно. Энергетическая прозрачность границы раздела в области закритических углов падения является принципиально необходимой и определяет оптимальный диапазон углов скольжения $\beta = 0 - 15^\circ$ для возбуждения придонной волны.

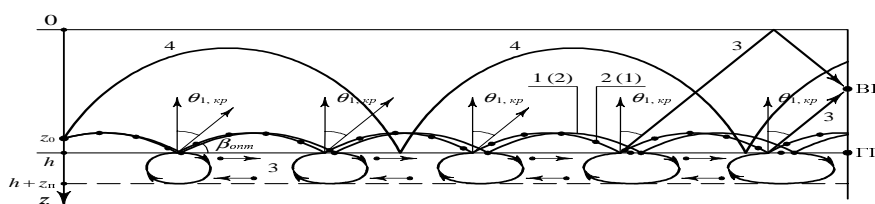


Рис. 1. Лучевая трактовка придонной волны: 1(2) – первая обобщенная придонная волна, 2(1) – вторая регулярная нормальная волна, 3 – боковая (грунтовая) волна, 4 – высокоскоростной луч придонного звукового канала, ВГ, ГГ – водный и грунтовой гидрофоны

Групповая скорость $c_{\text{гр}}$ совместного волнового движения, каким является придонная волна, определяется алгоритмом усреднения обратных групповых скоростей парциальных составляющих совместного волнового движения

$$\frac{1}{c_{\text{пр}}} = \frac{p_1}{c_1(h)} + \frac{p_2}{c_2(h)} + \frac{p_{\text{п}}}{c_{\text{п}}}, \quad p_1 + p_2 + p_{\text{п}} = 1, \quad c_{\text{п}} = c_1(h) \sqrt{\frac{1 - \rho_{12}^2}{1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2}},$$

где $p_1, p_2, p_{\text{п}}$ – весовые коэффициенты, пропорциональные удельной мощности, приходящейся на каждую волновую составляющую; $c_{\text{п}}$ – скорость обобщенной придонной волны; $c_1(h)$ – скорость распространения водной волны в придонной области; $\rho_{12} = \rho_1 / \rho_2$, $c_{12} = c_1(h) / c_2(h)$; $\rho_1, c_1(h)$, $\rho_2, c_2(h)$ – плотность и скорость звука в придонной области в воде и грунте соответственно; h – глубина моря.

Из обобщенной теории [2] могут быть получены следующие оценки для весовых коэффициентов:

$$p_1 = \frac{1}{2}, \quad p_2 = \frac{\rho_{12}^2}{2}, \quad p_{\text{п}} = \frac{1 - \rho_{12}^2}{2}.$$

Тогда нормированная групповая скорость совместного волнового движения, каким является придонная волна, оценивается выражением

$$c_{\text{пр}} = c_{\text{нор}} c_1(h); \tag{2}$$

$$c_{\text{нор}} = \frac{2A(\beta)}{1 + c_{12} \rho_{12}^2 + \sqrt{(1 - \rho_{12}^2)(1 - \rho_{12}^2 c_{12}^2)}}; \quad A(\beta) = \frac{1 + \cos \beta}{2 \cos \beta}.$$

Множитель $A(\beta)$, (β – угол скольжения водных лучей в придонной области) учитывает возможную рефракцию звуковых лучей в придонной области и увеличение за счет этого эффективной скорости распространения водной волны.

На рис. 2 приведены результаты расчета нормированной групповой скорости распространения придонной волны в типичном для осадочного слоя диапазоне изменения параметров ρ_{12} , c_{12} , которые показывают, что для реальных значений параметров осадочного слоя скорость придонной волны отличается от скорости водной волны на десятые доли процента даже при значительной вариации параметров осадочного слоя.

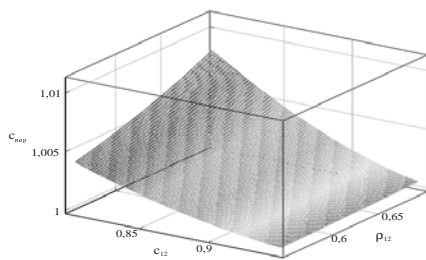


Рис. 2. Нормированная скорость распространения придонной волны на границе раздела вода – морское дно осадочного типа

Несмотря на близкое соответствие скоростей распространения, придонная волна принципиально отличается от водной волны. При распространении водной волны вдоль границы раздела под малыми углами скольжения отражение является противофазным, отраженная волна гасит падающую, а амплитуда сигнала в суммарном поле убывает с квадратом расстояния, в чем и проявляется эффект мягкого экрана (эффект зеркала Ллойда).

Придонная волна, распространяясь примерно с той же групповой скоростью, имеет сложную структуру, но механизм затекания энергии на горизонт полного внутреннего отражения с возвратом разрушает эффект мягкого экрана и предотвращает вырождение амплитуды придонной волны. Численные расчеты звукового поля в волноводе и придонном слое поясняются рис. 3 для случая $k_1 h = 400$ (часто-

та 2,5 кГц при глубине моря 40 м) и придонного горизонта излучения ($z_{01} = z_0/h = 0,95$) в нормированных координатах $r_1 = r/h$, $z_1 = z/h$.

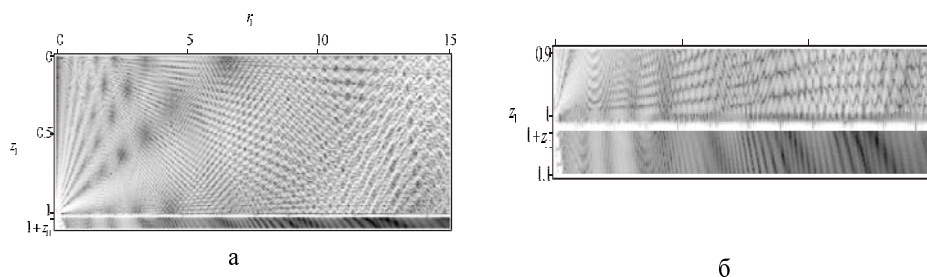


Рис. 3. Структура звукового поля точечного источника в волноводе (а) и пограничном звуковом канале (б); $k_1h = 400$, $z_{01} = 0,95$

Физические характеристики сопряженных сред, принятые в расчетах, соответствуют песчаному дну с параметрами $\rho_{12} = 1/1,6$, $c_{12} = 1,5/1,75$. Компьютерное моделирование выполнено с использованием обобщенной теории волновода Пеке-риса [2], которая в отличие от классической теории позволяет описать процесс полного внутреннего отражения с затеканием энергии на горизонт полного внутреннего отражения $z = h + z_{п}$. Результаты моделирования подтверждают доминирующую роль придонной волны в суммарном звуковом поле при придонном расположении излучателя и присутствие боковой волны в дальнем поле излучателя, которой соответствует система волновых фронтов с углом скольжения $\beta = 30^\circ$.

Достаточно точные оценки скорости распространения придонной волны по формуле (1) и ее характерные особенности, связанные в первую очередь с отсутствием какой-либо частотной зависимости, делают возможной ее экспериментальную идентификацию. Для экспериментального подтверждения факта существования придонной волны и определения её кинематических характеристик в 2005-2007 гг. было проведено несколько экспериментов в заливе Петра Великого (Японское море). Придонная волна была достаточно четко определена по скорости распространения. Подтвердилось и отсутствие частотной зависимости скорости придонной волны в исследованном диапазоне частот 369–2526 Гц [5].

Обобщенная придонная волна имеет ножевидный профиль вертикального распределения давления в грунте. Максимальное значение звукового давления достигается на нижней границе пограничного звукового канала, глубина которого $z_{п}$ пропорциональна высоте излучателя над дном z_0 ($z_{п} = z_0\rho_1/\rho_2$). В силу такой особой пространственной локализации обобщенная придонная волна чрезвычайно привлекательна для томографии морского дна и его послойного зондирования. Обобщенная придонная волна, распространяясь в придонном слое, трансформируется на неоднородностях грунта и отражается обратно грунтовой волной, которая может быть принята антенной, расположенной в водной среде. Поскольку профиль вертикального распределения обобщенной придонной волны в придонном слое имеет ярко выраженный максимум, то фактически томограф дает горизонтальный разрез морского дна на заданном горизонте. При изменении горизонта лоцирования можно выполнить томографическую съемку объекта на различных горизонтах с последующей сшивкой разрезов для получения объемного изображения объекта.

Опытный образец морского акустического томографа был создан в Институте проблем морских технологий ДВО РАН и прошел натурные испытания, которые показали его высокую эффективность.

Основные результаты обобщенной теории и натурных экспериментов можно сформулировать в виде следующих положений.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено наличие пограничного звукового канала и локализованной в нем придонной волны как нового вида пограничного волнового движения на границе раздела вода – морское дно осадочного типа. Сама придонная волна относится к классу обобщенных волн, впервые обнаруженных в фундаментальной работе французских акустиков [3], а скорость ее распространения близка к скорости звука в воде вблизи дна.

Придонная волна является доминирующей составляющей в суммарном звуковом поле при придонном расположении излучателя и приемника. Скорость ее распространения и отсутствие частотной зависимости в исследованном диапазоне частот 369 – 2526 Гц хорошо соответствуют расчетной формуле (2) и обобщенной теории полного внутреннего отражения [2].

Показана возможность применения обобщенной придонной волны для детектирования объектов, находящихся в толще дна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касаткин Б.А.* Аномальные эффекты при прохождении звуковых волн через границу раздела вода – морской песок // Сб. трудов VII школы-семинара акад. Л.М. Бреховских. – М.: ГЕОС, 1998. – С. 112-116.
2. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В.* Некорректные задачи и обобщенные волны в акустике слоистых сред. – Владивосток: Дальнаука, 2005. – 408 с.
3. *Padilla F., de Billy M., Quentin G.* Theoretical and experimental studies of surface waves on solid-fluid interfaces when the value of the solid velocity is located between the shear and the longitudinal ones in the solid // J. Acoust. Soc. Am. 1999. V.106 (2). P. 666–673.
4. *Касаткин Б.А.* Аномальные явления при распространении звуковых волн вблизи морского дна // Акуст. ж., 2002. Т. 48. № 4. С. 437–446.
5. *Злобина Н.В., Касаткин Б.А., Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н.* Придонная волна на шельфе и перспективы ее использования // Труды IX всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб., 2008. – С. 540–544.

Касаткин Борис Анатольевич

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

690091, Россия, г. Владивосток, ул. Суханова, 2, кв.8

Тел.: 8(4232) 43-25-78

Злобина Надежда Владимировна

E-mail: zlobina@marine.febras.ru

Стаценко Любовь Григорьевна

Дальневосточный технический университет

E-mail: rts@festu.ru

690002, Россия, г. Владивосток, Океанский проспект, 83, кв. 30

Тел.: 8 (4232) 45-89-34

Злобин Дмитрий Владимирович

E-mail: dimmanuel@mail.ru

Kasatkin Boris Anatolyevich

Institute of Marine Technology Problems FEB RAS

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru

Flat 8, 2, Suchanova Street, Vladivostok, 690091, Russia, Ph.:(4232) 43-25-78

Zlobina Nadeshda Vladimirovna

E-mail: zlobina@marine.febras.ru

Statsenko Lubov Grigorievna

Far Eastern State Technical University

E-mail: rts@festu.ru

Flat 30, 83, Okeanskiy, Vladivostok, 690002, Russia, Ph.: (4232) 45-89-34

Zlobin Dmitriy Vladimirovich

E-mail: dimmanuel@mail.ru

УДК 551.463.621.391

В. И. Каевитсер, В. М. Разманов, А. В. Элбакидзе, И. В. Смольянинов

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО
ЛЧМ-ПРОФИЛОГРАФА**

Исходными данными для интерпретации результатов исследования структуры морского дна с помощью акустического профилографа являются профилограммы - зависимость мощности отраженного сигнала от задержки (глубины) вдоль трассы измерений. Использование в профилографах когерентных широкополосных сигналов, цифровая регистрация полного сигнала открывают возможность использования дополнительно к мощности (амплитуде) также спектральных характеристик отраженных сигналов для целей исследования структуры морского грунта.

ЛЧМ-сигнал; морские осадки; профилограф.

V. I. Kaevitser, V. M. Razmanov, A. V. Elbakidze, I. V. Smolyaninov

**SOME RESULTS OF ACOUSTIC SIGNALS CHARACTERISTICS
INVESTIGATION OF LOW FREQUENCY LFM-PROFILER**

Profilograms are the source data for the interpretation of investigation ocean floor results using acoustic profilograph. Profilogram is the dependence of echoic signal power on the time delay along measuring route. Using in profilographs wide-band signals and full signal digital data logging make it possible add spectral characteristics of reflected signals to the power (amplitude) ones for sea soil structure investigation.

LFM – signal; marine sediments; profiler.

Акустические профилографы в настоящее время являются одним из основных инструментов дистанционного исследования подповерхностной структуры морского грунта. Как правило, исходными данными для интерпретации результатов профилирования являются профилограммы – зависимость мощности отражен-