

ОБНАРУЖЕНИЕ ДЕЛЬФИНАМИ (*TURSIOPS TRUNCATUS*) ЦЕЛЕЙ, СКРЫТЫХ МОРСКИМИ ОСАДКАМИ

© 2020 г. К. А. Зайцева^{1,*}, В. И. Королев¹, А. В. Ахи¹, Е. Ю. Бутырский¹

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: zaitseva@iephb.ru

Поступила в редакцию 16.03.2020 г.

После доработки 10.07.2020 г.

Принята к публикации 10.07.2020 г.

На дельфинах в условиях их свободного плавания в вольерах проведено экспериментальное исследование принципов и механизмов работы сонара при поиске и обнаружении объектов, скрытых морскими осадками. Обнаружена высокая адаптивность стратегии поиска. Дельфин способен в короткие промежутки времени изменять линейное сканирование при поиске в толще воды на круговое вращение характеристиками направленности при поиске в грунте, происходящее при сложном круговом маневрировании животного, что обеспечивает оптимальные условия для обнаружения объекта.

Ключевые слова: дельфин, локация, поиск, обнаружение

DOI: 10.31857/S004445292006011X

ВВЕДЕНИЕ

Эхолокация, как процесс получения информации о внешней среде в живой природе, привлекала пристальное внимание исследователей различных специальностей к зубатым китам (дельфинам). Именно поэтому в этой области накоплен довольно большой экспериментальный материал, который уже сегодня позволяет в полной мере оценить роль и значение эхолокации в жизни морских млекопитающих. Эхолокация в наиболее развитом виде свойственна летучим мышам и китообразным. Возникновение и развитие эхолокации вызвано необходимостью ориентироваться в условиях, когда обычные органы чувств неэффективны. Принципиальное отличие эхолокационной системы состоит в ее активности, тогда как остальные органы чувств лишь пассивно воспринимают информацию.

Экспериментальные исследования функциональных возможностей эхолокатора дельфинов показали, что возникшая в ходе эволюции в водной среде новая сенсорная система получения информации об окружающей внешней среде является эффективным средством ее активного анализа. Она позволяет животному:

- обнаруживать подводные объекты, размер которых в несколько раз меньше длины волны, соответствующей максимуму спектра зондирующего сигнала,

- обнаруживать и узнавать объекты, отличающиеся по размеру всего на 2%, а также различаю-

щиеся по материалу, размеру, форме и взаимному расположению элементов в сложной мишени, соответствующих задержкам в 5 мкс,

- пеленговать звучащие источники с ошибкой до 1° даже при наличии помех, превосходящих сигнал по мощности на 4 порядка и расположенных на угловом расстоянии в 1°.

Столь высокая эффективность эхолокационного анализа достигается за счет использования сонаром дельфина физиологических механизмов, сформировавшихся в ходе длительной эволюции. Однако ряд важных вопросов в изучении функциональных возможностей эхолокатора дельфинов остались малоизученными. К ним, в частности, относится проблема эффективности поиска и обнаружения подводных объектов, лежащих на грунте, и, особенно, скрытых морскими осадками. Перспективы в исследованиях средств поиска затонувших объектов в настоящее время определяются необходимостью изучения шельфа Мирового океана, обнаружения “черных ящиков” летательных аппаратов, ценных малогабаритных грузов, археологических объектов, донных мин и торпед, емкостей с опасными веществами (особенно их несанкционированные захоронения), террористических средств для нанесения ударов по портовым сооружениям и плавучим атомным электростанциям, находящихся в толще донных осадков вблизи побережья, а также проведения поисковых нефтегазовых работ, обнаружения дефектов трубопроводов и кабелей.

Исследование механизмов поиска, обнаружения и определения координат объектов, лежащих на дне и, особенно, скрытых слоем донного ила или грунта, являются одной из наиболее актуальных и сложных задач современной гидроакустики.

Основными трудностями, возникающими при поиске погруженных в толщу морских осадков объектов, являются:

- определение координат объекта,
- наличие сильной шумовой помехи,
- необходимость использования низких частот предполагает работу гидролокатора в наиболее шумном диапазоне,
- наличие отражений от неровностей поверхности дна и неоднородности толщи дна,
- нелинейное взаимодействие волн наката в грунте,
- интенсивная донная реверберация,
- объемная реверберация в грунте и др.

Имеющиеся в настоящее время данные свидетельствуют о том, что современная гидроакустическая техника обнаружения заиленных предметов неэффективна и требует совершенствования. В связи с этим представляет несомненный интерес исследование возможных принципов и механизмов локационного обнаружения заиленных или погруженных в толщу грунта объектов дельфинами.

Исследования локационного поиска, обнаружения и идентификации подводных объектов дельфинами проводились во многих работах. Объекты локации, как правило, располагались при этом в объеме гидросферы, т.е. в толще воды. Вопрос о способности дельфинов находить объекты локации на дне или в грунте мало изучен. Еще в первых исследованиях эхолокации дельфинов было высказано предположение о возможности использования его локационных возможностей для помощи человеку в освоении Мирового океана. Тогда речь шла лишь об использовании дельфина как курьера для доставки информации, инструментов и грузов от подводных аппаратов, находящихся на дне моря, к плавучим платформам на поверхности и обратно. Но именно тогда возникло предположение, что локационные возможности дельфинов могут быть использованы для поиска объектов в грунте. Начало исследованиям в этом направлении было положено работой [1], в которой впервые было описано наблюдение за поведением дельфина, который целенаправленно определял координаты зарывшейся в коралловый песок рыбы, раскапывал ее рострумом и таким образом доставал. Опираясь на способность дельфинов к локационному поиску и обнаружению в толще воды, Roitblat с соавт. [2] была создана техническая система, использующая локационные импульсы, имитирующие характерные сигналы дельфина. Бионическая

система, построенная по принципу нейросети, позволила обнаруживать объекты, зарытые в грунт на глубину до 10 см. Работа имеет чисто теоретическое значение. В работе [3] проводилось сравнение экспериментальных данных на дельфинах по их способности обнаруживать объект в иле на глубине 45 см с возможностями технической системы, построенной по модели сонара дельфина. Показаны лучшие результаты обнаружения объектов поиска живой биологической системой относительно технической. На базе ВМС США были получены данные о том, что натренированные дельфины могут обнаруживать зарытые мины более эффективно, чем технические системы [4, 5]. В работе [6], выполненной по оригинально разработанной методике, описывается стратегия поиска дельфинами мишеней, акустически имитирующих рыб, зарытых в кварцевый песок. Дельфин находил зарытые в песке мишени и доставлял их на поверхность воды тренеру. Исследование показало применение дельфинами при поиске метода пошагового сканирования дна. При этом осталось неясным, какие локационные сигналы применяет дельфин в процессе поиска. В упомянутых работах, по сути дела, приводятся лишь феноменологические данные без выяснения механизмов, лежащих в основе высокой эффективности работы сонара дельфина по поиску объектов, скрытых морскими осадками.

В предыдущей нашей работе [7] было проведено исследование вероятности локационного обнаружения дельфином подводных объектов в зависимости от их пространственного нахождения в водной акватории: в толще воды, у поверхности, на дне и в грунте. Оказалось, что изменение вариативности пространственного нахождения лоцируемой мишени мало влияет на эффективность ее обнаружения, что свидетельствует о том, что сонар дельфина способен адаптивно менять работу своей акустической системы и параметры излучаемого сигнала для уверенного приема отраженного сигнала [8]. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явился поиск принципов и механизмов работы сонара дельфина при обнаружении и распознавании объектов, скрытых морскими осадками и стратегии поиска.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Опыты проводили на двух дельфинах (поочередно) в свайно-сетевом вольере размером $10 \times 10 \times 6$ м, расположенном в черноморской бухте. Применялась поведенческая методика с пищевым подкреплением в условиях свободного плавания животных. Положительным условным раздражителем служил полый латунный цилиндр высотой 120 мм, диаметром 100 мм, с толщиной стенок 5 мм. Отрицательным раздражителем был стальной цилиндр тех же размеров. Для исключения зрительного распознавания мишени окрашивали нитроэмалью

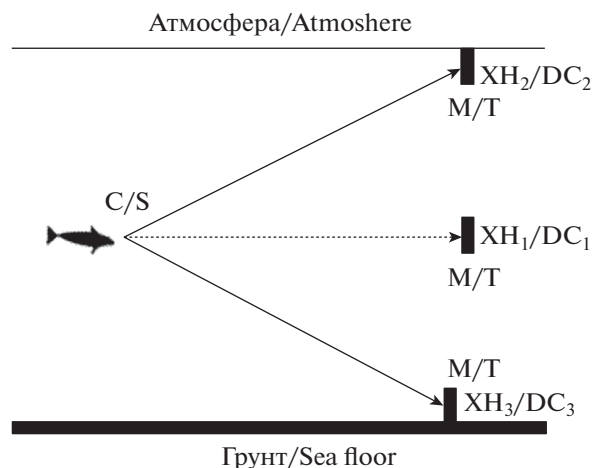


Рис. 1. Схема поиска дельфином объектов в толще воды. Сканирование характеристиками направленности XH_1 – XH_3 в объеме гидросферы, С – стартовая позиция дельфина, М – мишень.

Fig. 1. Diagram of object detection in the water column by dolphins. Linear scanning by the sound beams of radiation directivity characteristics DC_1 – DC_3 ; S – starting position, T – target.

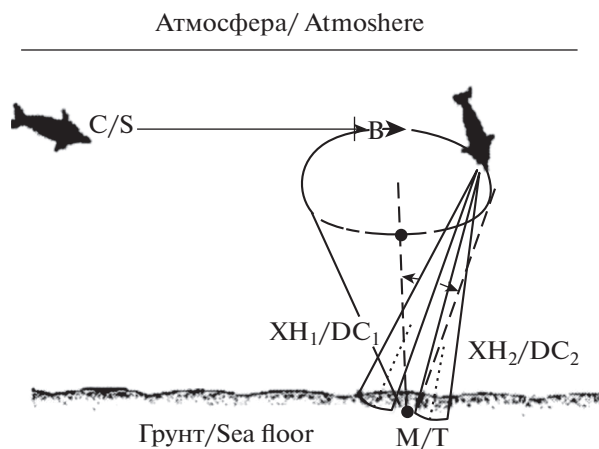


Рис. 2. Схема поиска дельфином объектов в грунте. Круговое сканирование характеристиками направленности XH_1 – XH_2 при обнаружении объекта в грунте, С – стартовая позиция дельфина, М – мишень, В – начало кругового движения дельфина.

Fig. 2. Diagram of object search on the sea floor by dolphins. Circular scanning by the sound beams of radiation directivity characteristics DC_1 – DC_2 ; S – starting position, T – target, C – onset of dolphin rotational motion.

цвета морской волны. Во время эксперимента по сигналу 5 кГц дельфины были обучены помещать роstrum в специальную деревянную конструкцию, имеющую выемку в форме нижней челюсти, и находиться в таком положении несколько минут. Пространственное положение дельфина при этом в указанной конструкции было ориентировано таким образом, что его тело было обращено хвостовым плавником внутрь вольера, что позволяло исключить зрительное и акустическое наблюдение животного за манипуляциями экспериментатора по установке мишеней. По сигналу 10 кГц дельфин начинал поиск мишеней, местоположение которых менялось в случайном порядке. Предварительно дельфинов обучали последовательно обнаруживать мишени в толще воды (рис. 1) на глубине 3 м и на дне. Затем производилось поэтапное погружение мишеней в грунт наполовину, три четверти, полностью и, наконец, на глубину 10 см (рис. 2). При правильном распознавании положительной мишени дельфин касался роstrumом места нахождения мишени, затем манипулятора (поплавка из пенопласта) и получал рыбу. После этого дельфин по сигналу снова занимал первоначальную стартовую позицию. Во время эксперимента велась видеозапись траектории движения дельфина. Для исключения реакции на место нахождения мишени менялось их расположение. С этой целью вольер был разбит на четыре квадрата. Мишени в случайном порядке поэтапно зарывались в центре каждого квадрата. На каждое местоположение было проведено по сорок предъявлений мишеней.

При обработке результатов учитывалось число правильных реакций и ложных решений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как показали ранее полученные результаты поведенческих экспериментов [7] и подтвержденные настоящим исследованием, наиболее легкой задачей для животного было обнаружение и распознавание мишеней в толще воды ($p = 0.95$), несколько хуже ($p = 0.8$) на дне акватории. Дельфин также способен идентифицировать мишени, скрытые морскими осадками, на глубине 10 см ($p = 0.78$), расположенные в определенной заданной точке акватории. Переход к изменению пространственного места расположения мишени в первых опытах привел к снижению вероятности правильных ответов ($p = 0.6$). В процессе обучения результаты улучшались. Потребовалось десять опытных дней, чтобы достигнуть первоначальной вероятности, близкой к 0.78, которая в дальнейшем была стабильной. Для одного дельфина вероятность правильных ответов составила $p = 0.8 \pm 0.076$ при $\sigma = 0.38$, для другого дельфина $p = 0.75 \pm 0.086$ при $\sigma = 0.43$. Как показало видеонаблюдение траектории движения во время эксперимента, начало обнаружения зарытого в грунт объекта начиналось с прохода от стартовой позиции С по определенной дистанции до В, где происходит неуверенное обнаружение цели тренированным животным (рис. 2). Для уверенного распознавания дельфин возвращается в точку В. Возвращения происходят несколькими циклами вращений сужающегося радиуса вокруг цели в виде

конуса с вершиной в точке нахождения мишени. Характеристика направленности сонара при этом имеет положительный наклон относительно продольной оси животного, поэтому дельфин наклоняется, “ныряет” ко дну, чем достигается уверенное обнаружение цели. Локация на минимальной дистанции с излучением сигнала в грунт дает комплексное отражение. Резонансные характеристики отражения в свободном слое и в осадках при гидроакустическом контакте позволяют классифицировать цель.

Изменение маневрирования животного при решении сложной локационной задачи было зафиксировано и другими авторами [9]. Так, целесообразное изменение траектории движения наблюдалось при обнаружении мишеней (металлических шаров), диаметром от 20 до 50 мм, лежащих на дне бассейна, специально выложенного галькой с характерным размером от 5 до 30 мм. Дельфин лопатил мишени под скользящим углом и двигался к ним не вблизи поверхности, как обычно, а вблизи дна. По мнению автора, это объясняется стремлением животного уменьшить реверберационную помеху. Некоторые исследователи отмечают значительную вариабельность траектории движения животного при подходе к дифференцируемым объектам [9]. Интерпретация этой вариабельности различна. При распознавании шаров и цилиндров, находящихся в толще воды, изучалась траектория движения путем измерения величины отклонения от оптимальной траектории, за которую принималось кратчайшее расстояние между местом старта и мишенью. Исследователи показали, что траектория подхода животных к дифференцируемым мишеням одинакова для обоих классов объектов. Ее характер не был связан с задачами по распознаванию. По мнению авторов, момент распознавания объектов всегда соответствовал моменту наибольшей вариабельности траектории, что говорит о том, что распознавание мишеней одинаково легко осуществлялось при любом характере траектории движения дельфина. В работе Дубровского [9] было показано, что иногда при движении к объекту дельфин совершает вращательные движения роострумом, конец которого описывает в вертикальной плоскости эллипсовидную траекторию. По мнению автора, это объясняется тем, что форма и спектр локационного импульса существенно зависят от угла относительно продольной оси роострума. Изменяя этот угол, дельфин может облучать исследуемые мишени различными импульсами. Чем больше угол, тем более низкочастотным является спектр импульса. В наших предыдущих работах [7, 8] было показано, что дельфины способны менять как параметры локационных сигналов, так и траекторию своего движения, добиваясь оптимальных условий для получения исчерпывающей информации о подводных объектах.

Наблюдаемое нами сложное кинематическое маневрирование дельфина при обнаружении объекта, скрытого морскими осадками, объясняется тем, что процесс отражения звука, падающего на дно, более сложен, чем отражение от поверхности моря. При падении звуковой волны на дно часть энергии отражается, а некоторая часть переходит в грунт, распространяется в нем, претерпевая отражения на границе слоистых структур, возвращается обратно в водную среду и взаимодействует с отраженной от границы раздела вода-грунт энергией. Результирующий комплексный коэффициент отражения зависит от частоты и угла падения. Но ни при каких углах падения не наблюдается полного внутреннего отражения. Характер переизлученного дном акустического поля (уровень индикатриссы рассеяния, угловые и частотные зависимости коэффициента обратного рассеяния) существенно влияет на эффективность приема отраженного сигнала в любых гидроакустических системах. В основе наблюдаемого нами сложного маневрирования животного при обнаружении объекта, скрытого морскими осадками, лежит волнообразный эффект рассеяния донных зондирований для различных углов наклона (скольжений) звука к донной поверхности. Максимум волны отражений для определенных углов скольжения маскирует цель. Дельфин разворачивается и повторяет зондирование, выполняя идентификацию цели на минимуме углов скольжений донных рассеяний. Таким образом, возникает циклический характер подходов дельфина относительно цели. В общем виде траектория циклов наблюдения — эллипс. Главная ось эллипса — проходы дельфина вдоль экспериментального вольтера, малая ось — развороты для обратного прохода. Сложное кинематическое поведение дельфина можно рассматривать как эффект механического вращения характеристики направленности с определенной скоростью, т.е. способность поворота характеристики направленности в широком секторе углов на протяжении короткого промежутка времени. В свое время в некоторых работах высказывалось предположение о возможности тонкого немеханического сканирования характеристикой направленности без поворота головы дельфина [10]. Данные, полученные авторами при четырехканальной регистрации акустических сигналов афалины в диапазоне до 100 кГц с синхронной киносъемкой положения животного двумя кинокамерами, показали, что источник зондирующих импульсов находится вне головы дельфина. Этот феномен объясняется тем, что у дельфина имеется не один когерентный источник с монотонно меняющейся разностью фаз между ними, что создает эффект вращения характеристики направленности. Скорость вращения, по оценкам авторов, достигает 3 град/мкс, т.е. поворот характеристик в широком секторе может происходить на протяжении одного импульса. Мнение о возмож-

ности немеханического сканирования характеристиками направленности без поворота головы подерживалось некоторыми исследователями чисто теоретически. Гипотеза о вращении характеристик направленности без поворота головы не подтверждается в экспериментальных работах. Основным аргументом для отрицания гипотезы является высокая стабильность распределения звукового давления зондирующего импульса относительно оси головы дельфина. Облучение всей передней полушеры при быстром немеханическом сканировании вместо облучения области расположения объекта локации не выгодно энергетически, а следовательно, и не помехоустойчиво. Известно, что в технических гидролокационных системах наличие ярко выраженной угловой зависимости коэффициента обратного рассеяния приводит к необходимости принимать специальные меры по стационаризации принимаемых сигналов донной реверберации при работе гидролокаторов бокового и кругового обзора. Это необходимо для получения равномерного гидролокационного изображения и осуществляется путем применения характеристик направленности специальной формы, а также использованием в приемном тракте схем автоматической регулировки усиления.

Результаты работы показывают, что дельфины при обнаружении объектов способны менять стратегию поиска. В том случае, когда объект скрыт морскими осадками, дельфин меняет траекторию движения, т.е. переходит от линейного движения к объекту к сложному круговому маневрированию, позволяющую найти оптимальное место и угол локации, добиваясь оптимальных условий, необходимых для получения исчерпывающей информации о подводных объектах. Обнаруженный способ работы сонара дельфина является бионическим патентом природы, который можно рекомендовать для совершенствования гидроакустических систем. Для окончательного изучения механизмов локационного поиска и обнаружения объектов, скрытых морскими осадками, необходимо в дальнейшем исследование спектрально-временной структуры сигнала дельфина.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного бюджета РФ по государственному заданию (тема ПФНИГ АН-63. Рег. АААА-А18-118013090245-6) "Сравнительное изучение механизмов функционирования сенсорных систем у человека и животных".

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных соблюдены в соответствии с прин-

ципами Базельской декларации и рекомендациями ARRIVE.

Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов изучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rossbach K., Herzing D.* Underwater observations of benthic-feeding bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) near Grand Bahamas Island, Bahamas. *Marine Mammal Science*. 13 (3): 498–504. 1997.
2. *Roitblat H.L., Au W.W.L., Nachtigal P.E., Shizumur R., Moons G.* Sonar recognition of target embedded in sediment. *Neural Networks*. 8 (7/8): 1263–1273. 1995.
3. *Nachtigal P.E., Au W.W.L., Roitblat H.L., Pawloski J.L.* Dolphin biosonar: A model for biomimetic sonar. *Processing of the First International Symposium on Aqua Bio-Mechanisms*. 115–121. 2000.
4. *Moore P.W.* Mine-hunting dolphins of the Navy. *Detection and Remediation Technologies for Mines and Mine-like Targets*. International Society for Optics and Photonics. 3079: 2–6. 1997.
5. *Martin S.W., Phillips M., Bauer E.J., Moore P.W., Houser D.S.* Instrumenting free-swimming dolphins echolocating in open water. *J. Acoust. Soc. Amer.* 117 (4) Pt. 1: 2301–2307. 2005.
6. *Dahl S.* Target detection in coral sand by bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*). M. Sc. Thesis, Biology Department. Institute of Physics, Chemistry and Biology. Lincheping University. Sweden. 2007.
7. *Зайцева К.А., Королев В.И., Ахи А.В., Кривченко А.И., Бутырский Е.Ю.* Вероятность локационного обнаружения дельфином *Tursiops truncatus* подводных целей в зависимости от их пространственных координат. *Ж. эвол. биохим. и физиол.* 54 (2): 133–135. 2018. [*Zaitseva K.A., Korolev V.I., Akhi A.V., Krivchenko A.I., Butyrskiy E.Yu.* Probability of underwater target detection in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) depending on target spatial coordinates. *J. Evol. Biochem. Physiol.* 54 (2): 149–152. 2018. <https://doi.org/10.1134/S0022093018020084>
8. *Зайцева К.А., Королев В.И., Кривченко А.И., Ахи А.В., Бутырский Е.Ю.* Способность дельфинов (*Tursiops truncatus*) целенаправленно изменять спектрально-временные параметры локационных сигналов. *Ж. эвол. биохим. и физиол.* 55 (3): 89–92. 2019. [*Zaitseva K.A., Korolev V.I., Krivchenko A.I., Akhi A.V., Butyrskiy E.Yu.* Dolphins (*Tursiops truncatus*) are able to purposefully change the spectral and temporal parameters of echolocation signals. *J. Evol. Biochem. Physiol.* 55 (3): 211–214. 2019. <https://doi.org/10.1134/S0022093019030098> <https://doi.org/10.1134/S0044452919030161>
9. *Белькович В.М., Дубровский Н.А.* Сенсорные основы ориентации китообразных. Л. Наука. 1976. [*Belkovich V.M., Dubrovsky N.A.* *Sensornye osnovy orientatsii kitoobraznykh* [The sensory basics of cetacean orientation] Leningrad. Nauka. 1976].
10. *Белькович В.М., Резников А.Е.* Новое в гидролокации у дельфинов / Природа. 11: 84–90. 1971. [*Belkovich V.M., Reznikov A.E.* *Novoe v gidrolokatsii u delfinov* [The news in dolphins hydrolocation] *Priroda*. 11: 84–90. 1971].

DETECTION OF TARGETS MASKED BY MARINE SEDIMENTS IN DOLPHINS *TURSIOPS TRUNCATUS*

K. A. Zaitseva^{a,#}, V. I. Korolev^a, A. V. Akhi^a, and E. Yu. Butyrskiy^a

^a *Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Science, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: zaitseva@iephb.ru*

The sonar operation principles and mechanisms during search and detection of objects masked by marine sediments were investigated in dolphins under conditions of their free swimming in enclosures. Animals exhibited a high adaptability of the search strategy. Specifically, dolphins were able to switch within a short period of time from linear scanning during object search in the water column to circular scanning (rotating) by the sound beams of radiation directivity characteristics when searching on the see floor, thus providing optimal conditions for object detection.

Keywords: dolphin, location, search, detection