

Научная статья
УДК 004.056.2
EDN KDFFTZ

Спектральные особенности гидроакустических сигналов

А. В. Неруш *, Н. А. Тузов, И. Н. Карцан

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Севастополь, Россия
* e-mail: nerush03@mail.ru

Аннотация

Анализируются спектральные и временно-частотные характеристики гидроакустических сигналов животного и антропогенного происхождения, а также фоновые сигналы с целью их классификации и идентификации для решения задач экологического мониторинга морской среды и разработки эффективных критериев дифференциации сигналов для автоматизированной оценки акустической обстановки в прибрежных и шельфовых зонах. Использованы методы спектрального и временно-частотного анализа, а также сравнительного анализа на основе обзора современной научной литературы. Выделены характерные особенности спектров и спектrogramм для различных групп источников сигналов. Проведена классификация сигналов по типу акустического происхождения, определены ключевые параметры идентификации сигнала в условиях высокой шумовой нагрузки – форма спектров, наличие гармоник, длительность импульсов и специфические временные паттерны. Сформирован набор признаков в виде числовых векторов для последующего применения в алгоритмах машинного обучения и системах автоматического распознавания. Разработанный подход может быть интегрирован в системы экологического мониторинга прибрежных акваторий и перспективные навигационные решения.

Ключевые слова: всплеск, гармоника, идентификация сигналов, естественный шум, техногенный шум, импульс, широкополосность, акустический сигнал, спектр

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-20070, <https://rscf.ru/project/24-21-20070/>.

Для цитирования: Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н. Спектральные особенности гидроакустических сигналов // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2025. № 3. С. 128–140. EDN KDFFTZ.

© Неруш А. В., Тузов Н. А., Карцан И. Н., 2025



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Spectral Features of Hydroacoustic Signals

A. V. Nerush *, N. A. Tuzov, I. N. Kartsan

FSAEI HPE «Sevastopol State University», Sevastopol, Russia

* e-mail: nerush03@mail.ru

Abstract

The paper analyses spectral and time-frequency characteristics of hydroacoustic signals of animal and anthropogenic origin, as well as background signals. The study aims to classify and identify these signals to address ecological monitoring tasks in the marine environment and to develop effective criteria for signal differentiation for automated assessment of the acoustic situation in coastal and shelf zones. We used methods of spectral and time-frequency analysis along with comparative analysis based on a review of current scientific literature. Characteristic features of spectra and spectrograms for various groups of signal sources were identified. Signals were classified according to their acoustic origin, and key parameters for signal identification under high noise conditions were determined, including spectral shapes, presence of harmonics, pulse durations, and specific temporal patterns. A feature set in the form of numerical vectors was created for subsequent application in machine learning algorithms and automatic recognition systems. The developed approach can be integrated into ecological monitoring systems for coastal waters and advanced navigation solutions.

Keywords: spike, harmonic, sound localization, hydroecholocation, identification, natural noise, technogenic noise, pulse, broadband

Acknowledgements: This study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant № 24-21-20070, <https://rscf.ru/project/24-21-20070/>

For citation: Nerush, A.V., Tuzov, N.A. and Kartsan, I.N. Spectral Features of Hydroacoustic Signals, 2025. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 128–140.

Введение

Гидроакустические системы мониторинга подводного пространства занимают ключевое место в современной морской науке и технике, обеспечивая эффективное исследование и контроль океанской среды. Развитие таких систем обусловлено необходимостью получения точных и своевременных данных о состоянии подводной среды, которые играют важную роль как для научных исследований, так и для обеспечения безопасности морских операций¹⁾. Современные гидроакустические технологии, основанные на методах цифровой обработки сигналов и спектрального анализа, позволяют идентифицировать и классифицировать различные источники звука под водой с высокой степенью точности, что становится критичным в задачах подводной навигации, связи и экомониторинга [1, 2].

¹⁾ Захаров И. С. Развитие отечественных гидроакустических средств: начало 20-х годов – конец 50-х годов XX века : дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 2004. 390 с.

Исторически развитие отечественных гидроакустических средств берет начало с середины XX в., когда были заложены фундаментальные основы исследования акустических сигналов в водной среде. Последующие десятилетия, особенно конец XX – начало XXI в., ознаменовались значительным прогрессом в области спектрального и временно-частотного анализа гидроакустических данных, что позволило существенно повысить эффективность обработки и интерпретации сигналов [3]. Современные исследования активно развиваются в направлении оптимизации алгоритмов обработки, включая применение дискретного и быстрого преобразования Фурье, векторно-фазовых и траекторно-пространственных методов фильтрации, направленных на улучшение выделения информативных признаков источников шума и повышения точности определения их координат и направленности [4, 5].

Несмотря на широкий спектр специализированных методов анализа гидроакустических сигналов, большинство из них предназначены для решения узкоспециализированных задач и ограничены применением к конкретным классам источников звука. В частности, существующие методы часто недостаточно эффективны для унифицированного описания спектральных характеристик различных по природе и происхождению сигналов, включая как техногенные, так и биоакустические источники. Это создает пробел в технологиях цифровой обработки и затрудняет расширение применения гидроакустических систем в новых областях, таких как автоматический экомониторинг морских экосистем и комплексная классификация подводных объектов [2, 4–6].

Рост антропогенного воздействия на подводную среду и увеличение объема данных от подводных источников требуют разработки прецизионных методов анализа и идентификации акустических сигналов, способных повысить надежность систем подводной навигации и коммуникации [1, 3, 7]. Особую актуальность приобретают задачи экологического мониторинга, в которых необходимо одновременно регистрировать и анализировать как биоакустические сигналы, так и техногенные шумы, что усложняет интерпретацию акустической обстановки.

Хотя в последние годы были предложены эффективные алгоритмы обработки гидроакустических сигналов, включая оптимизированные методы Фурье-анализа [4] и векторно-фазовые подходы [8, 9], они, как правило, ориентированы на узкий круг задач и не обеспечивают комплексного описания как спектральных, так и временно-частотных особенностей разнородных сигналов. Отсутствие универсальных методов, позволяющих единообразно описывать сигналы разной природы, ограничивает возможности интеграции данных в системах экологического мониторинга и навигации [9–12].

Целью настоящего исследования является системный анализ спектральных и временно-частотных характеристик разнородных гидроакустических сигналов с акцентом на выявление уникальных признаков, обеспечивающих надежную идентификацию и классификацию источников. Предлагаемый подход направлен на создание унифицированного описания спектральных свойств техногенных и биоакустических сигналов, что позволит расширить область применения стандартных методов цифровой обработки и повысить точность и универсальность гидроакустических систем мониторинга.

Материал и методы

Первая стадия исследования включала сбор и фильтрацию данных. Анализируемые сигналы были взяты из открытой базы гидроакустических записей *AXDS Portals*, содержащей данные, зарегистрированные с помощью донных станций, гидрофонов и других датчиков, установленных в прибрежных и океанических районах²⁾. Записи выполнены в формате *WAV* с частотой дискретизации от 4 до 64 кГц в зависимости от типа источника и оборудования. Для анализа выбраны звуковые фрагменты длительностью от 5 до 60 с, представляющие типичные образцы каждого класса сигналов – биологических, антропогенных и природных фоновых шумов. Общее число независимых реализаций каждого типа сигнала составило 20–30 записей, что позволило получить усредненные спектры с приемлемой статистической устойчивостью.

Записанные сигналы проходили предварительную обработку для устранения внешних помех и артефактов, связанных с техническими ограничениями оборудования. Использовались методы цифровой фильтрации для извлечения значимых частотных диапазонов и минимизации влияния шумового фона [3].

Для выявления основных частотных компонентов каждого сигнала применялось быстрое преобразование Фурье. Используемый метод позволил получить спектры мощности, которые характеризуют распределение энергии сигнала по частотам. Спектром сигнала считается совокупность амплитуд и начальных фаз гармонических колебаний кратных частот, сумма которых соответствует исходному сигналу. Спектры анализировали для определения доминирующих частот, гармоник и общих паттернов, присущих конкретным группам сигналов. Основой спектрального анализа являлось дискретное преобразование Фурье, которое для дискретного сигнала $x[n]$ длиной N отсчетов определяется по формуле

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j \frac{2\pi k n}{N}},$$

где $k = 0, 1, \dots, N - 1$ – индекс частоты.

Для изучения изменений спектральной структуры во времени применяли методы частотно-временного анализа, включая построение спектограмм – это позволило выделить уникальные временные структуры, такие как периодичность всплесков, длительность импульсов и динамику затухания громкости сигнала.

На основе полученных данных проводили сравнительный анализ сигналов разных типов для выявления уникальных особенностей, позволяющих различать сигналы животного и антропогенного происхождения, также фоновые природные шумы. Ключевыми параметрами стали форма спектров, наличие гармоник, длительность импульсов и специфические временные паттерны. Приведенные спектры отражают типичные характеристики каждого класса сигналов, однако не учитывают всей вариабельности, связанной с различиями между видами живых существ, сезонными и гидрометеорологическими условиями, а также особенностями моделей технических устройств.

²⁾ URL: <https://help.axds.co/portals/overview.html#data-views-overview> (date of access: 22.08.2025).

Алгоритм анализа спектров и спектрограмм включал выполнение преобразования Фурье, построение спектрограммы, анализ пиковых частот, оценку ширины полосы сигнала, вычисление спектрального центроида для выявления периодичностей и анализ автокорреляционной функции сигнала [4].

Для дальнейшего использования в алгоритмах машинного обучения были сформированы формализованные спектральные и временные признаки (доминирующая частота, ширина диапазона, амплитудные параметры гармоник и др.), представленные в виде числовых векторов, которые могут служить входными признаками для алгоритмов машинного обучения [5]. Эти характеристики предназначены для решения задач классификации гидроакустических сигналов по типам источников, включая биоакустические и антропогенные шумы. Такие шумы демонстрируют в своей спектральной картине структурированность и воспроизводимость, что позволяет использовать их в составе обучающих выборок для построения моделей распознавания без необходимости ручной разметки исходных сигналов.

Для реализации всех этапов анализа использовали универсальные программные инструменты, включающие функции цифровой обработки сигналов (*MATLAB*, *Python*) и средства визуализации данных. Достоверность результатов оценивали методами кросс-валидации, предполагающими многократное разделение выборки на обучающие и тестовые подмножества, что позволило минимизировать влияние случайных факторов при анализе.

Эффективность разработанных методов проверяли на независимых наборах данных из общедоступной базы *AXDS Portals*, содержащей достоверно идентифицированные примеры исследуемых типов шумов, что подтвердило их применимость для широкого спектра задач по идентификации гидроакустических сигналов²⁾.

Результаты и обсуждение

Сигналы «Лай морского льва» и «Пение косатки» представляют собой примеры животных звуков со сравнительно высокой степенью сложности частотной структуры [6, 7]. Спектр сигнала «Лай морского льва» (рис. 1, *a*) демонстрирует наиболее выраженный пик на частоте около 400 Гц, достигающий значения 1.93 спектральной плотности мощности. Затухающие всплески на частотах 60 и 330 Гц указывают на наличие гармоник, придающих звуку характерный низкий тембр, что звучит как хриплое гавканье.

В спектрограмме сигнала (рис. 1, *b*) отчетливо видна концентрация основной энергии звука в низкочастотном диапазоне.

Спектр сигнала «Пение косатки» (рис. 2, *a*) представляет собой график с наиболее четкой структурой сигнала по сравнению с другими рассмотренными в исследовании сигналами. Сигнал охватывает широкий диапазон частот, что свидетельствует о сложной гармонической структуре и разнообразии акустических элементов в вокализациях косаток. Здесь наблюдается множество пиков в диапазоне от 0 до 11 кГц, наиболее выраженные из них – на частотах 1.3, 2 и 2.1 кГц. Такие частотные компоненты сигнала обусловлены коммуникацией и ориентированием в окружающей среде [6].

Спектрограмма сигнала (рис. 2, *b*) характеризуется множеством ярких полос, расположенных в полосе от 0 до 11 кГц. Высокочастотные компоненты

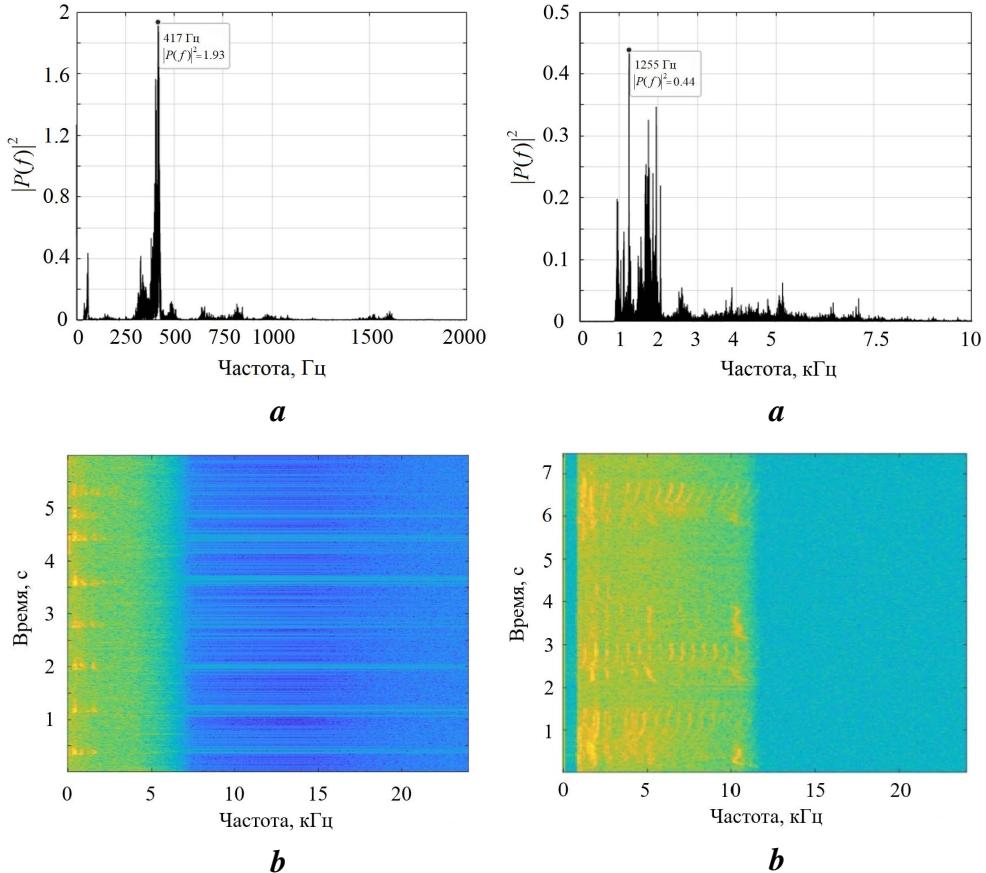


Рис. 1. Спектральный анализ сигнала «Лай морского льва»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 1. Spectral analysis of the *Sea Lion Barking* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

Рис. 2. Спектральный анализ сигнала «Пение косатки»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 2. Spectral analysis of the *Killer whale singing* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

проявляются как дополнительные вертикальные полосы, демонстрирующие широкополосность сигнала.

Сигналы «Взрыв» и «Гидролокатор» характеризуются четкими узкополосными пишевыми частотами. Сигнал «Взрыв» имеет отличное от сигнала «Гидролокатор» распределение мощности по частотам, что показано как на полученном спектре (рис. 3, *a*), так и на спектрограмме (рис. 3, *b*). Максимальное значение спектральной плотности мощности (0.88) зафиксировано в диапазоне 140–180 Гц [8, 9].

Спектр сигнала «Гидролокатор» (рис. 4, *a*) демонстрирует серию узкополосных пиков в диапазоне от 2.3 до 3.3 кГц. На спектрограмме (рис. 4, *b*) они проявляются как повторяющиеся яркие горизонтальные полосы. Их периодичность, постоянная ширина и интенсивность подчеркивают стабильность

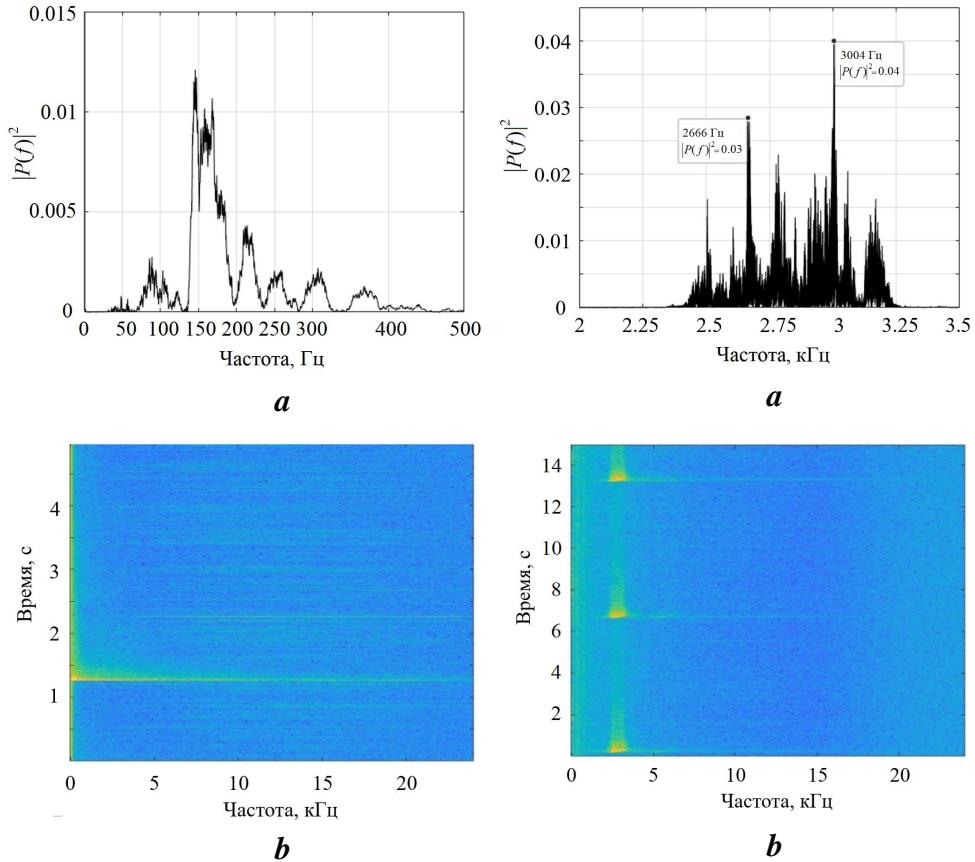


Рис. 3. Спектральный анализ сигнала «Взрыв»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 3. Spectral analysis of the *Explosion* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

Рис. 4. Спектральный анализ сигнала «Гидролокатор»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 4. Spectral analysis of the *Sonar* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

и предсказуемость использованного сигнала. Такая композиция частот характерна для сигналов, используемых гидролокационными устройствами [9].

Описанная структура позволяет идентифицировать данный тип сигналов. В частности, устойчивые частотные пики позволяют точно определить источник сигнала. Так, пик мощности на частоте 3 кГц служит одним из ключевых индикаторов активности гидролокатора, поскольку такой частотный диапазон не характерен для естественных источников звука. В отличие от кратковременного сигнала взрыва, гидролокатор генерирует стабильное излучение, что позволяет проводить его идентификацию и точные измерения в условиях зашумленности [10].

Сигналы «Дыхание аквалангистов» и «Шум круизного лайнера» обладают значительной постоянной составляющей. Для сигнала «Дыхание аквалангистов» характерен доминирующий пик на оклонулевой частоте с мощностью 18

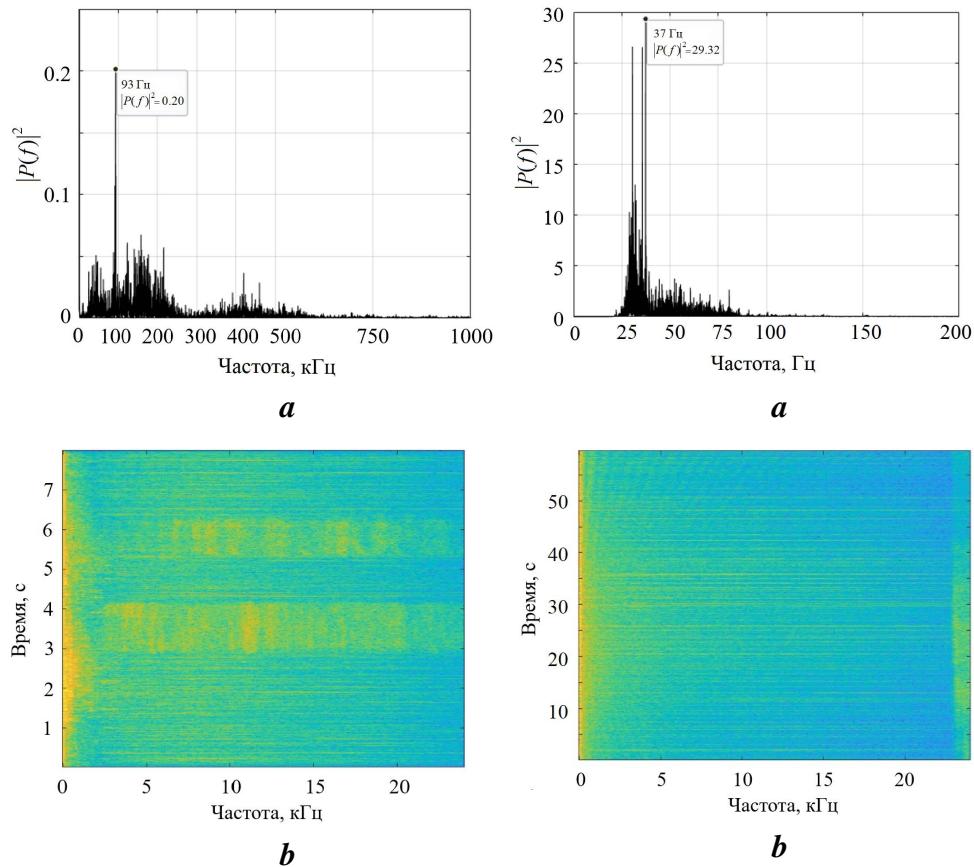


Рис. 5. Спектральный анализ сигнала «Дыхание аквалангистов»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 5. Spectral analysis of the *Scuba divers breathing* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

Рис. 6. Спектральный анализ сигнала «Шум круизного лайнера»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 6. Spectral analysis of *Cruise Ship Noise* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

(рис. 5, *a*) в виде яркой вертикальной полосы с неравномерным правым краем (рис. 5, *b*). Это говорит о сильной постоянной составляющей в сигнале, связанной, вероятно, с продолжительным выдохом пузырьков воздуха. Небольшой всплеск на частоте около 100 Гц может отражать периодичность дыхательных циклов или турбулентность, созданную потоком выдыхаемого воздуха. Постоянная составляющая сигнала обусловлена непрерывным процессом дыхания, что обеспечивает стабильность спектра.

Спектр сигнала «Шум круизного лайнера» (рис. 6, *a*) характеризуется всплеском на частоте около 40 Гц с мощностью 29.3, что указывает на значительную постоянную составляющую в сигнале, вероятно связанную с работой двигателей судна. Всплеск на частоте 37 Гц обусловлен низкочастотными вибрациями корпуса, а пик на частоте 80 Гц может отражать работу вспомогательных механизмов или кавитационные процессы. На спектрограмме (рис. 6, *b*)

выделяется яркий след на нулевой частоте, который сохраняется на протяжении всей записи. Анализ фазовых сдвигов между компонентами сигнала позволяет в дальнейшем выявить временные задержки и связи между ними, что используется при идентификации местоположения и природы источников шума [11].

Сигналы «Шум воды» и «Свист афалины» обладают характерной стабильностью и гармоническими компонентами. На спектре сигнала «Шум воды» (рис. 7, *a*) и его спектrogramме (рис. 7, *b*) видно, что сигнал имеет широкий диапазон частот, но при этом доминирующая мощность остается в полосе низких частот (до 8 кГц), после чего его интенсивность быстро снижается с увеличением частоты. Сигнал представляет собой однородный звук, о чем свидетельствует его спектральная плотность.

«Свист афалины» демонстрирует два ярко выраженных пика (рис. 8, *a*), что на спектrogramме (рис. 8, *b*) проявляется двумя четко выраженными структурами. Первый пик (1.26 кГц) отображает основную частоту фонового шума. Второй (7.5 кГц) представляет из себя среднее значение линии «свиста» (полоса от 6 до 10 кГц), при этом пик имеет определенные интонации в зависимости от передаваемого афалиной сообщения по гидроакустическому каналу [6]. Также данный пик указывает на основной тон свиста и его гармонику. Гармоника, отраженная на спектrogramме (рис. 8, *b*), имеет однородную окраску и четкие границы. Такие показатели звука являются идентификатором, который можно обозначить как аномалию в сигнале [12].

Проведенный анализ спектров демонстрирует, что каждый из исследованных сигналов обладает уникальным спектральным профилем. Биологические сигналы отличаются сложной частотной структурой и наличием гармоник, антропогенные – четко выраженными пиками на определенных частотах, а природный шум – равномерным распределением энергии в низкочастотном диапазоне [10, 12].

Сигналы животного происхождения демонстрируют значительное разнообразие спектральных характеристик. Сигнал «Лай морского льва» характеризуется концентрацией энергии в низкочастотном диапазоне с выраженным устойчивыми гармониками. «Пение косатки» отличается сложной структурой, отражающей широту диапазона частот при пении и разнообразие эхолокационных щелчков. Эти особенности позволяют исследовать коммуникативное поведение морских млекопитающих. Сигнал «Свист афалины», выделяющийся двумя выраженными пиками, имеет уникальную временную структуру, легко различимую в водной среде [6, 9].

Сигналы антропогенного происхождения, в свою очередь, имеют более предсказуемые спектральные характеристики. Сигнал «Взрыв» регистрируется как кратковременный импульс с резким всплеском на нулевой частоте и последующим быстрым затуханием, что позволяет точно фиксировать момент события. «Шум круизного лайнера» имеет мощный постоянный компонент на нулевой частоте и периодические всплески на более высоких частотах. Такая структура сигнала помогает их идентификации при исследовании влияния техногенных шумов на окружающую среду и разработке методов минимизации их влияния на разборчивость сигнала. Сигнал «Гидролокатор» характеризуется серией узкополосных пиков, что обеспечивает высокую точность

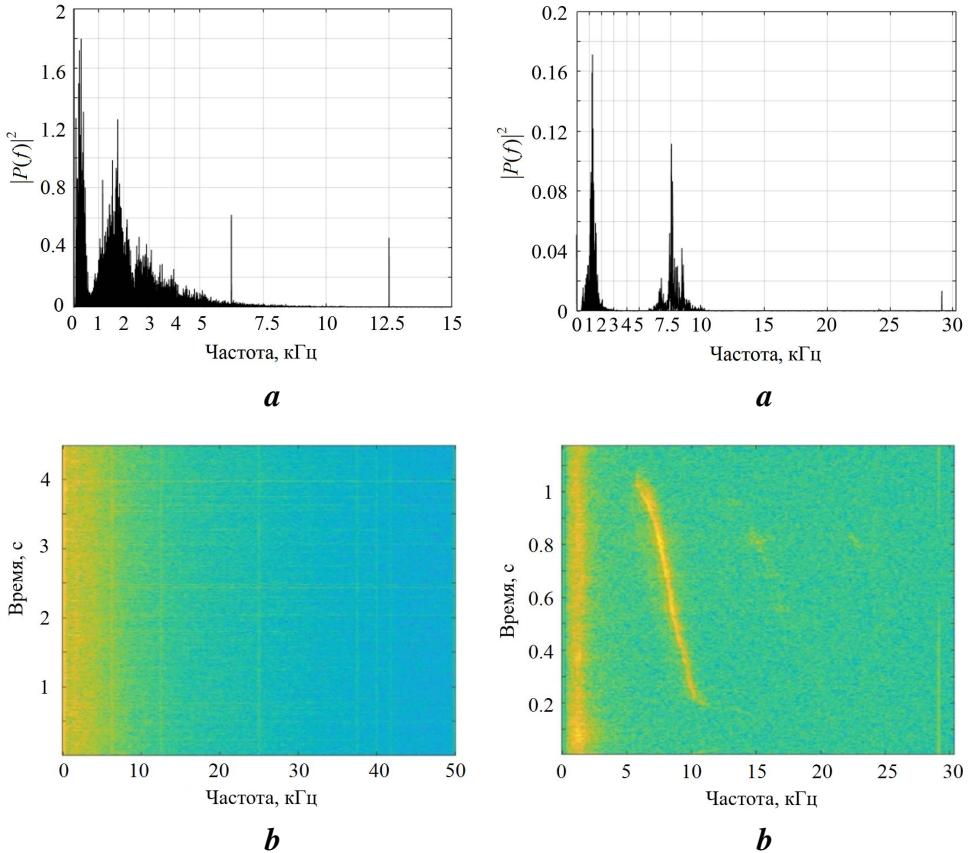


Рис. 7. Спектральный анализ сигнала «Шум воды»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 7. Spectral analysis of *Water noise* signal: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

Рис. 8. Спектральный анализ сигнала «Свист афалины»: *a* – спектр; *b* – спектрограмма

Fig. 8. Spectral analysis of *Bottle-nose dolphin's whistle*: *a* – spectrum; *b* – spectrogram

зондирования и устойчивость к внешним помехам. Эти свойства критически важны для систем подводной навигации и связи [9, 10].

Природные фоновые шумы также обладают своими особенностями. Сигнал «Шум воды» имеет равномерный спектр в области низких частот и отличается стационарностью во времени, что позволяет использовать его в качестве эталонного для калибровки гидроакустических приборов и систем. Спектр сигнала «Дыхание аквалангистов» сосредоточен в области самых низких частот. Это обусловлено тем, что звук дыхания меняется медленно, повторяя ритм вдохов и выдохов. Информация о частотах, связанных с турбулентностью потока воздуха и равномерностью дыхания в зависимости от глубины погружения полезна для анализа физиологических процессов организма человека в условиях подводной среды и разработки технических средств жизнеобеспечения аквалангистов.

Выявленные уникальные спектрально-временные профили сигналов животного происхождения могут использоваться для изучения поведения и коммуникации морских млекопитающих. Характеристики антропогенных сигналов применяются для оценки их воздействия на морскую фауну и разработки мер по его снижению. Стабильность и предсказуемость спектральных характеристик природных фоновых шумов служат основой для калибровки гидроакустических приборов и систем, что необходимо для обеспечения точности измерений [12, 13].

Проведенный анализ спектрограмм позволяет разработать алгоритмы автоматического распознавания источников звука, что критически важно для функционирования пассивных акустических систем наблюдения и экологического мониторинга. Полученные данные представляют огромную ценность для исследований акустической экологии морских экосистем, разработки подводных навигационных и коммуникационных систем, а также мониторинга антропогенного воздействия на морскую среду и ее обитателей [14, 15].

Заключение

Анализ гидроакустических сигналов позволил выявить их уникальные спектральные и временно-частотные характеристики, что обеспечивает возможность точной идентификации источников звука животного и антропогенного происхождения, а также природных фоновых шумов. Проведенная сравнительная оценка сигналов продемонстрировала их отличительные особенности, которые могут быть использованы для повышения эффективности экологического мониторинга и навигационных систем.

Формализованные признаки представлены в виде числовых векторов, удобных для использования в задачах машинного обучения, в частности для классификации сигналов по типам источников. Это решение облегчает обнаружение акустических источников и расширяет возможности применения гидроакустических технологий для задач мониторинга подводной среды и оценки антропогенного воздействия.

Результаты исследования обладают высокой практической значимостью, создавая основу для совершенствования технологий подводной навигации и разработки новых подходов к анализу акустических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Определение точности измерения дальности между подводными объектами при помощи гидроакустических модемов / А. В. Дикарев [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2024. № 2-1 (64). С. 145–154. EDN NDBLGS.
2. Оптимизация гидроакустических информационных систем подводных аппаратов для повышения эффективности подводного поиска / В. Л. Мартынов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 1–1. С. 149–157. EDN YKRZGM. <https://doi.org/10.37220/MIT.2023.59.1.019>
3. Метод гидроакустической связи / С. Н. Павликов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. 2022. Т. 1, № 1. С. 208–214. EDN VIVVNO. <https://doi.org/10.37220/MIT.2022.55.1.028>
4. Оптимизация алгоритмов обработки аудиосигналов на основе методов дискретного и быстрого преобразования Фурье / А. А. Пономарев [и др.] // Информационно-вычислительные технологии и их приложения : сборник статей XXVIII Международной научно-технической конференции (Пенза, 26–27 августа 2024 года). Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2024. С. 208–211. EDN MIMWDT.

Неруш Алёна Викторовна." / .". " /
" ".*4; ; 275." 0 ." 0 ." 0'55+"ORCID ID:
0000-0002-5547-8227 СРН - 2070-1746 - 165B - 1.0."

0009-0008-7547-9227, SPIN-код: 2070-1546, *pgtwj 25B o ckUw"*

Тузов Николай Алексеевич, . ." " / /
" " *4; ; 275." 0 . ." 0 . ." 055+ "ORCID ID: 0009-
0004-6131-2355 SPIN-код: 2645-0337 *infax@yandex.ru* " .

" " " " " " 0 504247 "" "35; "

Карцан Игорь Николаевич, профессор кафедры «Информационная безопасность», Севастопольский государственный университет (299053, г. Севастополь, ул. Университетская, д. 33), доктор технических наук, доцент, Scopus Author ID: 56825941300, ORCID ID: 0000-0003-1833-4036, SPIN-код: 5817-7087, kartsan2003@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Неруш Алёна Викторовна – проведение критического анализа материалов, обработка и описание результатов исследования, подготовка текста, формулирование выводов

Тузов Николай Алексеевич – постановка эксперимента, анализ литературы по теме исследования, анализ и обсуждение результатов, подготовка графических материалов статьи

Карцан Игорь Николаевич – постановка проблемы, проведение аналитических исследований содержания, подготовка текста и графических материалов статьи

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.