

Классификация осадочных структур донного грунта и объектов техногенного происхождения при акустическом профилировании

А. В. Вагин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

av.vagin@bk.ru

Аннотация. Рассмотрены физико-механические характеристики донного грунта, определяющие решение задачи классификации их типов при акустическом профилировании морских осадочных структур. Определена связь между основными параметрами донного грунта. Знание этих характеристик, полученных при профилировании осадочных структур, позволяет выполнить классификацию и интерпретацию отражающих слоев и определить «мощность» каждого из них. Представлены физические основы и алгоритм выполнения послойной классификации донных структур и поиска объектов техногенного происхождения, в частности миноподобных объектов. Полученные результаты могут быть использованы при построении системы классификации акустического донного профилографа.

Ключевые слова: стратификация, классификация, донный грунт, акустический профилограф

Для цитирования: Вагин А. В. Классификация осадочных структур донного грунта и объектов техногенного происхождения при акустическом профилировании // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 18–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-18-27.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Classification of Sedimentary Structures of Bottom Soil and Objects of Technogenic Origin Using Acoustic Profiling

A. V. Vagin

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

av.vagin@bk.ru

Abstract. The physical and mechanical characteristics of the bottom soil, determining the solution to the problem of classifying their types during acoustic profiling of marine sedimentary structures, are considered. The relationship between the main parameters of the bottom soil is determined. Knowledge of these characteristics obtained during profiling of sedimentary structures allows for the classification and interpretation of reflecting layers and the determination of the «power» of each of them. The physical principles and algorithm for performing a layer-by-layer classification of bottom structures and searching for objects of technogenic origin, in particular mine-like objects, are presented.

Keywords: stratification, classification, bottom soil, acoustic profiler

For citation: Vagin A. V. Classification of Sedimentary Structures of Bottom Soil and Objects of Technogenic Origin Using Acoustic Profiling // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 3. P. 18–27. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-3-18-27.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Начиная со второй половины XX в., ведущие государства мира стали проявлять повышенный интерес к изучению и практическому освоению дна Мирового океана с целью его использования в экономических, политических и военных целях [1], [2]. Сегодня дно океана рассматривается как стратегический источник минеральных и энергетических ресурсов, а также плацдарм для размещения подводных систем оружия. Кроме того, океанское дно стало глобальным источником все возрастающей экологической опасности, будучи неконтролируемым местом радиоактивных отходов, боевых отравляющих веществ, и т. д. Поиск этих объектов, обеспечение операций по их подъему, контроль их состояния стали актуальной задачей глобального масштаба.

Актуальны также задачи по выполнению работ дноуглубительного характера, строительства подводных инженерных сооружений, по прокладке трубопроводов, кабельных трасс, добыче полезных ископаемых, поиску заиленных малоразмерных объектов и т. д. [3], [4].

Обязательным этапом перед реализацией вышеуказанных работ служит грунтовая съемка – составная часть морских гидрографических исследований, выполняемая с целью получения информации о распределении грунтов дна до скального основания, а также о типах донного грунта (классификация).

Грунтовую съемку целесообразно выполнять дистанционным способом с помощью поисково-обследовательских акустических средств зондирования донного грунта.

Поисково-обследовательские гидролокаторы предназначены для добывания информации интегрированного характера, обеспечивающей формирование картины (вида) подводной обстановки по результатам гидролокационного обследования дна, физических объектов на дне и погруженных в донный грунт (заиленных).

С помощью гидроакустических систем, в частности акустических профилографов, возможно получение изображений звукорассеивающих поверхностей и объектов с высокой разрешающей способностью [5]. Благодаря устойчивой зависимости свойств вторичного поля от свойств объектов удается получить изображения достаточно высокого качества. При визуальной расшифровке информации, содержащейся в гидролокационном изображении, оператор, используя свой практический опыт и навыки, а также сумму дополнительных признаков, может оценивать характер-

ные особенности изображенных объектов. Принципы получения гидролокационного изображения во многом аналогичны принципам получения телевизионного изображения. Возможности поисково-обследовательских гидролокаторов определяются прежде всего способностью получить такое изображение обследуемого объекта, которое бы позволило не только судить о наличии или отсутствии объекта в зоне обзора гидролокатора, но также распознать искомый объект на фоне других объектов, т. е. классифицировать его, а при решении задачи стратификации осадочных структур классифицировать тип донного грунта с отнесением к одному из основных литологических классов [6].

Объектами акустического профилографа при решении задачи классификации могут быть:

- осадочные структуры донного грунта, выходы скальных пород;
- якорные, донные, придонные мины;
- якорные и донные антенные системы ГАС противолодочного наблюдения;
- специальные конструкции противодесантного и противоподводно-диверсионного оборудования прибрежных районов;
- подводные модули и средства доставки водолазов-разведчиков;
- различные контейнеры, кабели, трубопроводы;
- затонувшие объекты (корабли, подводные лодки и аппараты, летательные аппараты, образцы вооружения и техники и т. п.).

Необходимым условием обеспечения качественной интерпретации результатов, полученных акустическим профилографом, является наличие на носителях возможности точной навигации.

Накопление и анализ в корабельных и береговых базах данных информации о гидроакустических характеристиках среды и морского дна обследуемых акваторий, а также данных об обнаруженных там объектах предоставляют возможность на важных акваториях с постоянными границами (рейды, фарватеры, якорные стоянки, районы развертывания и т. п.) выделять вновь появившиеся объекты и проводить их приоритетное обследование. Систематизация характеристик эхосигналов от лоцируемых объектов дает объективную основу для создания карт гидролокационных характеристик обнаруженных объектов и последующего их распознавания.

Возможен переход к распознаванию подводных объектов, обнаруженных в ходе обследова-

ния, с использованием бортовых и береговых компьютеров только после накопления достаточного объема информации при неоднократном обследовании акватории по разным направлениям. Поскольку алфавит классов объектов поиска достаточно большой, характер отражательных свойств объекта и окружающего его фона чрезвычайно сложен, то критерий (правило) распознавания объектов по результатам поиска может быть сформулирован как распознавание обнаруженного подводного стационарного объекта как объекта искусственного происхождения с вероятностью не ниже заданной за минимальное количество проходов. Показателем эффективности распознавания объектов, обнаруженных гидролокатором, будет, соответственно, «вероятность правильного распознавания объекта техногенного происхождения».

К классификационным признакам осадочных структур и объектов техногенного происхождения по информации, получаемой акустическим профилографом, относится, в первую очередь, выявление [7]:

- «нового» отражающего объекта в заданной акватории;
- регулярных (закономерных) особенностей в местоположении «нового» объекта;
- регулярных (закономерных) особенностей в форме «нового» объекта, свидетельствующих о техногенном происхождении объекта (подобие цилиндру, кубу, шару, схожесть с кораблем, подводной лодкой, летательным аппаратом и т. п.);
- слоистости определенного вида и «новых» расслоений в скальных основаниях.

Таким образом, в настоящее время актуальна классификация типов донного грунта и объектов техногенного происхождения при исследовании осадочных структур донного грунта в составе комплекса навигационно-гидрографических работ.

Цель статьи заключается в исследовании физико-механических характеристик объектов (осадочная структура донного грунта, объект техногенного происхождения), составляющих основу задачи классификации, а также в рассмотрении физических основ выполнения классификации при акустическом профилировании.

Основные физико-механические характеристики донного грунта. Преобладающая часть площади дна океана покрыта осадками различного происхождения, толщина которых колеблется от нескольких сантиметров до сотен метров. Это осадки рыхлые (ил, глина, илистый и глинистый

песок, водонасыщенный песок), полууплотненные (песок, мягко-пластичная глина, песчаная глина, рыхлый известняк) и уплотненные (цементированный известняк, каменный обломочный материал). На глубинах от 5 до 50 м преобладают рыхлые осадки, от 50 до 100 м – песчано-глинистые, свыше 500 м – плотные. Шельфовая зона мирового океана, составляющая 19.5 % его площади, в значительной части покрыта рыхлыми водонасыщенными осадками илисто-глинисто-песчаного типа с плотностью от 1050 до 1500 кг/м³ в приповерхностных слоях. Рыхлые осадки (особенно илисто-глинистого типа) имеют ярко выраженную тонкослоистость (от 10 до 30 см), обусловленную геологическими процессами осадконакопления, а также монотонный характер залегания по профилю [8].

Осадки содержат минеральные (а иногда и органические) частицы (гранулы), размер которых оказывает влияние на скорость распространения и поглощения звука в грунте. Донный грунт в реках представляет собой в большинстве так называемые наносы (за исключением выхода коренных пород). Гранулометрические и физические характеристики основных видов осадков Мирового океана для крупномасштабных форм рельефа представлены в [9]. Физико-акустические характеристики основных типов донного грунта представлены в таблице.

Физико-акустические характеристики донных грунтов
Physical and acoustic characteristics of bottom soils

Тип донного грунта	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Затухание волн, дБ/м · кГц
Ил газонасыщенный	1250	950	0.85
Ил жидкий	1475	1150	0.04
Ил глинистый	1455	1450	0.06
Ил с алевритом и песком	1445	1650	0.25
Песок мелкозернистый	1600	2000	0.30
Песок крупнозернистый	1515	2100	0.70
Глины	1600	2100	0.61
Скальный грунт	3600	2500	0.40

По данным многочисленных исследований донный осадочный материал – это двухфазная среда, состоящая из твердой фазы («скелета») и воды. Плотность твердых частиц практически постоянна для всех типов осадков (от 2600 до 2700 кг/м³), а их размер, т. е. гранулометрический состав, различен для разных типов осадков и может составлять менее 0.01 мм (для осадков глинистого типа). Плотность осадочного материала при этом

определяется объемной долей воды в нем, так называемой пористостью, которая определяется следующим образом [10]:

$$\Pi = \frac{(V - V_T)}{V} = 1 - V_0,$$

где V – общий объем; V_T – объем твердых частиц; $V_0 = V_T/V$ – объемная концентрация частиц.

Общая плотность смеси определяется выражением

$$\rho' = \rho_B \Pi + \rho_T (1 - \Pi),$$

где ρ_B – плотность воды; ρ_T – плотность частиц «скелета».

Под действием силы тяжести постепенно происходит уплотнение донных осадков, вытеснение из них воды. Свойства осадочного материала, попадающего в мировой океан, зависят от геологических, климатических условий на планете, событий в космическом пространстве. Поэтому донный грунт имеет слоистую структуру и представлен слоями с различной плотностью, нарастающей с глубиной.

Донные осадки часто содержат много органических веществ, которые в результате разложения обуславливают появление воздушных (газовых) пузырьков. Сжимаемость этих пузырьков на несколько порядков больше, чем жидкости и твердых частиц. Акустический импеданс осадков становится меньше акустического импеданса воды. Различие импедансов может быть настолько велико, что лишь малая часть звуковой энергии будет проникать в осадки, а остальная – возвращаться (отражаться и рассеиваться) обратно в воду, обуславливая так называемый береговой звон. При падении звуковой волны на пузырек он начинает принимать участие в процессах сжатия и разрежения. На определенной частоте возникает резонанс, когда колебания размеров пузырька достигают максимума и из падающей волны отбирается наибольшая доля энергии. Часть этой энергии превращается в теплоту (поглощается), оставшаяся часть рассеивается во всех направлениях. Особенность протекания этих процессов определяется частотой колебаний, размером пузырька, физических и термодинамических свойств сред, участвующих в этих процессах [11].

Резонансная частота пузырька f_{Π} определяется по формуле [10]

$$f_{\Pi} = \frac{3.26}{r_{\Pi}} \sqrt{1 + 0.0985h},$$

где r_{Π} – радиус пузырька; h – глубина погружения пузырька (от границы раздела сред «вода–дно»).

Скорость продольных волн в грунте можно вычислить по формуле

$$c_l = \sqrt{\frac{\chi}{\rho_T}},$$

где χ – коэффициент объемной упругости; ρ_T – плотность грунта.

При исследовании процессов отражения звука от грунта рассматривается не только продольная, но и поперечная составляющая c_t , т. е. скорость поперечных волн (не распространяющихся в жидкости), которая определяется следующим выражением:

$$c_t = \sqrt{\frac{G}{\rho_T}},$$

где $G = \frac{3(\rho_T c_{l,T}^2 - \chi)}{4}$ – модуль сдвига (жесткость); $c_{l,T}$ – скорость продольных волн.

Поперечные (сдвиговые) волны в грунте затухают гораздо быстрее продольных и потому в практических задачах гидроакустики почти не рассматриваются. Установлено, что вблизи границы раздела скорость звука в осадках и воде зависит почти одинаковым образом от давления, температуры и концентрации воздушных пузырьков. Для верхнего слоя осадков (в пределах 12 м) выявлена связь между основными акустическими параметрами грунта (см. таблицу).

Определение теоретических соотношений между представленными ранее параметрами грунта и скорости звука в нем затруднено из-за разнообразия состава грунта, пространственно-временной изменчивости его структуры и т. п.

Скорость акустических продольных волн в осадке связана с пористостью (а значит, и с плотностью). По данным, приведенным во многих источниках [10], при Π не менее 60 % скорость звука в осадке мало зависит от пористости, а ее значение отличается от скорости звука в воде на единицы процентов. Только при значениях пористости Π не более 60 % скорость звука начинает возрастать. На рис. 1 представлен график зависимости скорости звука в водонасыщенном грунте от плотности, где c_B – скорость звука в воде. Исключение составляют рыхлые газонасыщенные осадки, в которых скорость звука составляет от 500 до 1400 м/с.

В результате регрессивного анализа накопленного обширного экспериментального материала получено:

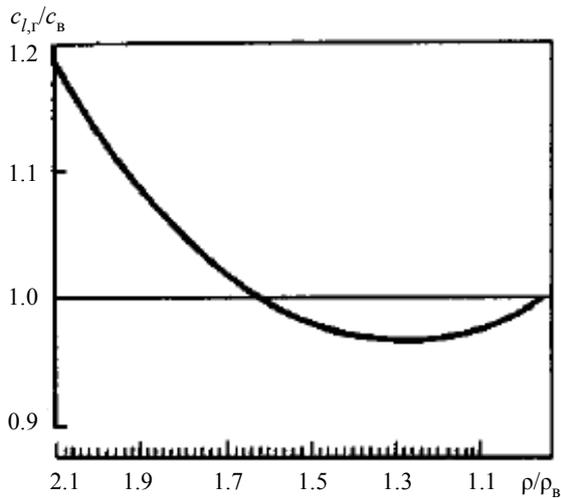


Рис. 1. Зависимость скорости звука в водонасыщенном грунте от плотности
Fig. 1. Dependence of the speed of sound in water-saturated soil on density

$$c_{l,\Gamma} = 2367 - 22.9\Pi^2 + 0.15\Pi^2,$$

$$c_{l,\Gamma} = 1874.4 - 68.16\varphi + 3.05\varphi^2,$$

$$c_{l,\Gamma} = 1616 + 90F_s - 200\Pi,$$

где $\varphi = -\log_2 2d$ – относительный диаметр частиц (φ -единицы) d в метрах; F_s – относительное содержание песчаной фракции.

При профилировании донного грунта поглощение энергии акустических колебаний в грунте обусловлено безвозвратными потерями, ухудшающими условия решения задачи классификации. Имеется ряд теоретических работ, в которых рассмотрены различные механизмы потерь и получены аналитические выражения, связывающие коэффициент поглощения с физическими и физико-механическими характеристиками (таблица) донного грунта для некоторых идеализированных моделей.

В диапазоне 1 Гц ... 100 кГц поглощение связано с потерями в минеральном скелете грунта и в воде, движущейся относительно скелета. В гранулированных грунтах (песок, алевроит) потери обусловлены, в основном, трением на контактах зерен. В осадках с более мелкими частицами (глина, ил, илистая глина) потери при малых деформациях скелета порождаются рядом процессов, зависящих от скорости смещения и обусловлены электрохимической связью между частицами. В грунтах сложного гранулометрического состава, содержащих песок и глину, а также в цементированных или твердых грунтах наблюдаемые эффекты обусловлены комбинацией трения и процессов, зависящих от скорости.

Таким образом, к влияющим акустическим характеристикам донной среды, в которой распространяются упругие колебания, относятся скорость звука c , плотность ρ , коэффициент поглощения β . Знание этих характеристик, полученных при профилировании, позволяет выполнить классификацию и интерпретацию отражающих слоев и определить мощность каждого из них.

Физические основы классификации типов донного грунта. При зондировании донного грунта, амплитуда эхосигналов, отраженных от поддонных осадочных структур, определяется значением межслойного коэффициента отражения R_i , и пропорциональна изменению импеданса вещества $R_i = \rho_i c_i$ [12]:

$$R_i = \frac{Z_{i+1} - Z_i}{Z_{i+1} + Z_i},$$

где Z_{i+1} , Z_i – импедансы последующего ($i+1$)-го и i -го слоев; ρ_i – плотность слоя; c_i – скорость звука в слое.

Незначительное изменение скорости звука в осадках, исследуемых с помощью гидроакустического профилирования, дает основание связывать амплитуду эхосигналов в основном с изменениями плотности осадка. Это правило служит основой количественного анализа эхосигналов от поддонных слоев для восстановления динамики изменений плотности осадочных структур с глубиной и выполнения автоматизированной классификации типа грунта с использованием данных о его свойствах, приведенных в таблице.

Анализ амплитуд эхо-сигналов и их спектра позволяет оценить акустические характеристики грунта, на основании которых рассчитываются классификационные признаки, позволяющие отнести тип грунта к одному из четырех классов.

Для построения устойчивого алгоритма послойной классификации в системе признаков описаний, необходимо определить классификационные признаки, которые наиболее тесно связаны с физическими свойствами донных грунтов и для которых получен наиболее представительный экспериментальный материал. К ним могут быть отнесены [13]:

- абсолютный коэффициент отражения;
- коэффициент акустической восприимчивости;
- коэффициент шероховатости;
- коэффициент затухания;
- восстановленная плотность.

Количественный анализ эхо-сигнала заключается в оценке амплитуд сигналов (пиков огибающей эхо-трассы), отраженных от границы раздела сред «вода–дно» и поддонных слоев, и последующем восстановлении нарастающего импеданса (плотности) по разрезу.

Проходя через границу слоев, звуковая волна испытывает отражение и преломление, часть энергии отражается, остальная проходит в слой (рис. 2).

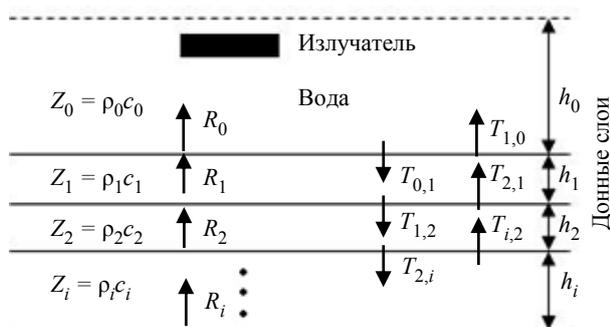


Рис. 2. Коэффициенты отражения и прохождения в структуре донного грунта

Fig. 2. Reflection and transmission coefficients in the structure of the bottom soil

На рис. 2 показаны $T_{0,1}$, $T_{1,2}$, $T_{2,i}$, $T_{1,0}$, $T_{2,1}$, $T_{i,2}$ – коэффициенты прохождения из последующего слоя в предыдущий и обратно; h_0 , h_1 , h_2 , h_i – толщины слоев донной структуры.

Коэффициенты прохождения $T_{1,2}$, $T_{2,1}$ из предыдущего слоя в последующий и из последующего слоя в предыдущий [14]:

$$T_{1,2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad T_{2,1} = 2 - T_{1,2}.$$

Коэффициент отражения в откалиброванной системе профилирования, имеющей достоверную информацию об амплитуде излучаемых импульсов с учетом линейного закона спада амплитуды (расширения фронта волны) от донной границы, полагаем равным амплитуде первого пика огибающей. В таком случае импеданс первого слоя определяется следующим образом:

$$Z_1 = Z_0 \frac{1 + R_1}{1 - R_1}.$$

Абсолютный коэффициент отражения i -го слоя для всех последующих сигналов может быть найден на основе локальных коэффициентов отражения последовательно

$$R_i = A_i \prod_{k=1}^{i-1} (K_{h_i} T_{k-1,k} T_{k,k-1}),$$

$$Z_i = Z_0 \prod_{k=1}^i \frac{1 + R_k}{1 - R_k};$$

$$T_{i-1,i} = \frac{2Z_i}{Z_{i-1} + Z_i}; \quad T_{i,i-1} = 2 - T_{i-1,i},$$

где A_i – амплитуда эхо-сигналов; $K_{h_i} = 2h_i / K_{\Pi}$ – коэффициент учета геометрии расхождения фронта волны при приеме и излучении; K_{Π} – коэффициент амплитудной поправки.

Коэффициент K_{h_i} необходим для восстановления реальной динамики изменения амплитудных значений эхо-сигналов и для обеспечения коррекции амплитуд с учетом текущих параметров приемоизлучающей аппаратуры.

Таким образом, выполняя последовательный расчет от первого слоя (сигнального пика) слоистой структуры (рис. 2), можно восстановить послойные значения импедансов по разрезу и абсолютных коэффициентов отражения от поддонных слоев, т. е. значения коэффициентов отражения каждого слоя, приведенные к воде.

Учитывая, что скорость звука в рыхлых водонасыщенных осадках близка к скорости звука в воде, на основании полученных по разрезу значений R_i может быть последовательно восстановлена кажущаяся плотность ρ_i по разрезу донного грунта

$$\rho_i = (\rho_{i-1}) \frac{1 + R_i}{1 - R_i},$$

где ρ_{i-1} – значение кажущейся плотности с номером $i-1$.

При вычислении значений ρ_i используется геоакустическая модель среды, разработанная применительно к рыхлым водонасыщенным донным грунтам.

Затухание звука в грунте линейно зависит от его частоты. При взаимодействии широкополосного сигнала с грунтом возникают частотные искажения (сдвиг центральной частоты), которые можно использовать для расчета коэффициента затухания. На основе значений сдвига центральной частоты f_p рассчитывается время релаксации t_r по эмпирической формуле

$$t_r = (5.5 \cdot 10^{-9}) f_p.$$

Затухание в слое осадков и потери амплитуды сигнала можно оценить, используя функцию передачи среды $H(f)$:

$$H(f) = e^{-2\pi^2 f_p^2 t_r},$$

где t – время распространения акустического импульса в слое, с.

Затухание в грунте используется для уточнения оценок импеданса слоев, а также как самостоятельный классификационный признак. При определении классификационных признаков необходимо знать значение отклика среды на возмущение импульсом упругой волны, характеризующегося коэффициентом акустической восприимчивости K_B .

Коэффициент акустической восприимчивости разреза донных отложений определяется как отношение суммы глубинных эхо-сигналов к поверхностному (первому) сигналу по формуле

$$K_B = \frac{\sum A_i}{A_1},$$

где A_1 – значение первой амплитуды сигнала в трассе длиной i .

Наравне с оценкой коэффициента акустической восприимчивости необходимо знать информацию о степени неровности на границе «вода–дно», которая приводит к появлению некогерентной составляющей в эхо-сигнале и дисперсии его уровня.

Коэффициент шероховатости K_0 необходим для оценки шероховатости границы, которая выполняется при помощи анализа флуктуаций, возникающих в значениях коэффициента отражения в каждом цикле измерения, и характеризуется выражением [15]:

$$K_s = \frac{|R_i - \overline{R_i}|}{\overline{R_i}} \cdot 100,$$

где $\overline{R_i}$ – среднее значение коэффициента отражения донного сигнала, полученное по серии зондирований.

В результате комплексного анализа классификационных признаков с учетом особенностей литологической структуры донных грунтов удается разделить морские осадки на четыре основные литологические группы: илы, глины, пески, скальный грунт. Исходное стратифицированное гидролокационное изображение слоев донного грунта, для которых выполнялась классификация, приведено на рис. 3.

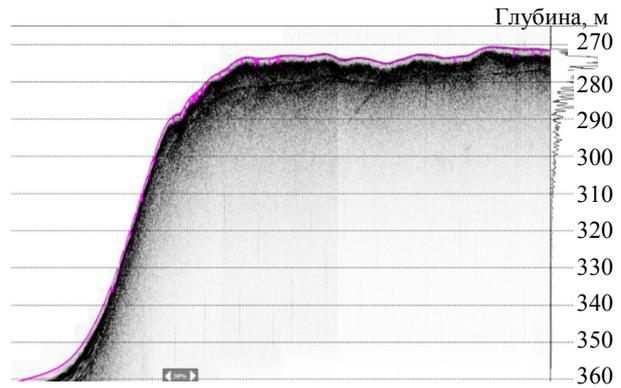


Рис. 3. Гидролокационное изображение (профилограмма) слоев донного грунта
Fig. 3. Sonar image (profilogram) of bottom soil layers

Классифицированное гидролокационное изображение слоев донного грунта представлено на рис. 4.

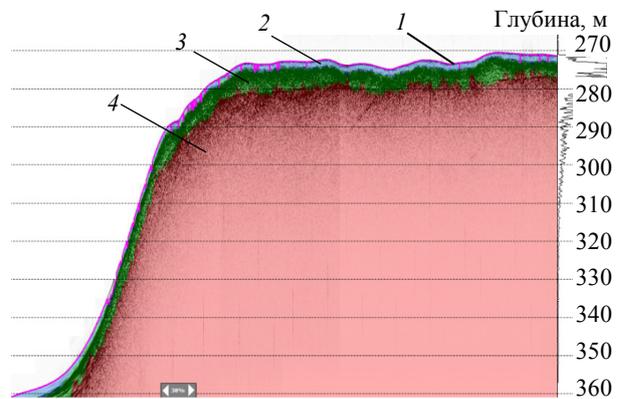


Рис. 4. Профилограмма классифицированных слоев донного грунта

Fig. 4. Profilogram of classified layers of bottom soil

Профилограммы на рис. 3, 4 построены в координатах «пройденный путь–глубина». По оси ординат отмечена глубина залегания слоев донного грунта в метрах.

Как уже было сказано, классификация выполняется по четырем литологическим группам, которым присваивается определенный цвет в соответствии с принятым вариантом его кодирования.

На рис. 4 линия 1 профиля соответствует границе раздела сред «вода–дно». Верхний слой донного грунта – ил 2, затем осадочная порода глина 3, скальное основание 4.

Поиск объектов техногенного происхождения. Затонувшие объекты техногенного происхождения, содержащие материалы с высокой удельной плотностью (металлы), погружаются в донный грунт либо под действием силы тяжести, или зарываются в грунт при падении. При погру-

жении объекта текущие рыхлые осадки покрывают место его падения и скрывают объект от поисковых гидроакустических средств площадного обследования дна. Погрузившиеся в грунт объекты (миноподобные, трубы, кабели и т. д.) вызывают нарушение естественной геологической слоистости донного грунта, превосходящее по размерам сам объект, что может выступать в качестве одного из критериев, определяющих вероятное местоположение объекта в грунте [16].

Наибольший интерес при поиске объектов техногенного происхождения представляет задача классификации миноподобных объектов. Трудность представляет обнаружение и уничтожение мин минувших войн, как якорных, так и донных, погребенных в грунте.

Глубина погружения мины в грунт обусловлена как целым рядом факторов геологического характера (скорость осадконакопления, тип донного грунта), так и условиями постановки мины.

В настоящее время задача поиска и обнаружения миноподобных объектов в толще донного грунта остается весьма актуальной.

Минное оружие представляет собой контейнер взрывчатого вещества сферической или цилиндрической формы. При поиске и обнаружении мин гидроакустическими средствами решается обратная задача акустики – по регистрируемому эхо-сигналу восстанавливаются характеристики объекта отражения.

Основным условием обнаружения малоразмерного объекта, погруженного в грунт, служит соотношение уровней эхосигналов от объекта и окружающего грунта. Эхосигнал от малоразмерного заиленного объекта будет обнаружен, если его амплитуда превысит амплитуды эхосигналов от окружающих его слоев грунта. Таким образом, подобно коэффициенту отражения от слоя грунта, малоразмерному объекту можно присвоить собственный коэффициент отражения, который не

будет таковым в строгом смысле (в соответствии с импедансом вещества), но определит общую отражательную характеристику, которую можно сопоставить с отражательными свойствами слоев грунта в принятых в профилировании понятиях.

Интерес обнаружения представляют сферические или цилиндрические протяженные (трубы, кабели) объекты, пересекающие линию движения носителя. Амплитуда сигнала, отраженного от такого объекта, одинакова для разных углов прихода акустического импульса и объект обнаруживается за его пределами на наклонной дальности при освещении его спадающими краями характеристики направленности антенны на подходе к объекту и после пересечения. В результате при проходе над объектом по серии зондирований изображение объекта сопровождается параболой (рис. 5) (объект на ее вершине), существенно превышающей размеры объекта и способствующей его обнаружению.

При взаимодействии акустического излучения со сферической или цилиндрической оболочкой мины возникает эффект резонансного переизлучения, который обусловлен соотношением толщины оболочки d и ее радиуса r , а также зависит от рабочей частоты акустического облучения f и скорости продольных волн в оболочке c_2 и вмещающей среде c_1 . Амплитуда локального коэффициента отражения k_2 определяется материалом, из которого изготовлена оболочка,

$$k_2 = f_1(d, r, f, c_1, c_2).$$

Характеристика обнаружения мины в толще грунта будет определяться соотношением

$$\frac{k_2}{k_1} = f_2(z_1, z_2),$$

где k_1 – коэффициент отражения от вмещающей среды; z_1, z_2 – импедансные характеристики вмещающей среды и оболочки мины.

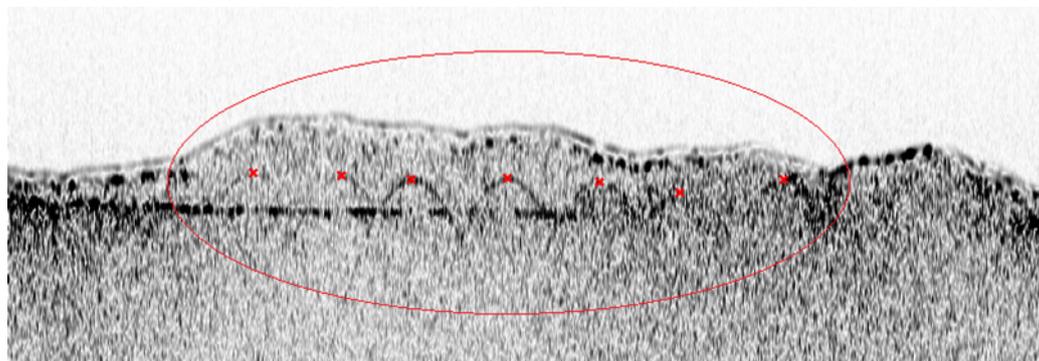


Рис. 5. Профилограмма с обнаруженными трубопроводами
Fig. 5. Profilogram with detected pipelines

При $k_2/k_1 \rightarrow 1$ вероятность обнаружения мины резко уменьшается. Однако следует учитывать, что k_2 – это частотно зависящая величина. Поэтому изменение частоты f позволяет изменить соотношение k_2/k_1 , что возможно при использовании широкополосных акустических излучателей в составе гидроакустического комплекса.

Под действием собственного веса мина может погружаться в грунт. При этом глубина погружения мины будет зависеть от слоистости донного грунта и распределения плотности по толще стратифицированного грунта. Нарушение естественной геологической слоистости донного грунта может выступать в качестве одного из критериев, определяющих вероятное положение мины в грунте. Глубина проникновения мины в грунт зависит от типа донного грунта и для слабосвязанных илистых грунтов на мелководье может достигать 10...20 м [17].

Для эффективного решения задачи поиска и обнаружения миноподобных объектов в толще донного грунта необходимы сведения по серии параллельных профилей. При этом расстояние между соседними профилями не должно превышать размеры объекта, подлежащего обнаруже-

нию. Эту задачу можно решить только многолучевым профилированием при выполнении площадной грунтовой съемки.

Заключение. Таким образом, влияющими акустическими характеристиками донной среды, в которой распространяются упругие колебания, являются скорость звука c , плотность ρ , коэффициент поглощения β . Знание этих характеристик, полученных при профилировании, позволяет классифицировать и интерпретировать отражающие слои и определить «мощность» каждого из них. Амплитуда отраженных эхосигналов определяется коэффициентом отражения, который в свою очередь определяется импедансами слоев. Ввиду того, что скорость звука в осадочных слоях донного грунта изменяется мало (таблица), то для выполнения классификации типа слоя по амплитудам отраженных эхосигналов целесообразно их связывать с изменениями плотности слоя.

При решении задачи классификации объектов техногенного происхождения в процессе профилирования донного грунта для эффективного и производительного поиска и обнаружения таких объектов целесообразно использовать многолучевой акустический профилограф донного грунта.

Список литературы

1. Современное состояние проблем освоения твердых минеральных ресурсов дна морей и океанов / В. П. Дробаденко, Г. Н. Малухин, О. А. Луконина, И. Н. Салахов // Горный информационно-аналитический бюл. 2021. № 3. С. 99–109.
2. Каширский А. С., Кириченко Ю. В. Мировой океан – последний резерв человечества // Горные науки и технологии. 2017. № 1. С. 67–74.
3. Колосков Е. Н., Фирсов Ю. Г. Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопрооявления в Северных морях России // Вестн. ГУМиРФ им. адм. С. О. Макарова. 2015. № 3(31). С. 54–62.
4. Нестеров Н. А. Некоторые аспекты технологии гидролокационного поиска донных объектов // Навигация и гидрография. 2014. № 38. С. 57–65.
5. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н. П. Лаверов, Ю. В. Рослов, Л. И. Лобковский, А. В. Тулупов, М. А. Воронов, О. Ю. Ганжа // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4(4). С. 4–13.
6. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 409 с.
7. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars / X. Lurton, G. Lamarche, C. Brown, V. Lucieer, G. Rice, A. Schimmel, T. Weber // Geophys. 2019. № 9. P. 112–135.
8. Воловов В. И. Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993. 272 с.
9. Богородский А. В., Островский Д. Б. Гидроакустические навигационные и поисково-обследовательские средства. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 244 с.
10. Гидролокационные системы вертикального зондирования дна / В. Барник, Г. Вендт, Г. П. Каблов, А. Н. Яковлев. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. ун-та, 1992. 217 с.
11. Острианский Е. А., Войтов А. А., Свечников А. И. Классификация грунтов с помощью первого отечественного ЛЧМ-профилографа высокого разрешения // Навигация и гидрография. 2000. № 10. С. 108–113.
12. Урик Р. Дж. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
13. Острианский Е. А., Свечников А. И. Дистанционная послыная классификация донных грунтов акустическим методом // Навигация и гидрография. 2000. № 10. С. 103–108.
14. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 340 с.
15. Информационная гидроакустика: методы информационного обеспечения гидроакустическими средствами / А. В. Вагин, А. А. Войтов, А. А. Волкова, Л. Е. Гампер, В. И. Ермолаев, С. В. Ерошенко, Н. С. Каришнев, А. Д. Консон, В. З. Кранц, Е. А. Острианский, Д. Б. Островский, С. Н. Потапычев, И. А. Селезнев, О. П. Сопина; под общ. ред. А. Д. Консона. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. 368 с.

16. Вагин А. В., Воротынцева А. С. Автономный необитаемый подводный аппарат для поиска, обнаружения и уничтожения миноподобных объектов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 4. С. 5–15.

17. Свечников А. И. Обобщенная модель донного грунта при решении гидрографических задач // Навигация и гидрография. 1998. № 6. С. 65–68.

Информация об авторе

Вагин Антон Владимирович – ассистент кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: av.vagin@bk.ru

References

1. Sovremennoe sostojanie problem osvoenija tverdyh mineral'nyh resursov dna morej i okeanov / V. P. Drobabenko, G. N. Maluhin, O. A. Lukonina, I. N. Salahov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjul. 2021. № 3. S. 99–109. (In Russ.).

2. Kashirskij A. S., Kirichenko Ju. V. Mirovoj okean – poslednij rezerv chelovechestva // Gornye nauki i tehnologii. 2017. № 1. S. 67–74. (In Russ.).

3. Koloskov E. N., Firsov Ju. G. Primenenie sovremennyh gidrograficheskikh tehnologij dlja izuchenija rel'efa i donnogo gazoprojavenija v Severnyh morjah Rossii // Vestn. GUMiRF im. adm. S. O. Makarova. 2015. № 3(31). S. 54–62. (In Russ.).

4. Nesterov N. A. Nekotorye aspekty tehnologii gidrolokacionnogo poiska donnyh ob#ektov // Navigacija i gidrografija. 2014. № 38. S. 57–65. (In Russ.).

5. Perspektivy donnoj sejsmorazvedki v Rossijskoj Federacii / N. P. Laverov, Ju. V. Roslov, L. I. Lobkovskij, A. V. Tulupov, M. A. Voronov, O. Ju. Ganzha // Arktika: jekologija i jekonomika. 2011. № 4(4). S. 4–13. (In Russ.).

6. Korjakin Ju. A., Smirnov S. A., Jakovlev G. V. Korabel'naja gidroakusticheskaja tehnika. Sostojanie i aktual'nye problemy. SPb.: Nauka, 2004. 409 s. (In Russ.).

7. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars / X. Lurton, G. Lamarche, C. Brown, V. Lucieer, G. Rice, A. Schimel, T. Weber // Geophys. 2019. № 9. P. 112–135.

8. Volovov V. I. Otrazhenie zvuka ot dna okeana. M.: Nauka, 1993. 272 s. (In Russ.).

9. Bogorodskij A. V., Ostrovskij D. B. Gidroakusticheskie navigacionnye i poiskovo-obsledovatel'skie sredstva. SPb: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2009. 244 s. (In Russ.).

10. Gidrolokacionnye sistemy vertikal'nogo zondirovanija dna / V. Barnik, G. Vendt, G. P. Kablov, A. N. Jakovlev. Novosibirsk: Izd-vo Novosib. gos. un-ta, 1992. 217 s. (In Russ.).

11. Ostrijanskij E. A., Vojtov A. A., Svechnikov A. I. Klassifikacija gruntov s pomoshh'ju pervogo otechestvennogo LChM-profilografa vysokogo razreshenija // Navigacija i gidrografija. 2000. № 10. S. 108–113. (In Russ.).

12. Urik R. Dzh. Osnovy gidroakustiki. L.: Sudostroenie, 1978. 448 s. (In Russ.).

13. Ostrijanskij E. A., Svechnikov A. I. Distancionnaja poslojnaja klassifikacija donnyh gruntov akusticheskim metodom // Navigacija i gidrografija. 2000. № 10. S. 103–108. (In Russ.).

14. Brehovskih L. M. Volny v sloistyh sredah. M.: Nauka, 1973. 340 s. (In Russ.).

15. Informacionnaja gidroakustika: metody informacionnogo obespechenija gidroakusticheskimi sredstvami / A. V. Vagin, A. A. Vojtov, A. A. Volkova, L. E. Gamper, V. I. Ermolaev, S. V. Eroshenko, N. S. Karishnev, A. D. Konson, V. Z. Kranc, E. A. Ostrijanskij, D. B. Ostrovskij, S. N. Potapchev, I. A. Seleznev, O. P. Sopina; pod obshh. red. A. D. Konsona. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2023. 368 s. (In Russ.).

16. Vagin A. V., Vorotynceva A. S. Avtonomnyj neobitaemyj podvodnyj apparat dlja poiska, obnaruzhenija i unichtozhenija minopodobnyh ob#ektov // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2023. Т. 16, № 4. С. 5–15. (In Russ.).

17. Svechnikov A. I. Obobshhennaja model' donnogo grunta pri reshenii gidrograficheskikh zadach // Navigacija i gidrografija. 1998. № 6. С. 65–68. (In Russ.).

Information about the author

Anton V. Vagin – Assistant of the Department of Electroacoustics and Ultrasound Technology, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: av.vagin@bk.ru

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; принята к публикации после рецензирования 16.01.2025; опубликована онлайн 28.03.2025.

Submitted 05.11.2024; accepted 16.01.2025; published online 28.03.2025.