

УЧИТЬСЯ У ДЕЛЬФИНОВ В АКВАТОРИЯХ КРЫМА

М.П. Иванов¹, А.А. Родионов²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

LEARN FROM THE DOLPHINS IN THE WATERS OF CRIMEA

M.P. Ivanov¹, A.A. Rodionov²

¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

²Federal State budgetary Science institution P.P. Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

*Изучение двигательного и акустического поведения дельфинов в естественных условиях обитания осуществлялось в специализированных местах и организованных полигонах Черноморского бассейна. Наблюдения проводились во время миграции и местах нагула дельфинов *Tursiops truncatus ponticus*, *Delphinus delphis* и *Phocoena phocoena*. Накопленный опыт наблюдения за животными использовался на стационарных базах одомашнивания дельфинов с последующим их обучением для работы на технических полигонах, в условиях свободного поиска утерянных объектов и охраны акватории. Одновременно с разработкой методических решений обучения животных, активно исследовались все сенсорные системы, что в последующем может быть использовано при изучении когнитивных функций морских млекопитающих. Создание и развитие инфраструктуры морских полигонов Крыма даст возможность сформировать новую программу исследований для решения научно-практических задач ориентации, поиска и связи в сложных условиях антропогенных помех.*

*The study of motive and acoustic behavior of dolphins in the natural environment is carried out in specialized areas and organized by ranges of the Black Sea basin. Observations were conducted during migration and foraging dolphin's *Tursiops truncatus ponticus*, *Delphinus delphis* and *Phocoena phocoena*. Experience of monitoring the animals used at fixed bases of domestication of dolphins with their further training to work on technical landfill, in a free search for lost objects and protection area. In parallel with the development of methodical solutions training animals, actively researched all sensory systems that can be used when examining the cognitive functions of marine mammals. Creation and development of the marine infrastructure of polygons of the Crimea will provide an opportunity to establish a new program of research to address scientific and practical tasks, orientation, search and communication in difficult conditions of anthropogenic disturbance.*

В современных исследованиях в области гидроакустики в качестве идеальной гидроакустической системы рассматривается биологическая модель, поскольку в процессе эволюции китообразные приобрели наиболее совершенную эхолокационную систему. Устойчивость эхолокационной системы дельфинов к воздействию пассивных помех подтверждается наблюдениями за животными при охоте на мелководье. Устойчивость к воздействию активных помех подтверждается наблюдениями при коллективной охоте. Биологические системы преодолевают пассивные и активные акустические помехи естественного и антропогенного происхождения, а также работают в самых сложных условиях сосредоточенных помех. Предполагается, что такая помехозащищенность и универсальность реализуется с помощью различного рода адаптаций с оперативно изменяемыми частотно-временными и пространственными характеристиками поля излучения. Изучение закономерностей работы биологического сонара позволит найти технические решения совершенствования гидроакустической аппаратуры. Опыт последних десятилетий показал, что наиболее рациональным методом изучения поведения и возможностей дельфинов является работа с ними в морских вольерах и открытых акваториях.

На крымском побережье самой природой созданы благоприятные условия для работы с дельфинами практически круглогодично.

Изучение дельфинов на черноморском полигоне и за рубежом

С середины прошлого столетия проводятся интенсивные исследования поведения дельфинов и их возможностей по решению практически важных задач. Так, исследования по тематике мониторинга морских млекопитающих в США проводятся с 1964 г. по Программе исследований в области морской биологии и изучения морских животных (Marine Mammal & Biology (MMB) Program). Заказчик работ – Управление научных исследований ВМС США (ONR) [1]. В период 2012–2014 гг. в рамках этой программы решались следующие основные задачи [ONR Marine Mammal & Biology Program Review, Abstract Book, October 2014, 100 p.]:

- отработка технологий мониторинга гидроакустического фона и особенностей распространения звука в районах обитания морских млекопитающих;
- изучение пространственного распределения, численности, основных районов летне-осеннего скопления и особенностей локальных миграций морских млекопитающих;
- обновление баз данных, содержащих характеристики акустических сигналов, генерируемых морскими животными и параметры коммуникационных сигналов, излучаемых ими;
- оценка влияния климатических изменений на кормовые миграции морских млекопитающих;
- изучение коммуникационных сигналов животных, в т.ч. применительно к парам «самка-мать и детеныш».

Эти задачи решаются как на открытой воде, так и в специальных вольерах на полигонах морских баз. На рисунках 1–2 представлены снимки (Google «Планета Земля») в различных масштабах дислокации военно-морских баз ВМС США Сан-Диего. Калифорния (2019). На рисунке 1 представлены открытые и закрытые вольеры для содержания животных. Все вольеры имеют коридоры сообщения между отсеками, что позволяет оперативно переводить животных из отсека в отсек через калитки. На представленном снимке (рисунок 1) хорошо видны закрытые вольеры (слева внизу) и множество открытых вольеров. В закрытых вольерах (рисунок 2) проводится подготовка животных и научные исследования по совершенствованию служебного использования дельфинов при работе на море. На увеличенном изображении вольеров (рисунок 2) видно индивидуальное обеспечение катерами каждого животного. Индивидуальные катера – это, прежде всего, шум двигателя, который узнают животные, система акустического мониторинга нахождения животного под водой и система акустического управления поведением дельфина.



Рис. 1. Вольеры для содержания животных.

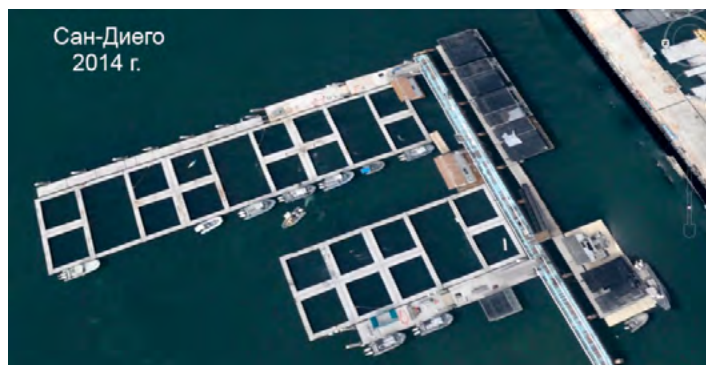


Рис. 2. Увеличенное изображение вольеров и обеспечения боевых животных.

Ежегодно по программе ММВ выполняется ~ 30–35 исследовательских проектов аналогичной тематики по различным районам Мирового Океана.

Во времена СССР формировалась аналогичная программа по черноморскому бассейну для исследования морских млекопитающих в местах нагула и скопления животных во время миграции. Инфраструктура таких мест оставляла желать лучшего, но существовали вышки и удаленные системы регистрации биоакустической активности морских животных. Такие полигоны были в районе п. Песчаное, Кача (Севастополь) и самая западная точка Крымского полуострова – Караджинская бухта, п. Оленевка, мыс Тарханкут.

В бухте Казачья (Севастополь) выполнялась основная работа по одомашниванию диких дельфинов, медицинское обследование, приручение, обучение задачам охраны и задачам поиска. На этой же базе проводились биоакустические исследования по решению задач обнаружения на больших дистанциях, распознавания подводных объектов, коммуникационного поведения. На рисунке 3 приведен снимок дельфина в аппаратном оснащении.



Рис. 3. Аппаратное оснащение боевого дельфина (Севастополь, 1974 г.).

На полигоне в районе мыса Фиолент отрабатывались задачи охраны береговой зоны и обучения животных самостоятельному поиску в открытой воде. Этот полигон был создан как экспериментальный с необходимой полевой инфраструктурой, обеспечивающей оперативное развертывание всех необходимых служб для охраны акватории и побережья.

Полигон в Феодосийском заливе использовался, прежде всего, как технический полигон работы с образцами вооружения и военной техники (ВВТ). Вместе с тем на полигоне проводились работы с боевыми животными, обученными свободному поиску утерянных объектов. В качестве утраченных объектов были различные виды ВВТ. На этом полиго-

не происходило незапланированное исследование конкурентоспособности двух средств акустического поиска и допоиска с помощью технических средств и сонара дельфина. Испытания показали совершенство работы биологического сонара в условиях мелкого моря по сравнению с техническими средствами акустического поиска специализированными тральщиками.

Научно-технические проблемы изучения дельфинов

Из теоретической гидроакустики известно, что для подводного наблюдения в изотропной среде наилучшими сигналами будут узкополосные длинные импульсы. Изотропная среда – это идеализация акустической трассы, которая действительно может быть таковой на малых расстояниях между системой наблюдения и объектом поиска. К аппаратным средствам подводного наблюдения, прежде всего, относятся приемно-передающие антенны, которые при современном уровне технологий, как правило, узкополосные. Узкая полоса, благодаря резонансным свойствам элементов антенны, дает возможность получить максимальную чувствительность на приеме и максимальный КПД на излучающей антенне. Однако при работе в естественных условиях, когда помеховая обстановка нестационарная и зависит от многих гидрофизических факторов, использование узкополосных сигналов сужает возможности решения гидроакустических задач обнаружения, распознавания и связи. Повышение помехозащищенности и скрытности в проектируемых гидроакустических средствах может быть реализовано с помощью создания широкополосных излучающих и приемных антенн, а также систем обработки больших массивов многоканальных информационных потоков в реальном масштабе времени.

Расширение полосы частот приемно-излучающего тракта в технических системах позволяет расширить зону обнаружения за счет увеличения дальности действия ГАС и увеличить разрешающую способность по всем координатам, а при нарастающем потоке информационных данных улучшить звукоподводную связь. Альтернативы широкополосным сигналам для работы в сложных акустических условиях не существует [2].

В процессе исследования созданных природой биосонаров необходимо найти адаптивные характеристики сигналов излучения в зависимости от акустических и физических характеристик среды распространения сигнала, методические решения по регистрации сигналов и подготовке животных для решения задач в сложной помеховой обстановке [3]. В табл. 1 представлены основные различия характеристик ГАС и сонаров дельфинов [4].

Таблица 1. Основные различия ГАС и сонара дельфина

	ГАС	Сонар дельфина
1	Импульсы с относительной широкополосностью менее 0.1 (за исключением параметрических антенн), длительность колебательного процесса вдоль акустической оси от 50 до 100 и более периодов с несущей частотой, изменяемой дискретно.	Длительность излучаемых ультракоротких импульсов (УКИ) вдоль акустической оси составляет 10–20 мкс (1–2 периода колебательного процесса), знакопеременной биполярной структуры с относительной широкополосностью 0.6÷0.9.
2	Пространственно-частотно-временная узкополосная фильтрация; чувствительность на приеме 0.1 Па в узкой полосе частот (в новых антеннах большой площади на фиксированной частоте чувствительность может достигать 0.001 Па).	Частотно-временная фильтрация; чувствительность на приеме составляет 0.001 Па в полосе частот от 50 до 140 кГц.

3	Амплитуда импульсов ограничена порогом кавитации.	Кавитация при излучении сверхкоротких и широкополосных импульсов не обнаружена.
4	Антенна излучения и приема совмещены.	Антенны излучения и приема независимы.
5	Синхронное сканирование характеристикой направленности излучения и приема.	Асинхронное сканирование характеристикой направленности излучения и приема.
6	Набор импульсов ограничен и дискретный.	Одновременное и раздельное излучение импульсов УКИ и частотно-модулированных (ЧМ) или частотно-манипулированных (ЧМн) длинных импульсов.
7	Мощность излучения составляет 5–10 кВт и более.	Мощность излучения УКИ не более 1 Вт.
8	Среднее значение уровня акустического давления составляет 220–240 дБ/1мкПа/1м.	Пиковое значение уровня акустического давления составляет 220–230 дБ/ 1мкПа/1м.
9	Адаптация к изменению акустических условий среды проводится с помощью сигналов: с дискретным изменением несущей частоты, с изменяемой длительностью, с ЧМ и ЧМн с относительной широкополосностью не более 0.2.	Вариации спектрально-временных параметров излучаемых сигналов состоят из: импульсов с быстрой частотной модуляцией УКИ; пакетов импульсов, состоящих из УКИ с время-импульсной модуляцией (ВИМ), длинных импульсов с ЧМ и ЧМн с относительной широкополосностью от 0.6 до 0.9.

Для сигналов, которые используют морские млекопитающие при ориентации, поиске, распознавании и связи рассчитать тактико-технические характеристики практически невозможно, т.к. теория для широкополосных систем гидролокации и связи находится в стадии разработки.

Характеристики современных ГАС рассчитывают, исходя из изотропности среды распространения сигнала, что является правильным для узкополосных сигналов, а проверку работы ГАС проводят на полигонах с заранее известными характеристиками. Тестирование сонара дельфина также проводят в одном районе (полигон обучения животных) в статическом режиме эхолокации или в свободном поиске на большой акватории. Теоретически работа ГАС и сонар животного не сопоставимы. Поэтому для определения конкурентоспособности нужно решать задачу аттестации двух систем при параллельной или одновременной работе. Такие исследования принесут нужный эффект только в условиях натуральных испытаний в условиях специализированных морских полигонов с известными и хорошо изученными гидрофизическими характеристиками. Полученные результаты позволят однозначно сопоставить работу технических и биотехнических систем, в том числе в экстремальных акустических условиях.

После проведения зачетных испытаний стационарных станций и работы животного в статическом режиме поиска и распознавания подводных малоразмерных целей необходимо провести аналогичные опыты с использованием специализированных подвижных систем гидроакустического обнаружения подводных сил и средств, находящихся на вооружении.

При решении задач подводной связи для успешной передачи сообщений необходимо высокое отношение сигнал/шум (ОСШ). Вероятность обнаружения и перехвата зависит от отношения сигнал/шум, а высокий уровень сигнала выдает устройства связи. Используемые формы сигнала из-за их очевидных характеристик также легко распознаваемы опытными операторами [5]. Но, если использовать сигналы, сосредоточенные по времени с относительной широкополосностью 0.6–0.9, то за счет расширения канала время передачи данных значительно сокращается, что улучшает показатели помехозащищенности и скрытности.

Предполагается, что каждая биологическая особь реализует механизм скрытности работы сонара и одновременно реализует необходимую помехозащищенность сонара, что и вызывает интерес со стороны специалистов радиотехнических специальностей и одновременно является предметом исследования.

Задачи поиска подводных объектов ограничены набором команд, которые используются во время активного поиска, т.к. команды управления поведением дельфинов реализованы на языке жестов. Передача информации животному и обратно с помощью языка жестов возможна только в светлое время суток. Поиск возможен только на ограниченном пространстве и в присутствии катера с тренером. Создание акустической системы управления поведением дельфина с адекватной акустической системой кодирования [6] позволит значительно расширить возможности служебного использования в задачах свободного поиска подводных объектов.

Решение задач охраны акватории и поиск подводных объектов являются основными задачами служебного использования животных. Эффективность охраны акватории показана научными исследованиями, проводимыми в СССР и за рубежом. Действительно, эффективность работы эхолокационной системы дельфина как системы ближнего действия (до 1 км) значительно превосходит гидроакустические системы охраны акватории. Обучение животных работе в экстремальных условиях смены акустической обстановки, перемещения на большие расстояния и адаптации к новой помеховой обстановке становится важной работой, которая требует больших усилий и затрат времени. Особенно это относится к временным параметрам использования животных на дежурстве (часы, сутки, количество суток) [7]. Такие исследования сейчас проводятся в США, и в работе показано, что некоторые дельфины способны находить подводные объекты с помощью эхолокации, находясь в непрерывном поиске, и сообщать о наличии цели непрерывно в течение 15 суток. Эксперимент поставлен на двух животных в режиме статического поиска малоразмерных подводных объектов. Вероятность правильного обнаружения для одного животного составила 75–86%, а для другого 97–99%.

Заключение

Разработка новых технических решений на основе экспериментов на дельфинах позволит значительно расширить наши знания в области использования сверхширокополосных сигналов при решении задач обнаружения, распознавания и передачи информации в сложных акустических условиях. Создание методических решений параллельной работы технической системы и биологического сонара даст возможность объективно сравнить эти две системы в одинаковых гидрофизических условиях при решении различных задач и создать доказательную базу конкурентоспособности (преимуществ и недостатков) биологического сонара и технических аналогов современных ГАС.

Современные научно-технические решения направлены на создание новых технологий обучения животных, что позволяет перейти на новый качественный уровень исследований биоакустических возможностей морских млекопитающих, которые в одном акустическом информационном канале решают задачи ориентации, поиска и связи в сложных условиях перекрестных и сосредоточенных помех. Опыт работы в условиях провокации коммуникационного поведения дельфина в лабораторных условиях показал, что современный уровень технических решений позволяет развивать биофизические подходы и точно регистрировать и идентифицировать гидроакустические сигналы биообъектов [6].

Создание соответствующей инфраструктуры морских полигонов Крыма даст возможность развивать биоакустические исследования морских млекопитающих и позволит участвовать в грантовой системе финансирования научных проектов. Сегодня заявки на работы и исследования биоакустики морских млекопитающих не рассматриваются из-за

отсутствия возможности работать с дрессированными животными в условиях открытой акватории. Работы в закрытых бассейнах значительно сужают горизонты исследования из-за значительного реверберационного фона. Большая часть необходимых научно-практических задач может с успехом решаться на морских полигонах Крыма.

Литература

1. The National Marine Mammal Foundation's Five year Report // 2016. www.nmmf.org
2. Voronin M.A., Pivnev P.P., Tarasov S.P. Building broadband and ultra-wideband antennas hydroacoustic research facilities // Proceedings of the XI all-Russian Conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics». SPb. Science, 2012. P. 108–111. (in Russian)
3. Stefanov V.E., Ivanov M.P., Kashinov V.V., Stepanov B.G. Mechanisms of interference resistance of the sonar system of dolphins exposed to man-made interference // Symposium on Bio Sonar Systems and Bio-Acoustics, Institute Acoustics, Loughborough University, 2009.
4. Ivanov M.P., Rodionov A.A. Technology speaker system certification cetaceans // Proceedings of the XI all-Russian Conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics». SPb. Science, 2010. P. 29–34. (in Russian)
5. Ivanov M.P., Rodionov A.A., Stefanov V.E. technology broadband observation and communications on the basis of a study of sonar cetaceans // Proceedings of the XI all-Russian Conference «Advanced technologies of hydroacoustics and hydrophysics». SPb. Science, 2016. P. 25–30. (in Russian)
6. Ivanov M.P., Rodionov A.A., Tolmachev Y.A., Leonova L.E., Romanovskaya E.V., Stefanov V.E. One the use of reflection coefficient phase at hydroacoustic measurements of sea ice cover thickness // *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2018, 11, 1, 74–79.
7. Sam Ridgway, Mandy Keogh, Don Carder, James Finneran, Tricia Kamolnick, Mark Todd and Allen Goldblatt. Dolphins maintain cognitive performance during 72 to 120 hours of continuous auditory vigilance // *The Journal of Experimental Biology*. 2012, 1519–1527.
8. Brian K. Branstetter mail, James J. Finneran, Elizabeth A. Fletcher, Brian C. Weisman, Sam H. Ridgway. Dolphins Can Maintain Vigilant Behavior through Echolocation for 15 Days without Interruption or Cognitive Impairment // Published: October 17, 2012. Doi: 10.1371/journal.pone.0047478.