

Исследование придонных и донных структур мелкого моря

Р.С. Кириленко

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Проблема исследования особенностей распространения звука в мелком море является актуальной задачей гидроакустики, поскольку связана с производственной деятельностью человека в прибрежных зонах и акваториях мелких морей. Мелкое море для звукового поля представляет собой волновод, в котором распространяются определенные моды. Такие особенности, как «вымирание» мод и дисперсия, искажают картину звукового поля. Также возникает сложная помеховая обстановка из-за реверберационных помех и многократных переотражения. Чтобы избежать потери информации, предлагается использовать узконаправленное параметрическое излучение без боковых лепестков. Рассмотрены вопросы выбора оборудования, рассчитан закон временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) для исследования донных слоев. Приведены результаты анализа эхограмм для глубин 1-2 м. Показана возможность идентификации слоев и аномалий.

Ключевые слова: мелкое море, распространение звука, модальность, волновод, закон ВАРУ, донные структуры, слои, профилограф, аномалии.

Особенности распространения звука на мелководье и важность прибрежной зоны для деятельности человека позволяют выделить акустику мелкого моря как самостоятельный раздел акустики океана [1-3]. Мелким морем принято считать область водной среды, характеризующуюся следующими особенностями:

- профиль скорости звука имеет монотонный характер;
- слоистая структура дна, присутствие донных осадков (илы разной плотности, песок и др.);
- пространственная анизотропия мезо-масштабных гидродинамических процессов (внутренних волн, приливов, фронтальных зон).

Для теоретического описания распространения звука используется «модальный» подход [4-6], когда поле звукового давления представляется в виде суммы волноводных мод. Особую роль в исследовании распространения звука играют неоднородности границ - поверхности моря и дна. В силу этого, существует ряд специфических акустических эффектов,

определяющих основные свойства звукового поля в мелком море: «вымирание» мод и волноводная дисперсия [7, 8].

Что касается натурального эксперимента, то применяют неподвижные излучатели и приёмники звука, чтобы перекрыть практически всю глубину образовавшегося в мелком море волновода. Это обеспечивает возможность наблюдения интерференционной структуры звукового поля. При этом основной проблемой является присутствие дополнительных (боковых) лепестков в диаграмме направленности излучателя, которые будут создавать значительные реверберационные помехи и нарушать интерференционную картину.

Для решения проблемы возникновения реверберационной помехи предлагается использовать параметрический излучатель [9], характеризующийся узкой, безлепестковой диаграммой направленности в широком диапазоне рабочих частот. Основной целью работы параметрического профилографа является сбор информации о рельефе дна и неоднородностях в структуре основных и осадочных пород мелкого моря, расположенных под дном, а также обнаружение затонувших объектов. Аппаратура параметрического профилографа совместно с программным обеспечением обработки данных профилирования решает задачи обнаружения объектов находящихся на дне и в толще осадочных пород [9, 10].

Работу профилографа можно рассматривать в пределах одного цикла зондирования, по окончании которого порядок действий повторяется. Цикл зондирования можно разделить на несколько действий:

- подготовка (или расчет) значений параметров;
- формирование сигналов зондирования;
- прием эхосигналов, аналоговая и цифровая обработка.

К тракту приема, обработки, анализа и регистрации, как правило, кроме общих требований к обычной гидроакустической аппаратуре, предъявляются дополнительные требования, обусловленные особенностями решаемой задачи [11, 12].

Важным параметром, который необходимо определить до начала профилирования, является закон временной автоматической регулировки усиления (ВАРУ) [13]. Закон ВАРУ позволяет уточнить параметры приемного тракта профилографа, что особенно важно при работе на мелководье.

Расчет закона ВАРУ проводится, исходя из следующих соображений:

1. Закон ВАРУ обратен закону уменьшения энергии акустических волн вследствие поглощения и сферического расхождения.
2. Расстояние от антенны профилографа до дна от 0,5 м, глубина проникновения в грунт до 3 м.
3. Закон ВАРУ должен обеспечить компенсацию отражения акустических волн от поверхности от дна.
4. Начальный уровень усиления 7,5 дБ определяется минимально возможным коэффициентом усиления приемных усилителей.

Из приведенных начальных условий было получено выражение:

$$K_u(r) = 20 \lg \left\{ \begin{array}{l} r \cdot 10^{0.1\beta_w r} \text{ при } 0 \leq r \leq h \\ (r-h) \cdot 10^{0.1\beta_s(r-h)} + \frac{h}{V} \text{ при } h < r \leq h+4 \end{array} \right\} + 7.5$$

где r – расстояние, h – расстояние от антенны профилографа до дна, β_w и β_s – коэффициенты поглощения в воде и в грунте соответственно, V – коэффициент отражения звука от дна, рассчитываемый, как:

$$V = 1 - \frac{Z_s - Z_w}{Z_s + Z_w},$$

где Z_w и Z_s – импедансы воды и грунта, соответственно.

Полученные зависимости для разных грунтов приведены на рис. 1-4. Данные для расчета брались из результатов расчетов глубины проникновения в грунт и оценки характеристик обнаружения заиленных объектов для типовых помехо-сигнальных условий и типовых условий применения профилографа.

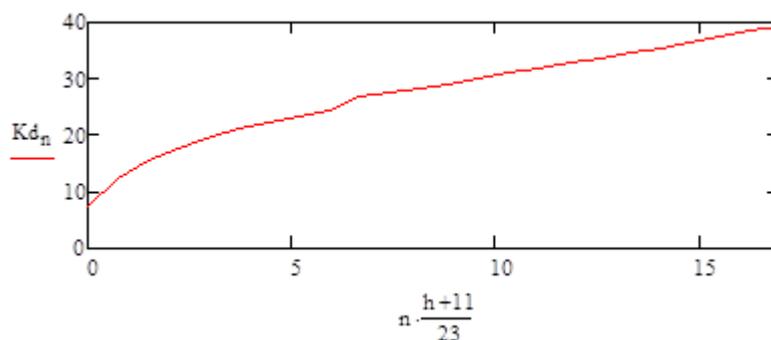


Рис. 1. – Закон ВАРУ для глинистого грунта

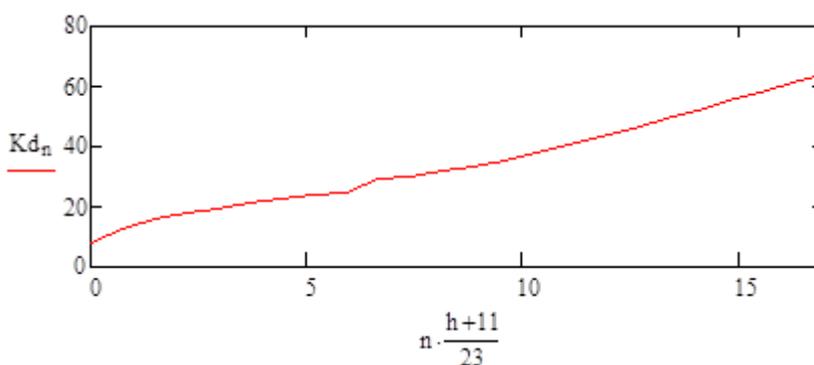


Рис. 2. – Закон ВАРУ для песчаного грунта

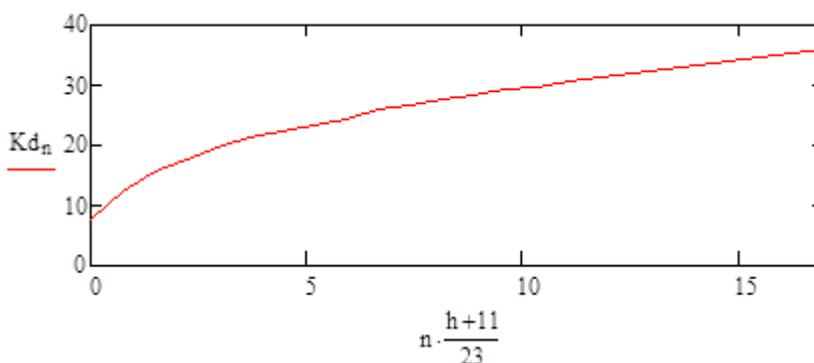


Рис. 3. – Закон ВАРУ для илистого грунта

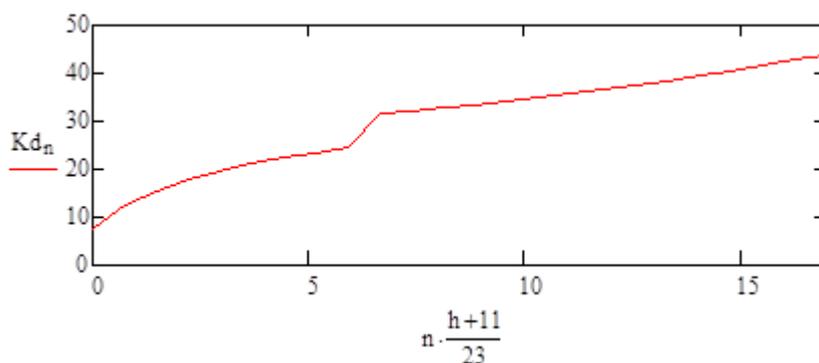


Рис. 4. – Закон ВАРУ для каменистого грунта

Из рис. 1-4 видно, что наибольшее поглощение наблюдается в песчаном грунте, наименьшее – в илистом. Самый большой коэффициент отражения у каменистого грунта, наименьший – у илистого. Также был рассчитан коэффициент поглощения звука в соленой воде. Было выявлено, что на рабочих частотах профилографа отличия между коэффициентами для соленой и пресной воды минимальны и ими можно пренебречь.

Для профилирования дна и донных структур используется акустический параметрический профилограф со следующими основными техническими характеристиками:

- ширина характеристики направленности – 3 градуса;
 - разрешающая способность – 15 см;
 - глубина зондирования – до 30 м в зависимости от типа грунта;
 - минимальная глубина акватории при съемке – 1 м;
- Вес антенной системы – не более 10 кг;
- установка на забортном устройстве в виде выносной штанги;
 - электропитание – 220 В, 50 Гц;
 - потребляемая мощность – не более 2 кВт.

Для проверки работы профилографа в натуральных условиях, при подходе к району основных работ при пересечении судоходного канала было проведено предварительное профилирование дна. Как уже было отмечено

выше, по всему району профилирования фиксировались неоднородности в донном грунте, глубины которых в некоторых местах достигали от 1,5 до 2 метров от линии дна. Неоднородности представляют собой слоистые структуры с различными отражающими свойствами.

На полученных эхограммах профилей (рис. 5), отчетливо наблюдается кратная линия дна – «второе дно» (2), которая появляется в результате многократного переотражения акустического сигнала между дном (1) и поверхностью моря и равна двойной глубине места профилирования [14, 15]. Видно, что идентификация слоев на малых глубинах становится затруднительной вследствие влияния «второго дна».

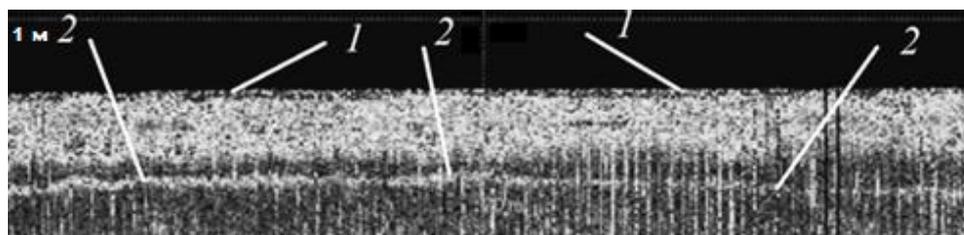


Рис. 5. – Результат многократного переотражения акустического сигнала между дном и поверхностью моря

На ряде записей профилей (рис. 6) наблюдаются электрические наводки в приемном тракте, вызванные работой генератора 220В 50Гц [14].

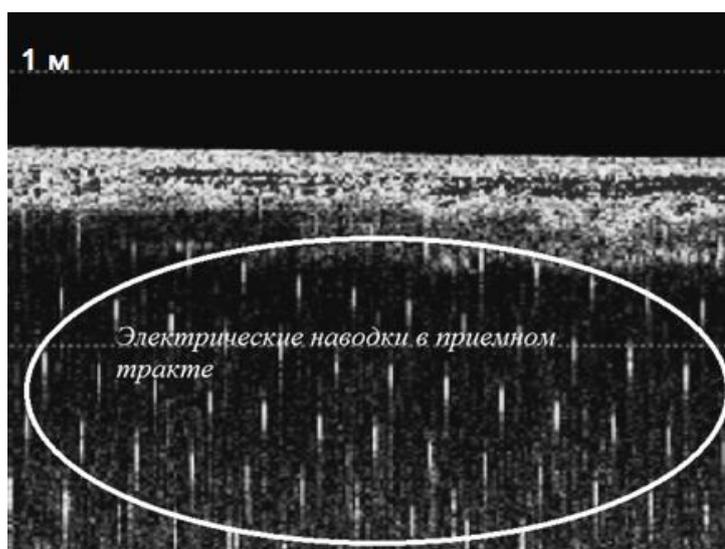


Рис. 6. – Электрические наводки в приемной тракте

Глубина залегания слоя определялась относительно поверхности моря [16]. Все обнаруженные аномалии типа «слои» (рис. 7), имеют примерно одинаковую структуру по всей площадке проведения натурных испытаний.

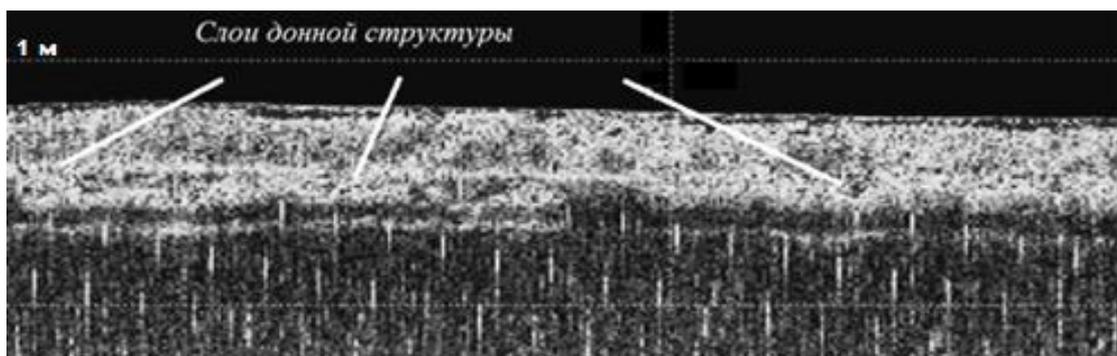


Рис. 7. – Аномалии типа «слои»

Аномалии профилей (рис 8, 9) представляют собой точечные аномалии, с большим коэффициентом отражения с окружающими донными структурами.

Аномалия профиля (рис. 8) представляет собой вымоину дна, глубиной 0,5 м.

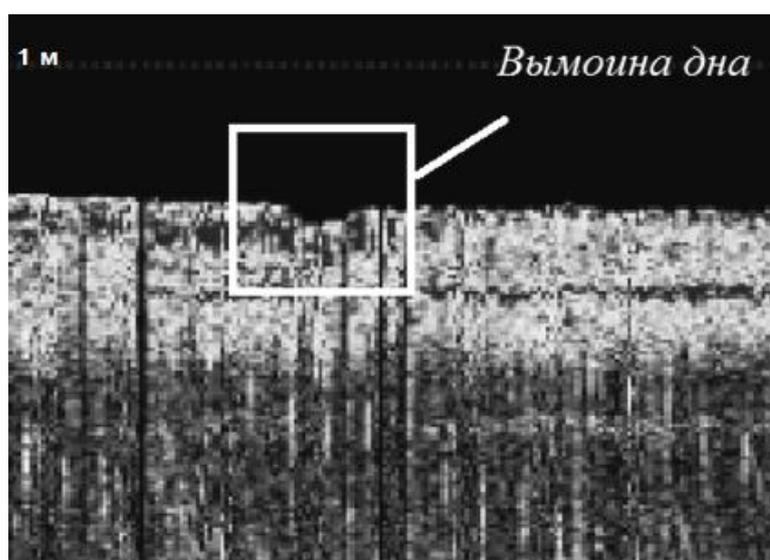


Рис. 8. – Аномалия типа «вымоина»

Аномалии на рис. 9 представляют собой точечный объект со значительным коэффициентом отражения, расположенный на границе со «вторым дном» и выход каменистого дна (ракушечника) над песком высотой примерно 0,5 м над остальной поверхностью дна.

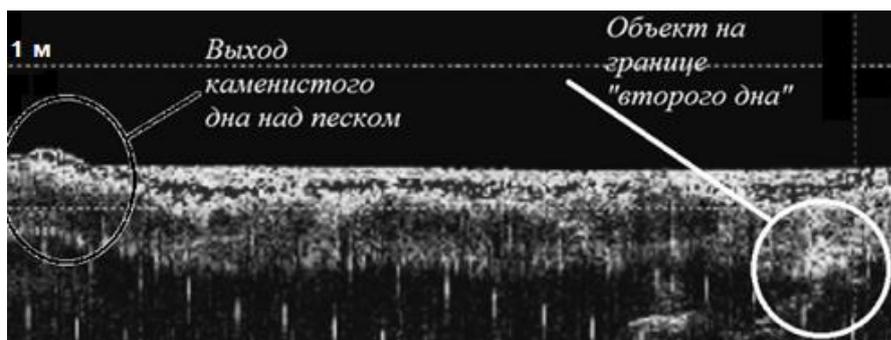


Рис. 9 – Аномалии типа «выход» и «объект»

Полученные результаты демонстрируют работоспособность параметрического профилографа при выполнении работ по профилированию структуры дна и донных осадочных структур в мелком море на незначительных глубинах.

Литература

1. Кацнельсон Б.Г., Петников В.Г. Акустика мелкого моря. М.: Наука, 1997. 191 с.
2. Самченко А.Н. и др. Распространение низкочастотного акустического сигнала в мелком море с учетом влияния неоднородностей в донных осадках // Подводные исследования и робототехника, 2011. №2(12). С. 52-56.
3. Kazantsev E. Sensitivity of a shallow-water model to parameters, Nonlinear Analysis // Real World Applications, 2012. №13 (3). pp. 1416-1428.

4. Zverev V.A., Stromkov A.A., Hil'ko, A.I. Summation of modes of a sound signal in a shallow sea // *Acoustic Physics*, 2007. №53. pp. 524–527.
 5. Khil'ko A.I., Luchinin A.G., Burdukovskaya, V.G. et al. Low-mode tomography of inhomogeneities in a shallow sea // *Acoustic Physics*, 2007. №53. pp. 381–392.
 6. Liu Q., Xie X., Shang X. et al. Modal structure and propagation of internal tides in the northeastern South China Sea // *Acta Oceanologica Sinica*, 2019. №38. pp. 12–23.
 7. Кириченко И.А., Пивнев П.П., Старченко И.Б. К вопросу об обеспечении безопасности передачи данных по волноводному каналу в морской среде с дисперсией // *Известия ЮФУ. Технические науки*, 2010. №11(112). С. 92-99.
 8. Дмитриев К.В., Липавский А.С., Панков И.А., Сергеев С.Н. Эксперимент по выявлению модового состава прибрежного волновода на арктическом шельфе // *Известия РАН. Серия физическая*, 2020. Т.84, №1. С. 110-113.
 9. Кириченко И.А., Вишневецкий В.Ю., Старченко И.Б., Марколия А.И., Сизов И.И., Строчан Т.П. Разработка и исследование параметрического профилографа для исследования слоистой структуры // *Инженерный вестник Дона*, 2021. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6803
 10. Кириченко И.А. Повышение эффективности направленных свойств адаптивных гидроакустических систем с параметрическими антеннами // *Инженерный вестник Дона*, 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3845
 11. Кириченко И.А., Вишневецкий В.Ю., Старченко И.Б., Марколия А.И., Сизов И.И., Строчан Т.П. Экспериментальная оценка влияния
-

внешних элементов на частотную зависимость модуля комплексного сопротивления акустической антенны // Инженерный вестник Дона, 2020. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6697

12. Старченко И.Б., Кириченко И.А. Принцип адаптивного подхода к управлению характеристиками акустических систем // Инженерный вестник Дона, 2011. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/553
13. Li H.X., Tao C.H., Goloshubin G., Liu C., Shi S.H., Huang G.N., Zhang H., Zhang J., Zhang X.F. A Modified Biot/Squirt Model of Sound Propagation in Water-Saturated Sediment // Акустический журнал, 2018. №64. С. 453-458.
14. Кобяков Ю.С., Кудрявцев Н.Н., Тимошенко В.И. Конструирование гидроакустической рыбопоисковой аппаратуры. Л.: Судостроение, 1986. 287 с.
15. Рожин Ф.В., Тонаканов О.С. Общая гидроакустика. М.: Моск.ун-т, 1988. 160 с.
16. Акустика дна океана: под. ред. Купермана У. и Енсена Ф.; пер. с англ. М.: Мир, 1984. 454 с.

References

1. Katsnel'son B.G., Petnikov V.G. Akustika melkogo morya [Acoustics of the shallow sea]. М.: Nauka, 1997. 191 p.
2. Samchenko A.N. i dr. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika, 2011. №2(12). pp. 52-56.
3. Kazantsev E. Real World Applications, 2012. №13 (3). pp. 1416-1428.
4. Zverev V.A., Stromkov A.A., Hil'ko, A.I. Acoustic Physics, 2007. №53. pp. 524–527.

5. Khil'ko A.I., Luchinin A.G., Burdukovskaya, V.G. et al. *Acoustic Physics*, 2007. №53. pp. 381–392.
 6. Liu Q., Xie X., Shang X. et al. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019. №38. pp. 12–23.
 7. Kirichenko I.A., Pivnev P.P., Starchenko I.B. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2010. №11(112). pp. 92-99.
 8. Dmitriev K.V., Lipavskiy A.S., Pankov I.A., Sergeev S.N. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya*, 2020. T.84, №1. pp. 110-113.
 9. Kirichenko I.A., Vishnevetskiy V.Yu., Starchenko I.B., Markoliya A.I., Sizov I.I., Strochan T.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2021/6803
 10. Kirichenko I.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2016. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3845
 11. Kirichenko I.A., Vishnevetskiy V.Yu., Starchenko I.B., Markoliya A.I., Sizov I.I., Strochan T.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2020. №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6697
 12. Starchenko I.B., Kirichenko I.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2011. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2011/553
 13. Li H.X., Tao C.H., Goloshubin G., Liu C., Shi S.H., Huang G.N., Zhang H., Zhang J., Zhang X.F. *Akusticheskiy zhurnal*, 2018. №64. pp. 453-458.
 14. Kobayakov Yu.S., Kudryavtsev N.N., Timoshenko V.I. *Konstruirovaniye gidroakusticheskoy ryboposkovoy apparatury [Design of hydroacoustic fish-hunting equipment]*. L.: Sudostroeniye, 1986. 287 p.
 15. Rozhin F.V., Tonakanov O.S. *Obshchaya gidroakustika [General hydroacoustics]*. M.: Mosk.un-t, 1988. 160 p.
 16. *Akustika dna okeana [Acoustics of the ocean floor]: pod. red. Kupermana U. i Ensena F.; per. s angl.* M.: Mir, 1984. 454 p.
-