

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Касаткин Б.А.* Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред // Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина. – М.: Наука, 2009. – 496 с.
2. *Касаткин Б.А.* Придонная волна и перспективы ее применения для экологического мониторинга верхнего слоя морского дна / Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, Л.Г. Стаценко, Д.В. Злобин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 6 (95). – С. 109-114.
3. *Касаткин Б.А.* Эффект сверхфокусировки слабо направленного излучения при профилировании морского дна / Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина, С.Б. Касаткин, Г.В. Косарев // Материалы Третьей Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток. – С. 204-211.
4. *Касаткин Б.А.* Сравнительный анализ классического и обобщенного решений граничной задачи Пекериса / Б.А. Касаткин, Н.В. Злобина // Акустика неоднородных сред. Ежегодник РАО. – Троицк: Тривант, 2007. – Вып. 8. – С. 158-171.
5. *Злобина Н.В.* Придонная волна на шельфе и перспективы ее использования / Н.В. Злобина, Б.А. Касаткин, Ю.В. Матвиенко, Р.Н. Рылов // Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики». – СПб. Наука, 2008. – С. 540-544.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Воронин.

Стаценко Любовь Григорьевна

Дальневосточный государственный технический университет.

E-mail: lu-sta@mail.ru.

690950, Владивосток, ул. Пушкинская, 10.

Тел.: +79025246057.

Зав. кафедрой радио, телевидения и связи; д.ф.-м.н.; профессор.

Злобин Дмитрий Владимирович

E-mail: memrbomel@mail.ru.

Тел.: +79024801250.

Аспирант кафедры радио, телевидения и связи.

Statsenko Lubov Grigorievna

Far Eastern State Technical University.

E-mail: lu-sta@mail.ru.

10, Pushkinskaya Street, Vladivostok, 690950, Russia.

Phone: +79025246057.

Head of Department of Radio, Television and Communication, Dr. of Phys.-Math. Sc.; Professor.

Zlobin, Dmitry Vladimirovich

E-mail: memrbomel@mail.ru.

Phone: +79024801250.

Postgraduate Student of Department of Radio, Television and Communication.

УДК 534.23

Н.В. Злобина, Б.А. Касаткин, С.Б. Касаткин

**ЭФФЕКТ САМОФУКУСИРОВКИ НЕНАПРАВЛЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ПОИСКА МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ
В МОРСКОМ ДНЕ**

Сформулирована несамосопряженная модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред, позволяющая математически корректно описать экспериментальные результаты аномального характера и предсказать эффект самофокусировки ненаправленного излучения сходящейся волной отдачи в донном полупространстве. Приведены

результаты компьютерного моделирования и данные экспериментальных исследований, подтверждающие выводы теории. Эффект самофокусировки ненаправленного излучения значительно усиливается, если ненаправленный источник находится в жидком слое, нагруженном на полупространство. Результаты могут иметь реальное применение при профилировании морского дна с повышенной разрешающей способностью на низких частотах, когда обычные способы формирования направленного излучения оказываются неэффективными.

Модельный волновод Пекериса; несамосопряженная модельная постановка; волна отдачи; фокальное пятно; донный профилограф.

N.V. Zlobina, B.A. Kasatkin, S.B. Kasatkin

SELF-FOCUSING EFFECT OF NONDIRECTED EMISSION AND ITS APPLICATION FOR SEARCH OF SMALL OBJECTS IN SEA BOTTOM

Not self-conjugate modeling statement of boundary problems in acoustics of layered mediums is formulated. It allows to describe correctly experimental results of anomaly character and to predict effect of self-focusing of nondirected emission by a converging wave of feedback in bottom half-space. Results of computer modeling and the data of experimental researches confirming conclusions of the theory are brought. The effect of self-focusing of not directed radiation considerably amplifies, if not directed source is in the liquid layer loaded on semispace. Results can have real application at profiling of a sea-bottom with the raised resolution on low frequencies when usual ways of formation of the directed radiation appear inefficient.

Model Pekeris waveguide; not self-conjugate modeling statement; wave of feedback; focal spot; bottom profiler.

Для нахождения звукового поля ненаправленного точечного источника в слоистой среде часто используется модель волновода Пекериса. При решении самой граничной задачи для такого волновода возможны две принципиально различные модельные постановки – самосопряженная, классическая [1–3], и несамосопряженная, обобщенная, впервые сформулированная в работе [4]. Различные применения несамосопряженной модельной постановки при решении граничных задач в слоистых средах приведены в монографии [5]. В самосопряженной модельной постановке спектр собственных значений поперечного оператора, соответствующего граничной задаче Пекериса, является вещественным, что трактуется как отсутствие потерь на излучение в системе волновод – полупространство. Однако в решении появляются мнимые источники на оси симметрии в полупространстве, имитирующие излучение в полупространство при отсутствии потока мощности через импедансную границу раздела волновод – полупространство. При этом обеспечивается однонаправленность (синфазность) волнового движения вдоль импедансной границы раздела и выполнение условий локальной непрерывности поля по давлению и нормальной компоненте колебательной скорости (условий (p, v_z) -непрерывности) на самой границе.

В несамосопряженной модельной постановке в решении появляются вытекающие волны комплексного спектра поперечного оператора и сходящиеся волны отдачи, которые обеспечивают положительную определенность потока мощности через импедансную границу раздела. Однако суммарное волновое движение оказывается встречным, несинфазным, а условия (p, v_z) -непрерывности выполняются только в среднем.

Несамосопряженная модельная постановка граничных задач в акустике слоистых сред позволяет предсказать новые физические явления, которые могут быть очень полезны для практического применения. К таким явлениям, в частности, относится эффект самофокусировки ненаправленного излучения в нижнем полупространстве.

Рассмотрим процесс отражения сферической волны от импедансной границы раздела двух полупространств. Волна отдачи, появляющаяся в обобщенном решении, отражается от оси симметрии как от жёсткой границы и становится расходящейся волной в некоторой дальней зоне. Сходящиеся волны отдачи, соответствующие различным углам падения, которые меньше критического значения, формируют характерную каустику в нижнем полупространстве. Один конец этой каустики выходит на границу раздела в точке, соответствующей критическому углу падения, а другой – в точке фокусировки на оси симметрии. Каустика хорошо видна на картинах звукового поля, которые получены в результате компьютерного моделирования процесса преломления сферической волны на границе раздела двух сред, выполненного в рамках несамосопряженной модельной постановки граничной задачи.

Структура звукового поля в нижнем полупространстве показана на рис. 1. Пространственные координаты нормированы на высоту источника z_0 , k_1 – волновое число. Вертикальный разрез поля, изображённый на рис. 1,б, подтверждает немонотонный характер изменения уровня звукового давления вблизи оси симметрии и эффект самофокусировки.

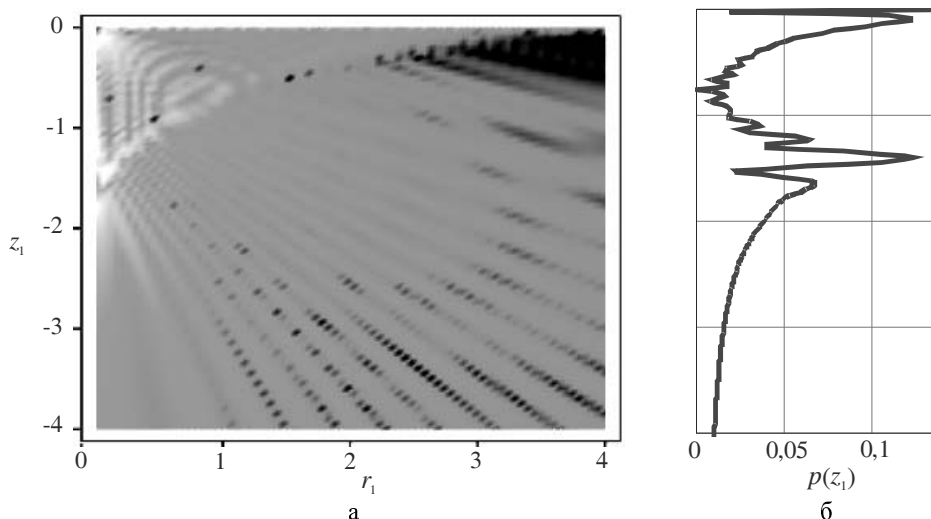


Рис. 1. Поле звукового давления в нижнем полупространстве (а) и вертикальный разрез поля при $r_1 = 0,1$ (б), $k_1 z_0 = 100$

Эффект самофокусировки ненаправленного излучения значительно усиливается, если ненаправленный источник находится в жидком слое, нагруженном на полупространство. В этом случае жидкий слой играет роль фокусирующей линзы, собирающей лучи, многократно отражённые от границ слоя, с их последующим преломлением в полупространство сходящейся волной отдачи. Компьютерное моделирование процесса фокусировки поясняется рис. 2 для нормированного горизонта излучения $z_{01} = 0,1$ и значения частотного параметра $k_1 h = 100$, $k_1 h = \omega h / c_1$, $z_{01} = z_0 / h$, $z_1 = z / h$, $r_1 = r / h$, (c_1 – скорость звука в воде, ω – круговая частота, z и r – вертикальная и горизонтальная координаты). На рисунке хорошо видны каустический фронт волн отдачи и горизонт фокусировки $z_{\phi} - h = (h - z_0) c_1 / c_2$ (c_2 – скорость звука в полупространстве). Причём для грунтов осадочного типа

($c_1/c_2 \approx 1$) горизонт фокусировки является зеркальным к горизонту излучения относительно границы раздела. Можно отметить, что ширина фокального пятна в зоне фокусировки на уровне -3 дБ имеет порядок длины волны, а коэффициент концентрации потока мощности пропорционален квадрату частоты.

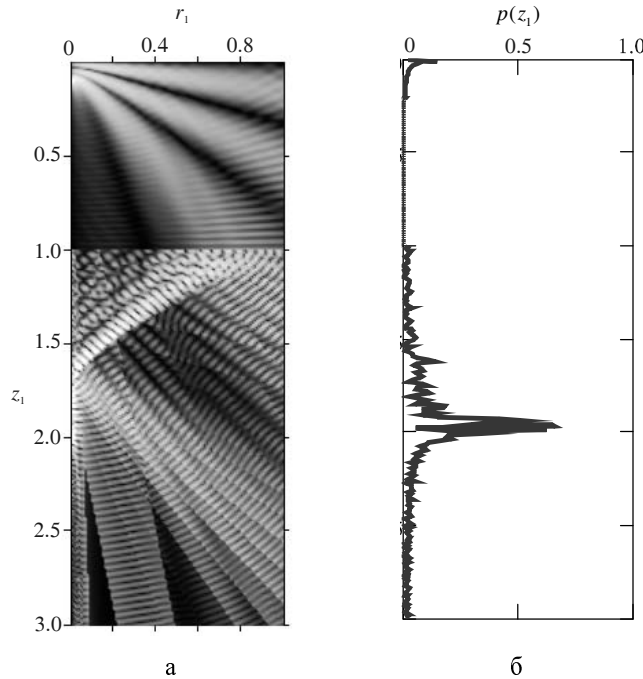


Рис. 2. Структура звукового поля вблизи оси симметрии (а) $k_1h = 100$, $z_{01} = 0,1$; вертикальный разрез звукового поля $|p(z_1)|$ на оси симметрии (б) для тех же параметров

Волны отдачи, играющие основную роль при формировании фокального пятна в полупространстве, вполне наблюдаемы в акустическом эксперименте. В качестве примера можно указать на работу [6], в которой описан эксперимент по прохождению звуковых волн через границу раздела вода – морское дно песчаного типа, выполненный в условиях гидроакустического бассейна. В этом эксперименте измерялись импульсные характеристики тракта передачи, содержащего широкополосный ненаправленный излучатель импульсного сигнала, расположенный в воде, и приемный гидрофон, расположенный в слое песка, уложенного на дно гидроакустического бассейна. При перемещении излучателя на фиксированном горизонте относительно приемного гидрофона измерялись проходные характеристики, т.е. зависимость амплитуды и времени распространения импульсного акустического сигнала от горизонтального расстояния между излучателем и приемным гидрофоном.

Длительность импульсного отклика в эксперименте существенно превышала длительность самого импульсного сигнала, и это превышение было максимальным при соосном расположении излучателя и приёмного гидрофона. В этом случае первым приходил на приемный гидрофон прямой сигнал, распространяющийся по нормали к границе раздела, но его амплитуда была меньше максимальной. Затем при увеличении расстояния приходили сигналы, для которых углы падения отличны от нуля.

Результаты эксперимента показывают, что при увеличении расстояния высокоскоростные лучи, соответствующие закону преломления Снеля и принципу Ферма, вымирают и сменяются низкоскоростными лучами, которые не соответствуют ни закону Снеля, ни принципу Ферма. Эти лучи могут попасть на приемный гидрофон только в том случае, если они преломляются на границе раздела сходящимися волнами отдачи с последующим отражением от оси симметрии как от абсолютно жёсткой границы. В результате длительность импульсного отклика при соосном расположении излучателя и приемника увеличивалась в 2–3 раза по сравнению с длительностью самого импульса возбуждения.

Эффект самофокусировки может иметь реальное применение при профилировании (сейсмопрофилировании) морского дна с повышенной разрешающей способностью на низких частотах, когда обычные способы формирования направленного излучения оказываются неэффективными. На рис. 3 приведены профилограммы морского дна, покрытого слоем глубоководного ила, которые получены при масштабном исследовании морского дна в районе хребта Ломоносова в Северном Ледовитом океане с использованием автономного необитаемого подводного аппарата [7]. При профилировании морского дна расстояние антенны профилографа до морского дна составляло 15 и 30 м. Можно было ожидать, что при профилировании с малого расстояния потери на распространение будут меньше, а глубина профилирования больше, чем в случае с увеличенным расстоянием до дна, однако результаты эксперимента оказались принципиально иными. При профилировании морского дна с высоты 15 м глубина профилирования не превышала 15 м. Это можно объяснить тем, что зона фокусировки располагалась в рассматриваемом случае на зеркальном горизонте на глубине 15 м в толще дна, а ниже горизонта фокусировки уровень сигнала резко убывал с расстоянием.

На рис. 3,а хорошо видна подсветка этого горизонта (нижнего горизонта слоистой структуры в диапазоне расстояний $L = 1000 - 1600$ м), которая увеличивает амплитуду отраженного сигнала. При увеличении высоты антенны над морским дном до 30 м (рис. 3,б) фокальное пятно смещается на горизонт 30 м в толще дна с соответствующим увеличением амплитуды зондирующего сигнала вблизи этого нового горизонта подсветки. В этом режиме глубина профилирования уверенно увеличивается до 30 м, несмотря на то, что потери на распространение увеличиваются в сравнении с предыдущим случаем на 25–30 дБ. Хорошо видно также, что если при профилировании с высоты 15 м разрешающая способность составляет примерно 2–2,5 м, то при профилировании с высоты 30 м она увеличивается до 0,4–0,5 м.

На наш взгляд, именно обратная волна отдачи, распространяющаяся под малыми углами скольжения к слоистой структуре, и сопутствующий ей эффект самофокусировки компенсируют дополнительные потери на распространение при увеличении высоты антенны над дном, увеличивают разрешающую способность метода профилирования и глубину профилирования. По существу эффект самофокусировки нарушает монотонно убывающий по амплитуде характер звукового поля в морском дне при малых углах падения непосредственно под антенной профилографа, как это видно по результатам численного моделирования на рис. 2,а. Оптимальным оказывается режим профилирования, при котором высота антенны над дном выбирается с учётом этой немонотонности. Принципиальную роль при описании самого эффекта играет несамосопряжённая модельная постановка соответствующей граничной задачи. Именно в такой постановке реализуется естественная способность осесимметричных структур к самофокусировке поля на оси симметрии, играющей роль абсолютно жёсткой границы, на которой сходящиеся волны отдачи и расходящиеся волны связаны взаимной трансформацией.

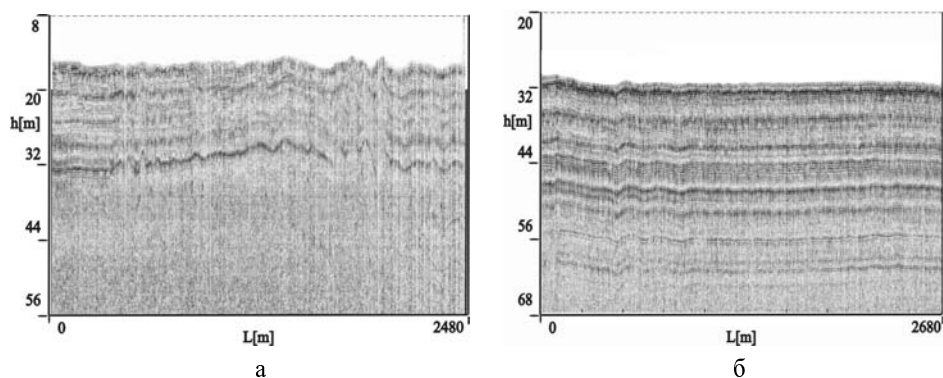


Рис. 3. Профилограммы морского дна, полученные при расстоянии антенны профилографа до морского дна 15 м (а) и 30 м (б)

Можно отметить, что результаты численного эксперимента, выполненного в рамках несамосопряженной модельной постановки, хорошо соответствуют результатам натурального эксперимента [6] и результатам практического использования профилографа [7] в условиях, допускающих проведение сравнительного анализа с количественной оценкой сопутствующих эффектов увеличения глубины профилирования и разрешающей способности метода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Pekeris C.L.* Theory of propagation of explosive sound in shallow water // *Geol. Soc. Am. Mem.* – 1948. – № 27. – P. 48-156.
2. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 502 с.
3. *Ewing W.M., Jardetzky W.S., Press F.* Elastic waves in layered media. McGraw-Hill. – New York. – 1957. – 254 p.
4. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В.* Несамосопряженная модельная постановка граничной задачи Пекериса // *ДАН.* – 2010. – Т. 434. – № 4. – С. 540-543.
5. *Касаткин Б.А., Злобина Н.В.* Корректная постановка граничных задач в акустике слоистых сред. – М.: Наука, 2009. – 496 с.
6. *Simpson H.J., Houston B.H.* Synthetic array measurements of acoustical waves propagating into a water-saturated sandy bottom for a smoothed and roughened interface // *J. Acoust. Soc. Amer.* 2000. – V. 107. – № 5. – Pt. 1. – P. 2329-2337.
7. *Инзарцев А.В., Каморный А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // *Подводные исследования и робототехника.* – 2007. – № 2. – С. 5-14.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.П. Тарасов.

Злобина Надежда Владимировна

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.

E-mail: zlobina@marine.febras.ru.

690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а.

Тел.: 84232432578.

Ученый секретарь; к.ф.-м.н.

Касаткин Борис Анатольевич

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

Зав. лабораторией; д.ф.-м.н.; профессор.

Касаткин Сергей Борисович

E-mail: kasatkas@marine.febras.ru.

Ст. научн. сотр; к.ф.-м.н.

Zlobina Nadezhda Vladimirovna
Institute of Marine Technology Problems FEB RAS.
E-mail: zlobina@marine.febras.ru.
5a, Sukhanov Street, Vladivostok, 690091, Russia.
Phone: +74232432578.
Scientific Secretary; Cand. of Phis.-Math. Sc.

Kasatkin Boris Anatolevich
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
Head of Laboratory; Dr. of Phis.-Math. Sc.; Professor.

Kasatkin Sergey Borisovich
E-mail: kasatkas@marine.febras.ru
Senior Researcher; Cand. of Phis.-Math. Sc.

УДК 656.61.087: 623.82

С.В. Козловский, В.Э. Королев

СУДОВАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МОРЯ

Рассматриваются вопросы построения судовой интегрированной системы экологического мониторинга моря (ИСЭМ), позволяющей решать широкий круг задач по своевременному обнаружению потенциально-опасных объектов. Предлагаются специальные судовые средства и оборудование, внутренние и внешние связи системы, необходимые для успешного функционирования системы. Обсуждаются некоторые особенности технических решений по отдельным подсистемам. Приводятся состав и предназначение элементов ИСЭМ, варианты ее структуры и размещения на судне. Отмечаются перспективные гидроакустические технологии, которые могут быть реализованы в рассматриваемой системе.

Интегрированная система; экологический мониторинг; гидроакустические; оптические; гидрофизические; радиологические; химические датчики.

S.V. Kozlovski, V.E. Korolev

SHIP INTEGRATED ENVIRONMENTAL MONITORING SYSTEM OF THE SEA

Questions of construction of the ship's integrated environmental monitoring system of the sea (ESI). Which provides a wide range of tasks for early detection of potentially dangerous objects. Proposes courts and equipment, internal and external communication, systems necessary for the successful functioning of the system. Discusses some of the features of technical solutions for individual subsystems. Nhe composition and purpose of elements of ESI, for the structure and location on the ship. There have been advanced sonar technology, which can be implemented in the system.

Integrated system; environmental monitoring; sonar; optical; hydrophysical; radiological; chemical sensors.

В последние годы значительное и повышенное внимание мирового сообщества уделяется проблеме обеспечения экологической безопасности всех видов жизнедеятельности человека. Ужесточение требований к охране природопользования в первую очередь коснулось охраны водных ресурсов планеты и мирового океана. Объединенной судостроительной корпорацией, организациями «Газпром», «Роснефть» и другими реализуются программы строительства гражданского флота, в том числе судов экологического мониторинга. Примерами могут служить планируемое к постройке специализированное судно для мониторинга морских магистральных газопроводов (ММГ), для которого облик гидроакустической сис-